

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

LIGAÇÕES ESTRUTURAIS COM BARRAS DE AÇO COLADAS COM EPÓXI  
EM MADEIRAS DE ALTA DENSIDADE – Influência dos defeitos da madeira e  
dos erros de produção na resistência mecânica

João Miguel Santos Dias

Salvador  
2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

LIGAÇÕES ESTRUTURAIS COM BARRAS DE AÇO COLADAS COM EPÓXI  
EM MADEIRAS DE ALTA DENSIDADE – Influência dos defeitos da madeira e  
dos erros de produção na resistência mecânica

João Miguel Santos Dias

Dissertação apresentada ao  
mestrado em Engenharia Ambiental Urbana  
como requisito parcial à obtenção do título  
de MESTRE EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL URBANA

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César

Agência Financiadora: CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico

Salvador

2015

---

**D541** Dias, João Miguel Santos.

Ligações estruturais com barras de aço coladas com epóxi em madeiras de alta densidade: influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica/ João Miguel Santos Dias. – Salvador, 2015.

217 f. : il. color.

Orientador: Prof. Sandro Fábio César.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

1. Estruturas de madeira. 2. Execução - erros. 3. Defeitos - madeira. 4. Barra colada - ligações. I. César, Sandro Fábio. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

---

CDD: 624.184



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Aldina e Carlos, não só pelo apoio ao nível emocional e financeiro, mas também pelo esforço titânico com o qual vencem diariamente a minha ausência física. A Vossa compreensão, dedicação e esforço são e serão sempre reconhecidos incondicionalmente.

A esse grande exemplo para toda a Humanidade que tem o nome de Augusto Bastos Dias, meu avô (*in memoriam*), que nunca se abstém de ajudar o próximo e de contribuir para um mundo melhor sem olhar a esforços. É o exemplo do ser humano que eleva a palavra *cidadania* ao seu expoente máximo, que melhora o nosso dia com apenas cinco minutos de conversa e que se tornou numa referência de conjugação de humildade, força de viver, busca pelo conhecimento e amor ao próximo. A tua partida repentina durante o período de correções desta dissertação não mudará o tempo verbal deste parágrafo.

À Nataly, minha namorada e incansável companheira em todos os momentos, pelo apoio incondicional, alegria, cumplicidade, suporte emocional, dedicação e compreensão pelos momentos nos quais me furtei de estar presente. Contigo partilho a minha imensa alegria na superação deste degrau nas nossas vidas.

À minha avó Clotilde de Jesus Antunes (*in memoriam*), pela meticulosidade, amor e ternura que ainda hoje são recordados com muita saudade.

Aos restantes membros da família, mesmo aqueles que já partiram.

Aos meus amigos de Portugal, Brasil e aqueles que o destino se encarregou de espalhá-los pelo planeta.

Finalmente, gostaria de dedicar este trabalho ao Prof. Dr. Sandro Fábio César pela sua magnífica orientação, contribuição científica, amizade, esforço, empenho, incentivo e companheirismo nos momentos difíceis, além da boa disposição contagiante nos momentos de descontração.

*“Eu não falhei, encontrei dez mil soluções que não davam certo.”*

*Thomas Alva Edison*

JOÃO MIGUEL SANTOS DIAS

DESEMPENHO MECÂNICO DE LIGAÇÕES ESTRUTURAIS  
COLADAS COM BARRAS DE AÇO – INFLUÊNCIA DOS  
DEFEITOS DA MADEIRA E DOS ERROS DE PRODUÇÃO.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

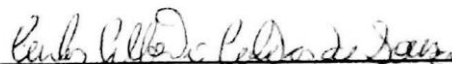
Salvador, 25 de novembro de 2015

Banca Examinadora:

Profº. Drº Sandro Fábio César  
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº Drº Carlos Alberto Caldas de Souza  
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº Drº Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG



## AGRADECIMENTOS

Às pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para elaboração desta dissertação:

- À Nataly, pela incasável ajuda na revisão final deste texto;
- Prof. Dr. Ricardo Carvalho (UFBA), pela oportunidade concedida e contribuições iniciais;
- Sr. Edenilson e Sr. Marcos (Carpintaria da EPUFBA), pela colaboração na execução dos corpos de prova;
- Sr. Adelino e Sr. Eloy (Laboratório Integrado Prof. Sílvio Loureiro da EPUFBA), pela colaboração no conserto do xilohigrômetro de contato;
- Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rita Cunha (UFBA), Prof. Msc. Adilson Arruda (UFRB), Prof. Dr. Francisco Gabriel Silva (UFBA), Prof.<sup>a</sup> Msc. Catharine Brandão (UFBA), Prof. Eng. Daniel Mota (UFBA), Prof. Eng. Luis Fernando Dias (UFBA), Prof. Eng. Gerson Fiorini (UFBA), Eng<sup>o</sup> Leonardo Ogando e Eng.<sup>a</sup> Telma Silveira pelo apoio disponibilizado;
- Prof. Angevaldo Maia (Laboratório Timoshenko da EPUFBA), pela disponibilidade, prestatividade, boa disposição e conversas durante os ensaios;
- Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Helena Cruz (LNEC – Lisboa), Prof. Dr. Alexandre Wahrhaftig (UFBA), Prof. Dr. Carlos Alberto Caldas (UFBA), Prof. Dr. Luiz Rogério Lima (UFBA), Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho (UFBA), Prof. Dr. Edgar Carrasco (UFMG) e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Iara Brandão de Oliveira (UFBA), pelas valorosas contribuições científicas;
- Aos colegas do Mestrado em engenharia Ambiental Urbana da Universidade Federal da Bahia pelo companheirismo;
- Sr<sup>a</sup> Maíra Venturoli e Sr. Paulo Venturoli, pela disponibilidade e fornecimento da madeira de Citriodora;
- Sr.<sup>a</sup> Fabiane, da Vedacit, pelo fornecimento do epóxi;
- Sr. Juscelino, da Madeireira Vitória, pelo apoio prestado através do fornecimento da madeira de Maçaranduba;
- Ao Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Universidade Federal da Bahia pelo acolhimento institucional;



- Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de mestrado.

## RESUMO

Os pontos críticos das estruturas de madeira são as suas ligações, cujos comportamentos mecânicos podem condicionar o desempenho global das edificações. As ligações com barras coladas e madeira surgem como opção válida para cumprir com requisitos tais como resistência mecânica, rigidez, durabilidade em ambientes corrosivos e estética. Apesar do início do estudo destas ligações ter sido há cerca de 40 anos, ainda não existe consenso científico em relação às influências de determinados fatores na capacidade de carga. O objetivo desta dissertação é estudar o comportamento mecânico da ligação com barra colada em madeira de alta densidade visando a aplicação estrutural, através da análise da influência da geometria da ligação, erros de execução e defeitos de crescimento e secagem da madeira. Foram realizados ensaios de tração em 96 corpos de prova compostos por barras rosqueadas de aço de médio carbono galvanizado, com diâmetro de 6,3 mm e resistência à tração de 422 MPa, coladas com epóxi em madeiras de Citriodora (*Corymbia Citriodora*) e Maçaranduba (*Manilkara spp*), com densidades básicas de 701,80 kg/m<sup>3</sup> e 962,54 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Os comprimentos de ancoragem das barras variaram entre 5,0 e 22,5 vezes o diâmetro da barra. Foram realizadas medições dos teores de umidade com xilohigrômetros de contato e de perfuração e através do ensaio de secagem em estufa. Os defeitos de execução (ângulos de inclinação das barras em relação às fibras das madeiras, bolhas de ar na linha de colagem e combustão da madeira) e os defeitos de crescimento (nós, bolsas de resina e presença de medula) e secagem (rachaduras) da madeira foram catalogados e investigados. As ligações foram submetidas a ensaios de tração em máquina universal com velocidade de ensaio de 50 N/s. Os resultados permitiram concluir: a inclinação da furação é influenciada pelo estado de conservação dos equipamentos de furação, densidade da madeira e comprimento da furação; o método de colagem interfere no aparecimento de bolhas de ar na linha de adesivo; a resistência mecânica da ligação aumenta, de forma não linear, até comprimentos de ancoragem iguais a vinte vezes o diâmetro da barra; existe uma tendência para

a redução da resistência mecânica da ligação com o aumento da inclinação do ângulo entre a barra de aço e as fibras da madeira; o teor de umidade provocou uma diminuição da resistência mecânica das ligações; as bolhas de ar encontradas nos adesivos e os pontos de combustão da madeira nos furos não provocaram decréscimos da resistência das ligações; as rachaduras da madeira contribuem para a determinação do modo de ruptura da ligação; as resistências mecânicas registradas para as ligações com Maçaranduba foram menores que os valores obtidos para Citriodora.

Palavras-chave: Estruturas de madeira, ligações coladas, erros de execução, defeitos da madeira.

HIGH DENSITY TIMBER STRUCTURAL CONNECTIONS WITH GLUED-IN  
STEEL RODS AND EPOXY – Influence of wood defects and production errors  
in the mechanical strength

**ABSTRACT**

Joints are considered to be the critical part of timber structures, due to the fact that its mechanical behaviour can severely impact on the global performance of the building. To assure mechanical strength, stiffness, durability in corrosive environments, aesthetics, among other characteristics, glued-in rods are considered to be a great option. About 40 years have passed since the first studies about glued-in rods joints, however it is still not possible to find scientific consensus about some influences in the mechanical strength of glued-in rods connections. The objective of this document is to study glued-in joints mechanical strength in hardwoods aiming structural application, by assessing influences caused by joint geometry, production errors and wood defects influences. Tensile tests were carried on 96 specimens made of galvanized steel threaded rods with 6,3 mm diameter and 422 MPa tensile strength glued with epoxy in Maçaranduba (*Manilkara spp*) and Citriodora (*Corymbia Citriodora*). Timber basic densities were 701,80 kg/m<sup>3</sup> for Citriodora and 962,54 kg/m<sup>3</sup> for Maçaranduba. Glued-in in lengths varied between 5,0 and 22,5 times the rod diameter. Three methods were taken to evaluate moisture content: contact, spiking and timber drying in a lumber kiln. Production errors (grain-to-bar angles, air bubbles in the adhesive layer and timber burning) and wood defects (knots, resin pockets, drying cracks and pith presence) were registered and assessed. 50 N/s force application rate tensile tests were carried. Results allowed to conclude: drilling deviation was influenced by drilling equipments maintenance conditions, timber density and drilling length; the presence of air bubbles in adhesive layer was influenced by bounding method; joint mechanical strength increases until 20 times rod diameter anchoring length non-linearly; mechanical strength reduction was detected caused by increasing grain-to-bar

values; air bubbles in the adhesive layer and timber burning spots in drilled holes did not influenced joint mechanical strength; timber cracks influenced failure modes; Maçaranduba joints showed less mechanical strength in comparison with Citriodora connections.

Keywords: Timber structures, glued joints, production erros, wood defects

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>v</b>
<b>BANCA EXAMINADORA .....</b>	Erro! Indicador não definido.
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xii</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS .....</b>	<b>xx</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS.....</b>	<b>xxiv</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>xxv</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xxviii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Objetivos .....	15
1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	15
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	15
1.3 Delimitação.....	16
1.4 Estrutura da dissertação.....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1 Teoria .....	21
2.2 Modos de fratura e de ruptura .....	24
2.3 Ensaios e corpos de prova .....	26
2.4 Bloco de madeira .....	29
2.4.1 <i>Densidade</i> .....	29
2.4.2 <i>Geometria</i> .....	31
2.4.3 <i>Defeitos da madeira e erros de produção</i> .....	33
2.4.4 <i>Temperatura e teor de umidade</i> .....	34
2.5 Adesivo.....	36
2.5.1 <i>Materiais</i> .....	37

2.5.2	<i>Características mecânicas</i> .....	38
2.5.3	<i>Geometria</i> .....	39
2.5.4	<i>Defeitos na produção</i> .....	41
2.5.5	<i>Temperatura e teor de umidade</i> .....	43
2.6	Barra.....	44
2.6.1	<i>Materiais</i> .....	44
2.6.2	<i>Superfícies</i> .....	45
2.6.3	<i>Características mecânicas</i> .....	47
2.6.4	<i>Geometria</i> .....	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>54</b>
3.1	Materiais e geometria dos CP .....	54
3.2	Ensaio preliminares .....	58
3.3	Estocagem, 1ª medição da umidade, corte e furação das madeiras.....	58
3.4	Preparação e inserção do adesivo .....	63
3.5	Processamento e inserção das barras .....	65
3.6	Defeitos externos dos CPs .....	67
3.7	2ª medição da umidade e ensaio das ligações .....	69
3.8	Defeitos internos e 3ª medição da umidade .....	70
3.9	4ª e 5ª medições da umidade e densidades aparente e básica .....	72
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>75</b>
4.1	Características físico-mecânicas das madeiras .....	75
4.1.1	<i>Teores de umidade</i> .....	75
4.1.2	<i>Densidades básicas</i> .....	83
4.1.3	<i>Densidades aparentes</i> .....	84
4.1.4	<i>Caracterização mecânica</i> .....	87
4.1.5	<i>Defeitos de crescimento e de secagem da madeira</i> .....	90
4.1.6	<i>Considerações</i> .....	93
4.2	Erros de execução .....	94

4.2.1	<i>Ângulos de inclinação</i> .....	94
4.2.2	<i>Combustão da madeira</i> .....	100
4.2.3	<i>Defeitos de colagem</i> .....	101
4.2.4	<i>Considerações</i> .....	104
4.3	Resistências mecânicas das ligações .....	104
4.3.1	<i>Influência do comprimento de ancoragem</i> .....	107
4.3.2	<i>Influência dos defeitos de colagem</i> .....	110
4.3.3	<i>Influência da combustão da madeira</i> .....	112
4.3.4	<i>Influência dos ângulos de inclinação</i> .....	113
4.3.5	<i>Influência dos defeitos da madeira</i> .....	115
4.3.6	<i>Influência da densidade da madeira</i> .....	117
4.3.7	<i>Influência do teor de umidade da madeira</i> .....	118
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>120</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>123</b>
	<b>ANEXOS – GRÁFICOS</b> .....	<b>137</b>
	<b>ANEXOS – QUADROS</b> .....	<b>159</b>
	<b>ANEXOS – TABELAS</b> .....	<b>170</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos de madeira e de aço pós-incendio (Ritter, 1990). .....	8
Figura 2. Tipos de ligações em estruturas de madeira (Fonte: O autor). .....	10
Figura 3. Ligação mecânica pregada (ABNT, 1997). .....	10
Figura 4. Ligação mecânica parafusada (ABNT, 1997). .....	10
Figura 5. Ligação mecânica com pino de madeira (ABNT, 1997). .....	10
Figura 6. Ligação mecânica com anel metálico (ABNT, 1997). .....	10
Figura 7. Ligação mecânica com chapa com dentes (ABNT, 1997). .....	11
Figura 8. Ligação colada entalhada (Integrated Publishing, 2015). .....	11
Figura 9. Ligação colada denteada (TRADA, 2015). .....	11
Figura 10. Ligação colada sobreposta (Basic Carpentry Techniques, 2015)...	12
Figura 11. Ligação colada alma-mesa (TRADA, 2015). .....	12
Figura 12. Ligação com barra colada (TRADA, 2015). .....	12
Figura 13. Diagrama da distribuição de $\tau m$ (Fonte: O autor). .....	23
Figura 14. Mecanismo de transferência de esforços (Fonte: O autor). .....	23
Figura 15. Detalhe A da Figura 14 (Fonte: O autor). .....	24
Figura 16. Modos de ruptura (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). .....	25
Figura 17. Tração axial (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). .....	27
Figura 18. Tração-compressão (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). .....	27
Figura 19. Compressão axial (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2008). .....	27
Figura 20. Colagem horizontal (Fonte: O autor). .....	29
Figura 21. Variáveis geométricas (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009). .....	31
Figura 22. Variáveis geométricas (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011)...	32
Figura 23. Exemplo de identificação dos CP (Fonte: O autor). .....	57

Figura 24. Precipitação no período de ensaio (Adaptado de: INMET, 2015a).	59
Figura 25. Estocagem da madeira de Maçaranduba (Fonte: O autor).	60
Figura 26. Medição da umidade do CP (Fonte: O autor).	60
Figura 27. Xilohigrômetro de contato (Fonte: O autor).	60
Figura 28. Placa do xilohigrômetro de contato (Fonte: O autor).	61
Figura 29. Furação dos blocos de madeira (Fonte: O autor).	62
Figura 30. Blocos de madeira inutilizados (Fonte: O autor).	62
Figura 31. Limpeza do furo da madeira (Fonte: O autor).	62
Figura 32. Mistura dos componentes do epóxi (Fonte: O autor).	63
Figura 33. Sistema de bombeamento do adesivo (Fonte: O autor).	64
Figura 34. Sucção do epóxi (Fonte: O autor).	64
Figura 35. Injeção do epóxi no furo (Fonte: O autor).	65
Figura 36. Limpeza do sistema de bombeamento (Fonte: O autor).	65
Figura 37. Extremidades das barras após o corte (Fonte: O autor).	66
Figura 38. Desbaste das pontas das barras (Fonte: O autor).	66
Figura 39. Oxidação nas pontas das barras (Fonte: O autor).	66
Figura 40. Remoção do excesso de epóxi (Fonte: O autor).	67
Figura 41. Cura do adesivo no suporte (Fonte: O autor).	67
Figura 42. Sistema de referência dos CP (Fonte: O autor).	68
Figura 43. Medição de $\theta$ do CP M8-4 - visão geral (Fonte: O autor).	68
Figura 44. Medição de $\theta$ do CP M6-1 - visão aproximada (Fonte: O autor).	68
Figura 45. Medição de $\theta$ no <i>software Measure</i> (Fonte: O autor).	68
Figura 46. Ensaio de tração em CP (Fonte: O autor).	69
Figura 47. Dobramento da barra do CP (Fonte: O autor).	69
Figura 48. Abertura das extremidades dos CPs (Fonte: O autor).	71

Figura 49. Registro fotográfico de defeitos de colagem (Fonte: O autor).....	71
Figura 50. Medição da umidade junto à linha de colagem (Fonte: O autor).....	72
Figura 51. Dimensões dos CPs para $\rho_{bás}$ e $U_{estufa}$ (ABNT, 1997).....	73
Figura 52. Saturação dos CPs em água (Fonte: O autor).....	74
Figura 53. Nó em CP de Citriodora (Fonte: O autor).....	91
Figura 54. Bolsa de resina em CP de Citriodora (Fonte: O autor).....	91
Figura 55. Medula em CP de Citriodora (Fonte: O autor). ....	91
Figura 56. Rachadura em CP de Maçaranduba (Fonte: O autor). ....	91
Figura 57. Combustão pontual na linha de colagem (Fonte: O autor).....	101
Figura 58. Registro fotográfico de defeitos de colagem (Fonte: O autor).....	102
Figura 59. Cisalhamento da madeira em CP sem defeitos (Fonte: O autor)..	106
Figura 60. Cisalhamento da madeira em CP com defeito (Fonte: O autor). ..	106
Figura 61. Ruptura por escoamento da barra (Fonte: O autor).....	106
Figura 62. Variação da rachadura do CP M1-5 (Fonte: O autor). ....	116

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. $DEFE_i$ dos materiais estruturais.....	6
Gráfico 2. $\sigma$ x $\epsilon$ da MFEP (Adaptado de Bueno e Bittencourt, 2015). ....	22
Gráfico 3. $\rho_{bás}$ de citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O Autor). ....	84
Gráfico 4. $\rho_{ap}$ de citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O Autor).....	86
Gráfico 5. Quantidade de nós x $L$ (Fonte: O autor). ....	92
Gráfico 6. Distribuição de $\theta$ da Citriodora e Maçaranduba (Fonte: O autor). ...	95
Gráfico 7. $\theta$ x $\rho_{ap}$ sem <i>outliers</i> – Citriodora (Fonte: O autor).....	96
Gráfico 8. $\theta$ x $\rho_{ap}$ sem <i>outliers</i> – Maçaranduba (Fonte: O autor).....	96
Gráfico 9. $\theta$ x $L$ – Citriodora (Fonte: O autor).....	97
Gráfico 10. $\theta$ x $L$ – Maçaranduba (Fonte: O autor).....	98
Gráfico 11. $\theta$ x $U_{estufa}$ - Citriodora (Fonte: O autor).....	99
Gráfico 12. $\theta$ x $U_{estufa}$ - Maçaranduba (Fonte: O autor). ....	99
Gráfico 13. Plotagem de resíduos - Citriodora (Fonte: O autor).....	99
Gráfico 14. Plotagem de resíduos - Maçaranduba (Fonte: O autor). ....	100
Gráfico 15. Variação de $F_{rupt,média}$ , $F_{rupt,k}$ com $L$ (Fonte: O autor). ....	107
Gráfico 16. $F_{rupt,média}$ de Citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O autor).....	117
Gráfico 17. $F_{rupt}$ x $U_{estufa}$ (Fonte: O autor). ....	118
Gráfico A - 1. Carga x extensão da série E1-x. (Fonte: O autor).....	137
Gráfico A - 2. Carga x extensão da série E2-x. (Fonte: O autor).....	137
Gráfico A - 3. Carga x extensão da série E3-x. (Fonte: O autor).....	138
Gráfico A - 4. Carga x extensão da série E4-x. (Fonte: O autor).....	138
Gráfico A - 5. Carga x extensão da série E5-x. (Fonte: O autor).....	138

Gráfico A - 6. Carga x extensão da série E6-x. (Fonte: O autor).....	139
Gráfico A - 7. Carga x extensão da série E7-x. (Fonte: O autor).....	139
Gráfico A - 8. Carga x extensão da série E8-x. (Fonte: O autor).....	139
Gráfico A - 9. Carga x extensão da série M1-x. (Fonte: O autor). ....	140
Gráfico A - 10. Carga x extensão da série M2-x. (Fonte: O autor).....	140
Gráfico A - 11. Carga x extensão da série M3-x. (Fonte: O autor).....	140
Gráfico A - 12. Carga x extensão da série M4-x. (Fonte: O autor).....	141
Gráfico A - 13. Carga x extensão da série M5-x. (Fonte: O autor).....	141
Gráfico A - 14. Carga x extensão da série M6-x. (Fonte: O autor).....	141
Gráfico A - 15. Carga x extensão da série M7-x. (Fonte: O autor).....	142
Gráfico A - 16. Carga x extensão da série M8-x. (Fonte: O autor).....	142
Gráfico A - 17. L. de tendência polinomial – Citriodora (Fonte: O autor).....	143
Gráfico A - 18. L. de tendência polinomial – Maçaranduba (Fonte: O autor).	143
Gráfico A - 19. L. de tendência polinomial – Citriodora (Fonte: O autor).....	144
Gráfico A - 20. L. de tendência polinomial – Maçaranduba (Fonte: O autor).	144
Gráfico A - 21. Linha de tendência linear – Citriodora (Fonte: O autor). ....	145
Gráfico A - 22. Linha de tendência linear – Maçaranduba (Fonte: O autor)...	145
Gráfico A - 23. Linha de tendência linear – Citriodora (Fonte: O autor). ....	146
Gráfico A - 24. Linha de tendência linear – Maçaranduba (Fonte: O autor)...	146
Gráfico A - 25. L. de tendência logarítmica – Citriodora (Fonte: O autor). ....	147
Gráfico A - 26. L. de tendência logarítmica – Maçaranduba (Fonte: O autor).	147
Gráfico A - 27. L. de tendência logarítmica – Citriodora (Fonte: O autor). ....	148
Gráfico A - 28 L. de tendência logarítmica – Maçaranduba (Fonte: O autor).	148
Gráfico A - 29. L. de tendência potência – Citriodora (Fonte: O autor). ....	149
Gráfico A - 30. L. de tendência potência – Maçaranduba (Fonte: O autor)....	149

Gráfico A - 31. Linha de tendência potência – Citriodora (Fonte: O autor). ...	150
Gráfico A - 32. L. de tendência potência – Maçaranduba (Fonte: O autor). ...	150
Gráfico A - 33. L. de tendência exponencial – Citriodora (Fonte: O autor). ....	151
Gráfico A - 34. L. tendência exponencial – Maçaranduba (Fonte: O autor). ...	151
Gráfico A - 35. L. de tendência exponencial – Citriodora (Fonte: O autor). ....	152
Gráfico A - 36. L. tendência exponencial – Maçaranduba (Fonte: O autor). ...	152
Gráfico A - 37. $F_{rupt} \times \theta$ da série E1-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 38. $F_{rupt} \times \theta$ da série E2-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 39. $F_{rupt} \times \theta$ da série E3-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 40. $F_{rupt} \times \theta$ da série E4-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 41. $F_{rupt} \times \theta$ da série E5-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 42. $F_{rupt} \times \theta$ da série E6-x (Fonte: O autor). .....	153
Gráfico A - 43. $F_{rupt} \times \theta$ da série E7-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 44. $F_{rupt} \times \theta$ da série E8-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 45. $F_{rupt} \times \theta$ da série M2-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 46. $F_{rupt} \times \theta$ da série M3-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 47. $F_{rupt} \times \theta$ da série M4-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 48. $F_{rupt} \times \theta$ da série M5-x (Fonte: O autor). .....	154
Gráfico A - 49. $F_{rupt} \times \theta$ da série M6-x (Fonte: O autor). .....	155
Gráfico A - 50. $F_{rupt} \times \theta$ da série M7-x (Fonte: O autor). .....	155
Gráfico A - 51. $F_{rupt} \times \theta$ da série M8-x (Fonte: O autor). .....	155
Gráfico A - 52. $F_{rupt} \times U_{estufa}$ de E3-x e E4-x (Fonte: O autor). .....	156
Gráfico A - 53. $F_{rupt} \times U_{estufa}$ de E5-x e E6-x (Fonte: O autor). .....	156
Gráfico A - 54. $F_{rupt} \times U_{estufa}$ de E7-x e E8-x (Fonte: O autor). .....	157
Gráfico A - 55. $F_{rupt} \times U_{estufa}$ de M3-x e M4-x (Fonte: O autor). .....	157

Gráfico A - 56.  $F_{rupt} \times U_{estufa}$  de M5-x e M6-x (Fonte: O autor)..... 158

Gráfico A - 57.  $F_{rupt} \times U_{estufa}$  de M7-x e M8-x (Fonte: O autor)..... 158

## ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1. $\rho$ , $f_{ck}$ , $f_{tk}$ , $f_{cd}$ e $f_{td}$ dos materiais estruturais.....	3
Quadro 2. Classes de resistência de barras de aço rosqueado.....	48
Quadro 3. Resumo dos valores limites de $L$ . ....	53
Quadro 4. Geometria e nomenclaturas dos CPs.....	58
Quadro 5. Linhas de tendência para $F_{rupt}$ , $F_{rupt,média}$ e $L$ – Citriodora.....	109
Quadro 6. Linhas de tendência para $F_{rupt}$ e $L$ – Maçaranduba.....	109
Quadro 7. Comparação com CPs com vestígios de combustão.....	112
Quadro 8. Rupturas e defeitos da madeira nos CPs (E1-x, M1-x e M2-x). ....	115
Quadro 9. Coef. de Pearson entre $U_{estufa}$ e $F_{rupt}$ .....	118
Quadro A - 1. Nós dos CPs.....	159
Quadro A - 2. Nós dos CPs (continuação). ....	160
Quadro A - 3. Nós dos CPs (continuação). ....	161
Quadro A - 4. Nós dos CPs (continuação). ....	162
Quadro A - 5. Rachaduras dos CPs.....	163
Quadro A - 6. Rachaduras dos CPs (continuação). ....	164
Quadro A - 7. Rachaduras dos CPs (continuação). ....	165
Quadro A - 8. Medula e bolsas de resina dos CPs. ....	166
Quadro A - 9. Medula e bolsas de resina dos CPs (continuação).....	167
Quadro A - 10. Medula e bolsas de resina dos CPs (continuação).....	168
Quadro A - 11. Erros de colagem e vestígios de madeira queimada.....	169



## ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Emissões de carbono.....	2
Tabela 2. Custos médios para o estado da Bahia, BA.....	4
Tabela 3. Resumo das espessuras mínimas e máximas dos adesivos .....	40
Tabela 4. Intervalos de tempo e valores médios de $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ , $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ .....	75
Tabela 5. Valores médios das medições de $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ e $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ .....	76
Tabela 6. Valores médios das medições de $U_{\text{estufa}}$ .....	77
Tabela 7. Teores de umidade médios obtidos pelos três métodos. ....	77
Tabela 8. Teste <i>t-Student</i> para as umidades de contato para Citriodora. ....	78
Tabela 9. Teste <i>t-Student</i> para as umidades de contato para Maçaranduba... ..	78
Tabela 10. Valores médios de $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ e $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ .....	79
Tabela 11. Teste <i>t-Student</i> para medições com xilohigrômetro de perfuração. ....	80
Tabela 12. Teste <i>t-Student</i> para comparação dos métodos – Citriodora. ....	80
Tabela 13. Teste <i>t-Student</i> para comparação dos métodos – Maçaranduba... ..	81
Tabela 14. Valores médios de $\rho_{\text{bás}}$ .....	83
Tabela 15. Valores médios de $\rho_{\text{ap}}$ segundo a Equação (4).....	85
Tabela 16. Valores médios de $\rho_{\text{ap}}$ segundo a Equação (5).....	86
Tabela 17. Valores da NBR 7190 para $f_{\text{c0}}$ , $f_{\text{t0}}$ e $f_{\text{v0}}$ .....	87
Tabela 18. Relações entre $f_{\text{c0}}$ , $f_{\text{t0}}$ e $f_{\text{v0}}$ com $\rho_{\text{ap}}$ .....	88
Tabela 19. $f_{\text{c0,k}}$ , $f_{\text{t0,k}}$ e $f_{\text{v0,k}}$ calculados segundo DIAS e LAHR (2004).....	88
Tabela 20. $f_{\text{c0,k}}$ , $f_{\text{t0,k}}$ e $f_{\text{v0,k}}$ segundo DIAS e LAHR (2004) e NBR 7190. ....	89
Tabela 21. $f_{\text{c0,k}}$ , $f_{\text{t0,k}}$ e $f_{\text{v0,k}}$ corrigidos para $U = 12\%$ . ....	89
Tabela 22. Número de defeitos nos blocos de madeira dos CPs.....	91
Tabela 23. Relação entre $L$ e a quantidade de defeitos.....	92

Tabela 24. Propriedades físico-mecânicas das madeiras utilizadas.....	94
Tabela 25. Quantidade de CPs com bolhas de ar na linha de colagem.....	103
Tabela 26. Forças de ruptura média, característica e de cálculo.....	104
Tabela 27. $F_{rupt}$ com e sem defeitos de colagem. ....	111
Tabela 28. Testes <i>t-Student</i> para efeitos dos erros de colagem em $F_{rupt}$ .....	111
Tabela 29. Teste <i>t-Student</i> para influência da combustão da madeira. ....	113
Tabela A - 1. Valores das medições de $U_{colagem}^{contato}$ .....	170
Tabela A - 2. Valores das medições de $U_{colagem}^{contato}$ (continuação).....	171
Tabela A - 3. Valores das medições de $U_{colagem}^{contato}$ (continuação).....	172
Tabela A - 4. Valores das medições de $U_{ensaio}^{contato}$ .....	173
Tabela A - 5. Valores das medições de $U_{ensaio}^{contato}$ (continuação).....	174
Tabela A - 6. Valores das medições de $U_{ensaio}^{contato}$ (continuação).....	175
Tabela A - 7. Valores das medições de $U_{pré-estufa}^{contato}$ .....	176
Tabela A - 8. Valores das medições de $U_{pré-estufa}^{contato}$ (continuação).....	177
Tabela A - 9. Valores das medições de $U_{pré-estufa}^{contato}$ (continuação).....	178
Tabela A - 10. Valores de $\rho_{bás}$ .....	179
Tabela A - 11. $\rho_{ap}$ segundo a equação (4). ....	180
Tabela A - 12. $\rho_{ap}$ segundo a equação (5). ....	181
Tabela A - 12. Valores das medições de $\theta$ . ....	182
Tabela A - 13. Valores das medições de $\theta$ (continuação).....	183
Tabela A - 14. Valores das medições de $\theta$ (continuação).....	184
Tabela A - 15. $F_{rupt}$ das ligações coladas com barras de aço.....	185
Tabela A - 16. $F_{rupt}$ das ligações coladas com barras de aço (continuação)..	186

Tabela A - 17. $F_{rupt}$ das ligações coladas com barras de aço (continuação)..	187
Tabela A - 18. Linhas de tendência dos gráficos $F_{rupt} - \theta$ .....	188

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\theta$	Ângulo de inclinação entre a barra e as fibras da madeira
$\lambda$	Esbeltez da ligação
$\rho_{ap}$	Densidade aparente
$\rho_{bás}$	Densidade básica
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão
$a_1$	Distância entre os eixos das barras
$a_2$	Distância entre o eixo da barra e a borda do bloco de madeira em ligações com múltiplas barras
$b$	Distância entre o eixo da barra e a borda do bloco de madeira
CCA	Arseniato de cobre cromatado (do inglês: <i>Chromated Copper Arsenate</i> )
CFRP	Plástico Reforçado com Fibras de Carbono (do inglês: <i>Carbon Fibre Reinforced Plastic</i> )
CP(s)	Corpo(s) de Prova(s)
$d$	Diâmetro da barra
$D$	Diâmetro do furo
EPX	Epóxi
$F_{rupt}$	Força de ruptura
$F_{rupt,média}$	Força de ruptura média
$F_{rupt,k}$	Força de ruptura característica
$f_{ck}$	Resistência à compressão característica
$f_{tk}$	Resistência à tração característica
$f_y$	Tensão limite de escoamento
GFRP	Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (do inglês: <i>Glass Fibre Reinforced Plastic</i> )
$L$	Comprimento de ancoragem/embutimento da barra
$L_i$	Comprimento entre extremidades embutidas das barras
$L_e$	Comprimento exterior das barras
LVL	Madeira Fina Laminada Colada (do inglês: <i>Laminated Veneer Lumber</i> )

MFLE	Mecânica de Fratura Linear Elástica
MFEP	Mecânica de Fratura Elasto-plástica
MLC	Madeira Laminada Colada
MEF	Método dos elementos finitos
PUR	Poliuretana
PRF	Fenol-resorcinol-formoldeído
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
TEC	Porcentagem Coeficiente de expansão térmica (do inglês: <i>Thermal Expansion Coefficient</i> )
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea
U	Teor de umidade
U <sub>contato colagem</sub>	Teor de umidade medido com o xilohigrômetro de contato no momento da colagem das barras
U <sub>contato ensaio</sub>	Teor de umidade medido com o xilohigrômetro de contato no momento do ensaio de tração em máquina universal
U <sub>contato pré-estufa</sub>	Teor de umidade medido com o xilohigrômetro de contato no momento imediatamente anterior à introdução do CP na estufa
U <sub>perfuração exterior</sub>	Teor de umidade medido com o xilohigrômetro de perfuração medido através da cravação na parte externa do CP
U <sub>perfuração interior</sub>	Teor de umidade medido com o xilohigrômetro de perfuração medido através da cravação na parte interna do CP
U <sub>estufa</sub>	Teor de umidade medido através do ensaio de secagem em estufa
UFBA	Universidade Federal da Bahia

## 1 INTRODUÇÃO

O emprego da madeira na construção tem acompanhado a humanidade ao longo da sua história, sendo atualmente considerada como uma opção bastante vantajosa quando incorporada em edificações, atendendo à sua capacidade de conjugar diversas características, por exemplo: peso próprio reduzido, resistência mecânica compatível com solicitações estruturais estáticas e dinâmicas, bom comportamento em situação de incêndio, resistência à corrosão em ambientes marinhos, bom isolamento térmico, fácil processamento, rapidez de execução, capacidade de proporcionar conforto visual e agregar sustentabilidade ambiental à construção.

O caráter sustentável das construções ganha especial ênfase com o aumento da preocupação internacional em relação à redução dos impactos causados pela ocupação humana no meio ambiente global. Neste âmbito, a madeira assume um papel preponderante na integração da questão da sustentabilidade ambiental na construção por ser um recurso renovável, possuir uma cadeia produtiva com menos impactos ambientais e por seus subprodutos poderem ser aproveitados para outros fins.

Devido às suas características físicas, mecânicas e químicas, a madeira é um material bastante utilizado para fins estruturais. Um dos motivos pelos quais a incorporação da madeira em estruturas de edificações se distingue das aplicações de materiais convencionais, nomeadamente o concreto e o aço, são as emissões de carbono para a atmosfera durante o processo produtivo (Falk, 2010).

Na Tabela 1 é possível visualizar os dados referentes às emissões de carbono para a atmosfera das cadeias produtivas dos materiais de construção de aplicação em estruturas de edificações. É possível constatar que o concreto e o aço virgem emitem para a atmosfera cerca de 8 e 21 vezes mais carbono que a madeira serrada, respectivamente. Este fato se deve à grande quantidade de energia necessária durante a extração, processamento e transporte desde a matéria prima até ao produto final, o que aumenta os custos ambientais.

Tabela 1. Emissões de carbono.

<b>Material</b>	<b>Quantidade estimada de carbono emitido (kN C/ton)</b>	<b>Comparação com as emissões da madeira serrada<sup>1</sup></b>
Madeira serrada	0,33	1,00
Bloco cerâmico vazado	0,88	2,67
Vidro	1,54	4,67
Aço reciclado	2,20	6,67
Concreto	2,65	8,03
Bloco de concreto	2,91	8,82
Aço virgem	6,94	21,03
Plástico	25,02	75,82
Alumínio	45,32	137,33

Adaptado de: (Falk, 2010)

No Quadro 1 estão apresentadas as densidades<sup>2</sup> ( $\rho$ ), as resistências mecânicas características à compressão e a tração ( $f_{ck}$  e  $f_{tk}$ , respectivamente) e os valores de projeto das resistências mecânicas à compressão e a tração ( $f_{cd}$  e  $f_{td}$ , respectivamente) dos oito materiais referenciados na Tabela 1. É possível verificar que a madeira apresenta o menor valor de  $\rho$  (de 5,0 até 11,43 kg/m<sup>3</sup>), sendo que o aço possui o maior valor (78,50 kg/m<sup>3</sup>). O material que apresenta menor valor de  $f_{cd}$  é o bloco estrutural cerâmico (de 2,3 MPa até 4,6 MPa), enquanto que o vidro apresenta o maior valor (de 536,0 MPa até 781,3 MPa). O aço é o material que apresenta maior valor de  $f_{td}$  (de 363,6 Mpa até 472,7 MPa), sendo que o bloco estrutural cerâmicos, o bloco de concreto e o concreto simples não apresentam resistência em relação a essa solicitação.

<sup>1</sup> Calculado através da divisão da quantidade de emissões de carbono de cada material pelo valor obtido para a madeira serrada (0,33 kN C/ton).

<sup>2</sup> Segundo a NBR 7190, a densidade da madeira é equivalente à massa específica convencional.

Quadro 1.  $\rho$ ,  $f_{ck}$ ,  $f_{tk}$ ,  $f_{cd}$  e  $f_{td}$  dos materiais estruturais.

Material	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{tk}$ (MPa)	$f_{cd}$ (MPa)	$f_{td}$ (MPa)
Madeira serrada <sup>3 a)</sup>	De 5,0 até 11,4	De 93,3 até 31,5	De 157,5 até 58,1	De 8,6 até 25,6	De 12,4 até 33,6
Bloco estrutural cerâmico <sup>b,c,d)</sup>	13,0	De 3,0 até 6,0	0,5	De 2,3 até 4,6	0,4
Vidro estrutural <sup>f,e,g)</sup>	25,0	De 800 até 1000	De 27,0 até 62,0	De 536,0 até 781,3	De 18,1 até 48,0
Concreto simples <sup>b,g,h,i)</sup>	24,0	De 20,0 até 80,0	0,0	De 14,3 até 57,1	0,00
Bloco de concreto <sup>j,k)</sup>	14,0	De 14,0 até 16,0	0,0	De 3,5 até 12,3	0,00
Aço estrutural <sup>b,l,m)</sup>	78,5	De 400,0 até 520,0	De 400,0 até 520,0	De 363,6 até 472,7	De 363,6 até 472,7
Epóxi <sup>b,n,o)</sup>	18,0	69,0	69,0	De 16,6 até 53,1	De 16,6 até 53,1
Alumínio <sup>p,q,r)</sup>	27,0	De 115,0 até 595,0	De 115,0 até 595,0	De 69,7 até 468,8	De 69,7 até 468,8

Fontes: a) PFEIL e PFEIL (2003); b) ABNT (1980); c) ABNT (2010a); d) ABNT (2010b); e) ROYMECH (2015); f) SAINT GOBAIN (2015); g) UNGUREANU (2014); h) ABNT (2014); i) ABNT (1992); j) ABNT (2011); k) ABNT (2007); l) ABNT (2008); m) ABNT (2002); n) VEDACIT (2015); o) FIBERLINE (2003); p) ABNT (2005); q) ALUMINIUM ASSOCIATION (1994); r) CEN (1999).

<sup>3</sup> Consideraram-se os valores de PFEIL e PFEIL (2003) para os valores máximos e mínimos de  $\rho_{ap}$  (Maçaranduba – *Manilkara spp* – e Cedro Doce – *Cedrella spp*),  $f_{ck}$  (Jatobá – *Hymenaceae spp* – e Cedro Doce) e  $f_{tk}$  (Jatobá e Cedro Amargo – *Cedrella odorata*). Para os valores máximos e mínimos de  $f_{ck}/\rho_{ap}$  foram utilizadas as propriedades físicas e mecânicas de Eucalipto Dunnii (*Eucalyptus dunnii*) e Catiúba (*Goupia glabra*), respectivamente. No caso dos valores máximos e mínimos de  $f_{tk}/\rho_{ap}$ , recorreu-se aos valores respeitantes à Oiticica Amarela (*Clarisia racemosa*) e Eucalipto Umbra (*Eucalyptus Umbra*), respectivamente. Para a obtenção de  $f_{cd}$  e  $f_{td}$ , foram adotados os critérios da norma NBR 7190 para madeira serrada de segunda categoria na cidade de Salvador.



A Tabela 2 apresenta os custos dos materiais provenientes da tabela do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) para o estado da Bahia, em relação ao mês de Outubro de 2015. Os custos de todos os materiais foram calculados para uma unidade de medida comum ( $m^3$ ), tendo sido obtidos os valores máximos e mínimos presentes na tabela SINAPI para cada material<sup>4</sup>. É possível verificar que o material mais barato é o bloco estrutural cerâmico (de R\$152,0/ $m^3$  a R\$157,3/ $m^3$ ) e o mais caro é o alumínio (R\$82108,0/ $m^3$ ).

Tabela 2. Custos médios para o estado da Bahia, BA.

<b>Material</b>	<b>Custo (R\$/<math>m^3</math>)</b>
Madeira serrada	De 596,7 até 3477,3
Bloco estrutural cerâmico	De 152,0 até 157,3
Vidro	De 25458,0 até 32626,0
Concreto simples	De 279,4 até 855,3
Bloco de concreto	De 217,5 até 338,7
Aço estrutural	De 35639,0 até 36031,5
Epóxi	70668,0
Alumínio	82108,0

Adaptado de: (CEF, 2015)

A escolha de um material deve ter em consideração não só as questões econômicas e as características físico-mecânicas (densidade e resistência) dos materiais, mas também a sustentabilidade ambiental. A análise destas características deverá ser realizada de forma simultânea, uma vez que estes detalhes não são indissociáveis durante a vida útil do material. A Equação (1)

<sup>4</sup> **Madeira:** “madeira nativa/regional serrada aparelhada” e “madeira pinho serrada 3ª qualidade não aparelhada”; **Bloco estrutural cerâmico:** “bloco estrutural cerâmico 19x19x39cm (6 MPa)” e “bloco estrutural cerâmico 14x19x29cm (4 MPa)”; **Vidro:** “vidro temperado incolor e=6 mm (s/coloração)” e “vidro temperado verde e=10 mm (s/coloração)”; **Concreto simples:** “concreto usinado bombeavel, classe de resistencia C20, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, exclui servico de bombeamento” e “concreto usinado bombeavel, classe de resistencia C80, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, exclui servico de bombeamento”; **Bloco concreto:** “bloco concreto estrutural 14X19X29 cm,  $f_{bk}$  4,5 MPa” e “bloco concreto estrutural 19X19X39 cm,  $f_{bk}$  16 MPa”; **Aço estrutural:** “Perfil aço estrutural I, 10” x 4 5/8” (qualquer espessura)” e “perfil laminado aço estrutural U, 6” x 2” (qualquer espessura)”; **Epóxi:** “adesivo estrutural base epóxi”; **Alumínio:** “Perfil alumínio anodizado”.

apresenta a Demanda Ecológico-Financeira Estrutural (DEFE), segundo uma característica mecânica  $i$ , sendo expresso em (kN C/ton.R\$.m<sup>-4</sup>). Para o cálculo deste indicador, são consideradas: as emissões de carbono para a atmosfera durante o seu processo produtivo, expressas em kN C por cada tonelada de material produzido; o custo do material por cada m<sup>3</sup>; a densidade do material (kg/m<sup>3</sup>); a resistência mecânica de cálculo do material segundo uma determinada solicitação (kN/m<sup>2</sup>).

$$DEFE_i = \frac{\text{Emissões de carbono} \times \text{Custo por m}^3 \times \rho}{f_i} \quad (1)$$

O Gráfico 1 apresenta os valores máximos e mínimos de DEFE para as solicitações à compressão e tração da madeira serrada, vidro, aço estrutural, alumínio e epóxi, calculados com os dados presentes nas Tabelas 1 e 2 e Quadro 1. Os valores de DEFE<sub>*i*</sub> dos blocos estruturais cerâmicos, dos blocos estruturais de concreto e do concreto simples não foram incluídos no Gráfico 1, uma vez que estes materiais não apresentam resistência mecânica à tração.

É possível constatar que a madeira serrada apresenta valores de DEFE mais baixos quando são analisadas as solicitações à compressão e à tração. Por conseguinte, a madeira como material estrutural é a opção que apresenta os menores encargos ecológicos e financeiros para cumprir determinadas funções estruturais. Por outro lado, os materiais que apresentam maiores valores de DEFE<sub>*i*</sub> são o alumínio e o epóxi.

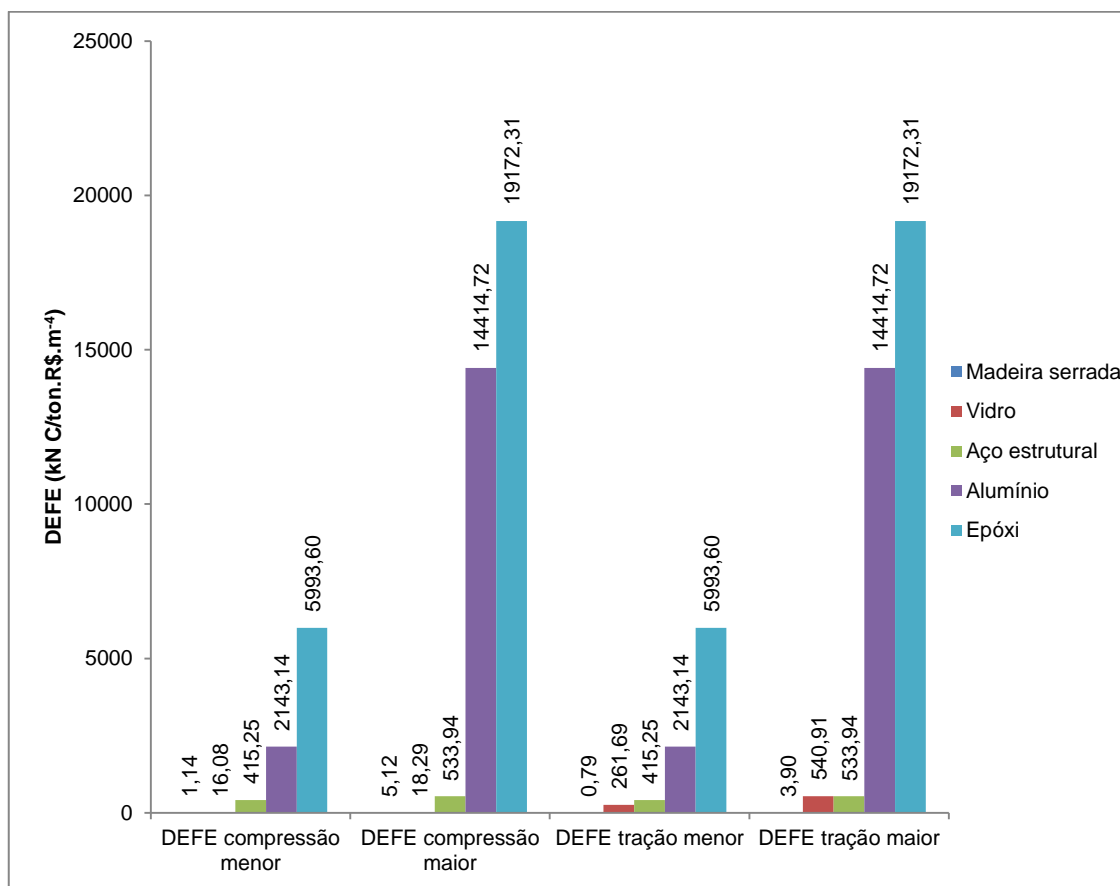


Gráfico 1. DEFE, dos materiais estruturais.

Um aspecto que também deve ser considerado durante as fases de concepção, execução e utilização de um empreendimento, é a sua durabilidade. ISAKSSON e THELANDERSSON (2013) definem durabilidade como sendo a capacidade de responder às solicitações previstas em projeto, durante o seu tempo de vida útil, quando sujeita a mecanismos de degradação. Quanto maior for a durabilidade, menor será a frequência das intervenções de manutenção nos elementos estruturais e, conseqüentemente, ocorrerá uma redução dos custos. Em locais com proximidade ao mar e sujeitos a temperaturas e umidades médias anuais elevadas (Portella *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2014; Wahrhaftig *et al.*, 2014), a corrosão de elementos metálicos é mais intensa. Por conseguinte, a durabilidade das estruturas de concreto armado e de aço localizadas nestas regiões poderá ser reduzida devido a erros de execução ou à utilização de materiais sem a devida proteção química necessária.

Embora algumas madeiras possam ser sujeitas à diminuição da sua resistência mecânica e consequente perda de durabilidade, devido à decomposição da sua estrutura anatômica causada pela ação de seres xilófagos e dos raios ultravioleta, é possível garantir a integridade global da estrutura através do emprego de madeiras impregnadas com produtos preservativos e através da adoção de boas práticas de projeto que impeçam a incidência dos raios solares nos elementos estruturais. Por conseguinte, as estruturas de madeira constituem uma opção vantajosa em ambientes corrosivos, onde as durabilidades do concreto e do aço são dependentes da qualidade da execução.

Outro aspecto que também deve ser considerado durante a fase de concepção de uma estrutura é a resistência ao fogo, que consiste na capacidade de manter a função de suporte durante um determinado período de tempo em que ocorre a exposição ao fogo. Esta propriedade é particularmente importante, atendendo ao fato de que possibilita a evacuação dos usuários da edificação em caso de incêndio. Nestas ocasiões, poderão ocorrer temperaturas próximas dos 1000°C, o que causa alterações nas características mecânicas dos materiais presentes nas edificações sujeitas ao fogo. PINTO (2004) refere que o aço perde cerca de 80% da sua resistência quando a temperatura atinge os 500°C e o concreto sofre alterações na sua estrutura a partir dos 80°C, o que pode resultar na desintegração do material.

CARRASCO *et al.* (2010) referem que as estruturas de madeira possuem bons comportamentos em situações de incêndio, embora sejam frequentemente conotadas, de forma errônea, como má opção (Pinto e Júnior, 2005). CARRASCO *et al.* (2010) referem que esse fato se deve ao desconhecimento do comportamento da madeira em situação de incêndio, além da falta de disposições normativas e escassez de profissionais especialistas em segurança contra incêndios. A Figura 1 apresenta a imagem clássica que ilustra os comportamentos em situação de incêndio de elementos estruturais de aço e de madeira. Nela é possível constatar que o elemento estrutural de madeira sustenta partes da estrutura de aço que sofreram redução das suas propriedades mecânicas devido às temperaturas elevadas.



Figura 1. Elementos de madeira e de aço pós-incêndio (Ritter, 1990).

PINTO e JÚNIOR (2010) expõem que a madeira perde as suas propriedades mecânicas quando são atingidas temperaturas acima de 95°C, no entanto a redução das resistências mecânicas não ocorre a uma velocidade constante. Este fato é justificado pela formação de uma camada de carvão que isola termicamente o interior da peça estrutural, contribuindo para a manutenção de uma seção residual resistente aos esforços solicitantes durante um determinado período de tempo.

O coeficiente de condutividade térmica (ou apenas condutividade térmica) é outro parâmetro que poderá contribuir para a comparação dos desempenhos das estruturas em situação de incêndio (Pinto e Júnior, 2004). Esta propriedade térmica traduz a velocidade de propagação do calor nas direções transversal e longitudinal de um determinado elemento estrutural, resultando no maior ou menor intervalo de tempo no qual as características mecânicas dos materiais se mantêm inalteradas.

Comparando os coeficientes de condutividade térmica do aço, concreto e madeira, GLASS e ZELINKA (2010) afirmam que o aço possui  $45 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , o concreto apresenta  $0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e as madeiras com densidade elevada e com teor de umidade de 12% apresentam  $0,21 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Uma vez que a madeira possui valores de coeficiente de condutividade térmica menores, é possível afirmar que o emprego da madeira é a solução que apresenta melhor

desempenho em situação de incêndio, atendendo ao fato de que conserva as características de suporte durante um maior período de exposição ao fogo, quando comparado com o mesmo volume de aço e de concreto.

As vantagens da utilização da madeira se refletem na variedade e versatilidade de aplicações estruturais, como por exemplo: coberturas treliçadas de edifícios, estruturas porticadas de edificações, pontes, viadutos, vigamentos para pisos e cimbramentos (Pfeil e Pfeil, 2003). Apesar das inúmeras aplicações e vantagens, a madeira ainda é vista de forma preconceituosa e, conseqüentemente, não é considerada como uma opção vantajosa face aos demais materiais de utilização em estruturas de edificações (Souza, 2013).

Os pontos críticos das estruturas de madeira são as ligações entre os elementos estruturais, devido às concentrações de tensões que condicionam o comportamento global da edificação (Rammer, 2010). Outro aspecto que importa realçar é o fato das ligações estarem sujeitas às influências de vários fatores inerentes à geometria, aos materiais e às condições de contorno, que dificultam a previsão do seu comportamento mecânico .

## **1.1 Justificativa**

Segundo a norma NBR 7190: *Projeto de estruturas de madeira* e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO E STEIGER (2011), as ligações em estruturas de madeira poderão ser classificadas em mecânicas ou coladas, conforme apresentado na Figura 2. As ligações mecânicas se dividem em: ligações através de pinos metálicos, formadas por pregos (Figura 3) ou parafusos (Figura 4); ligações de cavilhas, realizadas por intermédio de pinos de madeira torneados (Figura 5); ligações através de conectores, recorrendo a anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados, conforme as Figuras 6 e 7, respectivamente (ABNT, 1997).

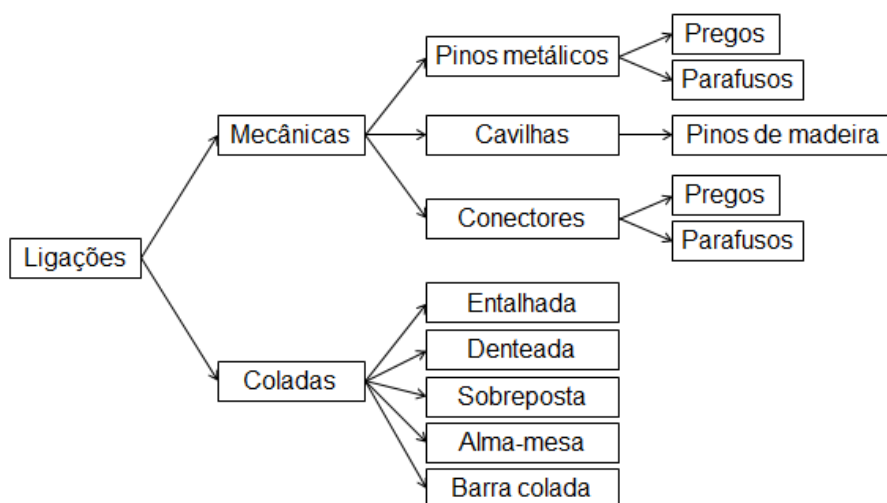


Figura 2. Tipos de ligações em estruturas de madeira (Fonte: O autor).

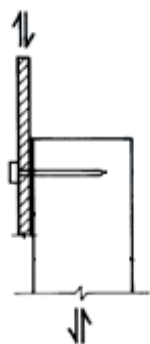


Figura 3. Ligação mecânica pregada (ABNT, 1997).

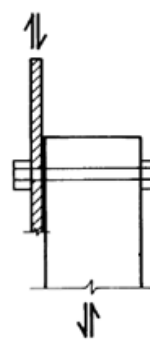


Figura 4. Ligação mecânica parafusada (ABNT, 1997).

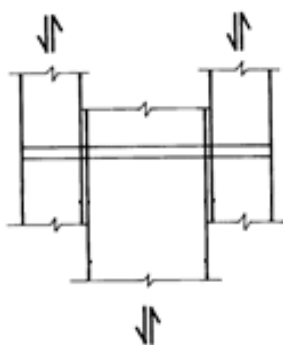


Figura 5. Ligação mecânica com pino de madeira (ABNT, 1997).

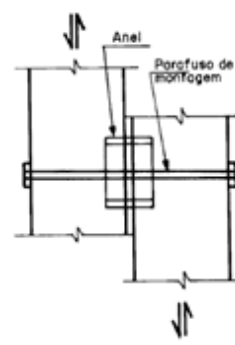


Figura 6. Ligação mecânica com anel metálico (ABNT, 1997).



Figura 7. Ligação mecânica com chapa com dentes (ABNT, 1997).

PIGOZZO (2004) expõe que a transferência de esforços nas ligações mecânicas é realizada de forma discretizada, resultando no aumento das concentrações de tensões e, conseqüentemente, na diminuição das resistências das conexões. O modo de execução das ligações mecânicas introduz tensões adicionais no próprio elemento de madeira, o que potencializa a concentração de esforços, favorecendo decréscimos da capacidade de carga.

Outro aspecto a ser considerado é o fato das ligações mecânicas serem aparentes, o que pode prejudicar a estética, favorecer a sua degradação devido à corrosão e diminuir a resistência da ligação em situação de incêndio.

Conforme referido por TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) e apresentado na Figura 2, as ligações coladas poderão ser divididas em: entalhadas (*scarf joint*) – Figura 8, denteadas (*finger joint*) – Figura 9, sobrepostas (*lap joint*) – Figura 10, conexão entre a alma e a mesa de um perfil em madeira (*web joint*) – Figura 11 ou com barras (*glued-in rods*) – Figura 12.

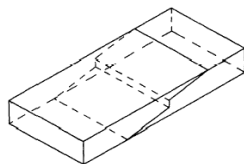


Figura 8. Ligação colada entalhada (Integrated Publishing, 2015).

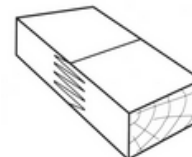


Figura 9. Ligação colada denteada (TRADA, 2015).



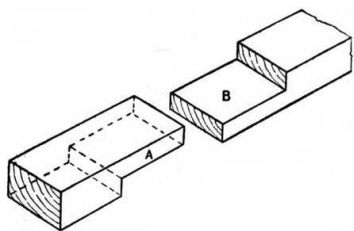


Figura 10. Ligação colada sobreposta (Basic Carpentry Techniques, 2015).

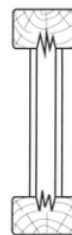


Figura 11. Ligação colada alma-mesa (TRADA, 2015).

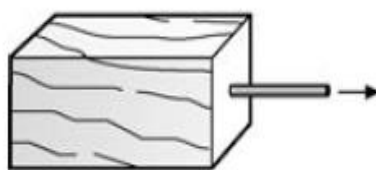


Figura 12. Ligação com barra colada (TRADA, 2015).

As ligações com barras coladas são compostas por três elementos: bloco de madeira, barra, e adesivo. O bloco de madeira é o elemento sujeito a esforços axiais, de comprimento variável e de dimensão superior às dimensões da sua seção transversal, no qual se encontram embutidos a barra e o adesivo. A barra é o elemento cilíndrico de esbeltez elevada, sujeito a solicitações axiais inerentes à transmissão dos esforços entre os elementos estruturais de madeira. Adesivo é o material que permite a transferência de esforços entre o bloco de madeira e a barra por intermédio do seu cisalhamento.

Devido à sua configuração, as ligações coladas entalhada, denteada e alma-mesa possuem maior complexidade de execução, exigindo mais tempo e qualidade durante a sua produção. A ligação colada alma-mesa não permite a conexão entre elementos estruturais distintos (por exemplo: ligação pilar-viga, ligação laje-pilar, ligação laje viga, etc.), sendo que permite conexões entre elementos de uma única peça estrutural. Segundo CUSTÓDIO, BROUGHTON E CRUZ (2009), a durabilidade das ligações coladas depende da exposição do adesivo ao ambiente, podendo ter a sua resistência mecânica diminuída através da ação da temperatura e umidade. Por conseguinte, existe a possibilidade de reduzir os efeitos negativos causados pelas ações da

temperatura e da umidade no adesivo através do seu embutimento na madeira, o que não se verifica nas configurações entalhada, denteada e sobreposta.

Quanto às ligações com barras coladas, BUCHANAN e BARBER (1996), FELIGLIONI *et al.* (1996), MADHOUSHI e ANSELL (2004) e PIGOZZO e LAHR (2006a), referem que, o fato destas possuírem o adesivo e a barra embutidos na madeira, aumenta a durabilidade da conexão. BUCHANAN e BARBER (1996), BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a), SERRANO (2001a) e DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004) acrescentam que, devido a essa configuração, as conexões também possuem uma maior resistência ao fogo. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e BAINBRIDGE *et al.* (2002) referem que, devido ao fato de existir o embutimento da barra e do adesivo na madeira, as ligações com barras de aço coladas em madeira possuem estética melhorada, uma vez que a junta é menos perceptível.

Quanto às vantagens em relação ao mecanismo de funcionamento das ligações com barras coladas, estas possuem alta resistência mecânica (Serrano, 2001b; Yeboah, Gilbert e Gilfillan, 2009; Fueyo *et al.* 2009; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011) e elevada rigidez (Serrano, 2001b; Broughton e Hutchinson, 2001c; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009; Cimadevila *et al.*, 2012), o que as torna compatíveis com aplicações em estruturas de edificações. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c), JENSEN e GUSTAFSSON (2004), YEBOAH, GILBERT e GILFILAN (2009) e MARTIN, ESTÉVEZ e OTERO (2013) acrescentam que as ligações com barras coladas possuem continuidade na superfície através da qual existe a transferência de esforços entre a barra e a madeira, resultando na elevada eficiência na transição de cargas entre elementos estruturais.

BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c), PIGOZZO e LAHR (2006b) e CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2011) referem que as ligações com barras coladas requerem baixa intervenção nos elementos estruturais durante a sua execução. CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2011) expõem que as ligações com barras coladas acrescentam pouco peso à estrutura, resultando na rapidez de execução e na quantidade de mão de obra reduzida. Devido à simplicidade do processo executivo das ligações, exposta por CUSTÓDIO,

BROUGHTON e CRUZ (2011), PIGOZZO e LAHR (2006c) referem ainda que os custos de produção destas ligações são reduzidos. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a) afirmam que a confecção das ligações poderá ser realizada *in situ*, porém STEPINAC *et al.* (2013) também apresentam a possibilidade de produção fora da obra.

A utilização das ligações com barras coladas é recente, tendo sido iniciada entre meados da década de 70 e início dos anos 80 (Bengtsson, Kemmsies e Johansson, 2000; Parida, Johnsson e Fragiacomio, 2013; Walker e Xiao, 2014; Lartigau, *et al.*, 2015). Por ser uma tecnologia recente, as normas de dimensionamento não possuem critérios válidos para estimar a capacidade de carga das ligações, visto que suscitam várias divergências no seio da comunidade científica quanto às interferências de alguns fatores no comportamento das conexões (Bengtsson, Kemmsies e Johansson, 2000; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2008; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011; Stepinac *et al.*, 2013), implicando na necessidade de proceder a ensaios destrutivos.

CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008) expõem o fato das ligações com barras coladas em madeira serem compostas por materiais com comportamentos mecânicos diferentes, o que aumenta o grau de complexidade da previsão do desempenho da conexão. Outro ponto negativo referente às ligações com barras coladas é o fato da previsão da resistência da ligação ser afetada pela variabilidade das características mecânicas da madeira, inerente ao seu caráter anisotrópico e à sua heterogeneidade, o que reforça a exposição de BENGTTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) quanto à complexidade da previsão do comportamento global da ligação.

BOUGHTON (2001c), DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004), XU, BOUCHAÏR e RACHER (2012) e CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2014) são unânimes nas suas exposições em relação à carência de estudos científicos que analisam as influências dos diversos fatores nos comportamentos das ligações com barras coladas envolvendo, sobretudo, madeiras com densidade elevada. Atendendo ao fato da capacidade de carga deste tipo de ligação ser sensível a diversos parâmetros, CUSTÓDIO,

BROUGHTON e CRUZ (2011) afirmam que é necessário que a execução desta seja efetuada por mão de obra qualificada.

O aprofundamento do estudo do comportamento mecânico das ligações com barras coladas é pertinente, uma vez que estas conexões possuem diversas possibilidades de aplicações: reforço em zonas de elementos estruturais sujeitas a altas concentrações de esforços (Serrano, 2001b; Fueyo *et al.* 2009; Chans, Cimadevila E Gutiérrez, 2013; Cavalli *et al.*, 2014), reparação de elementos estruturais sujeitos à ação de seres xilófagos (Broughton e Hutchinson, 2001c; Fueyo *et al.* 2009; Chans *et al.*, 2010; Cimadevila, Chans e Gutiérrez, 2013), prevenção de fissuras (Broughton e Hutchinson, 2001b; Fueyo *et al.* 2009; Chans *et al.*, 2010), ligações entre elementos estruturais compostos por madeira e outros materiais (Broughton e Hutchinson, 2001b; Pigozzo e Lahr, 2006a; Parida, Johnsson e Fragiacom, 2013, Fecht *et al.*, 2014), ligações entre elementos de estruturas porticadas (Del Senno, Piazza e Tomasi, 2004; Pigozzo E Lahr, 2006a; Chans *et al.*, 2010; Parida, Johnsson e Fragiacom, 2013), ligações com elementos de fundação (Del Senno, Piazza e Tomasi, 2004; Pigozzo e Lahr, 2006a; Parida, Johnsson e Fragiacom, 2013), estruturas planas em grelha, emendas de topo (Pigozzo e Lahr, 2006a) e treliças espaciais (Cimadevila, Rodríguez e Chans, 2007; Chans *et al.*, 2010; Cimadevila, Chans e Gutiérrez, 2013; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2014).

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo geral*

Estudar a resistência mecânica das ligações com barras de aço rosqueadas coladas em madeiras de densidade elevada visando a aplicação estrutural.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

- Determinar as propriedades mecânicas das madeiras a partir da variação do teor de umidade;

- Analisar a influência da geometria na resistência mecânica das ligações com barras de aço rosqueadas coladas com epóxi em madeiras de Maçaranduba (*Manilkara spp*) e de Citriodora (*Corymbia Citriodora*);
- Investigar os efeitos de erros de execução na resistência mecânica da ligação;
- Avaliar a influência de características físicas e de defeitos da madeira na resistência mecânica das ligações.

### 1.3 Delimitação

Neste trabalho se avalia a variação da resistência mecânica de ligações com barras de aço galvanizado rosqueadas coladas em madeiras de alta densidade, através da simulação de condições próximas às que poderão ocorrer em situações reais. Essas condições incluem características geométricas, materiais e condições de produção.

Procurou-se utilizar ligações com geometria condizente com as boas práticas de projeto (segurança estrutural em Estados Limites Últimos e economia de material) e de forma a facilitar o estudo do mecanismo de funcionamento (ligações com barras isoladas).

As madeiras utilizadas possuíam defeitos de crescimento (nós, medula e bolsas de resina) e de secagem (rachaduras com espessura inferior a 1 mm) e possuíam teor de umidade de equilíbrio com o meio ambiente. As condições de produção simuladas incluíam a utilização de equipamentos com falta de manutenção, utilização de resina com viscosidade e trabalhabilidade prejudiciais à execução das conexões e combustão não intencional da madeira.

Não se procurou estabelecer formulações numéricas para a capacidade de carga das conexões, mas sim verificar a adequação das disposições presentes na bibliografia e a possibilidade de utilização estrutural de ligações com características similares às deste estudo.

#### 1.4 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo se inserem a introdução, onde se expõem as vantagens da incorporação da madeira em estruturas de edificações, a justificativa, na qual se apresenta a problemática das ligações estruturais em madeira e a importância do estudo das ligações com barras coladas, os objetivos geral e específicos desta dissertação, a delimitação do tema de pesquisa e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo está apresentado o estado da arte referente às ligações com barras coladas em madeira, abordando os diversos fatores que afetam a capacidade de carga da ligação, bem como as considerações de diversos estudos relativamente às variáveis já estudadas.

O capítulo 3 apresenta os detalhes referentes à execução dos CPs, características mecânicas e justificativa da escolha dos materiais utilizados, procedimentos de execução dos CPs, registros fotográficos dos erros de execução e dos defeitos dos blocos de madeira, procedimentos de ensaios para a determinação do teor de umidade da madeira através dos xilohigrômetros de contato e segundo o ensaio de secagem em estufa, procedimentos de ensaio de determinação da densidade básica ( $\rho_{bás}$ ) das madeiras segundo a norma NBR 7190 e, finalmente, os procedimentos de ensaios de tração das ligações e das barras de aço rosqueadas.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos registros fotográficos dos erros de execução e dos defeitos dos blocos de madeira, ensaios de determinação da umidade por intermédio dos xilohigrômetros de contato e de perfuração e através da secagem em estufa. Neste capítulo estão presentes os resultados do ensaio de determinação da  $\rho_{bás}$  e a caracterização mecânica das madeiras. Constam ainda as discussões acerca dos parâmetros que podem interferir na capacidade de carga das ligações. Também são apresentadas comparações entre os resultados obtidos com as disposições presentes na bibliografia.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões advindas da discussão dos resultados obtidos durante esta investigação. No capítulo 6 estão expostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Na parte final desta dissertação estão apresentadas as Referências Bibliográficas e os Anexos, onde é possível encontrar as figuras, os quadros e as tabelas que auxiliam na compreensão da pesquisa.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Segundo BENGTTSSON, KEMMSIES e JOHANSON (2000), SERRANO (2001a), BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) e WALKER e XIAO (2014), o estudo das ligações com barras coladas em madeira se iniciou entre meados da década de 70 e inícios da década de 80, nos países escandinavos e na Alemanha. TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que os estudos iniciais acerca das ligações com barras coladas apenas utilizavam madeira laminada colada (MLC) e à madeira fina laminada e colada (LVL).

Segundo STARK, CAI e CARLL (2010), MLC possui lâminas com espessuras variáveis entre 25 e 50 mm, enquanto que LVL possui lâminas com espessuras entre 2,5 mm e 3,2 mm. Estes tipos de madeira composta possuem resistências mecânicas melhoradas, quando comparadas com a madeira serrada, atendendo ao fato de que os defeitos de crescimento da madeira (nós, rachaduras e bolsas de resina) e de secagem poderão ser eliminados.

Vários grupos de pesquisa surgiram com o objetivo primordial de aprofundar o conhecimento dos fatores que influenciam os comportamentos mecânicos destas ligações, para posterior formulação de propostas de dimensionamento e padronização de procedimentos de execução. Desses grupos se destacam quatro referências:

- GIROD – *Glued-in Rods for Timber Structure*: financiado pela União Europeia, desenvolveu as suas atividades entre 1998 e 2000, e era formado por universidades, centros de pesquisa e empresas da Suécia, Reino Unido e Alemanha (Bengtsson, Kemmsies e Johansson, 2000);

- COLORETIM – *Composite Local Reinforcement for Timber Structures*: grupo financiado pela União Europeia entre 1999 e 2000, formado por laboratórios de pesquisa, produtores de materiais e empreiteiros de Portugal, França e Reino Unido. Este grupo baseava o seu estudo na incorporação de barras de materiais compósitos nas ligações coladas com madeira. As barras eram compostas por plástico reforçado com fibras de carbono (CFRP) e plástico reforçado com fibras de vidro (GFRP) para aplicação em novas



estruturas, reforço e reparação de estruturas existentes (Cruz, Moura e Machado, 2001);

- LICONS – *Low Intrusion Conservative Systems for Timber Structures*: financiado pela União Europeia, iniciou as suas atividades em 2002, sendo formado por universidades, centros de pesquisa, produtores de materiais e empresas de Portugal, França, Itália e Reino Unido (Cruz *et al.*, 2001);

- FPS COST Action – *European Cooperation in Science and Technology*: financiado pela União Europeia e composto por vários grupos de pesquisa, estando atualmente em funcionamento, inclui instituições de vinte e cinco países europeus (COST, 2015).

As diversas pesquisas resultaram em várias propostas para estabelecer equações para a previsão da resistência mecânica das ligações. TLUSTOCHOWICZ, STEIGER e SERRANO (2011) e STEPINAC *et al.* (2013) apresentam diversas formulações numéricas para a previsão da capacidade de carga das conexões provenientes de diversos estudos e normas de dimensionamento. STEPINAC *et al.* (2013) expõem que as formulações numéricas presentes nos estudos científicos e nas normas de dimensionamento podem ser resumidas a uma equação geral simplificada Equação (2). Sendo  $R_{ax,k}$  a resistência característica ao arrancamento (N),  $d$  o diâmetro<sup>5</sup> (mm),  $l$  o comprimento de ancoragem (mm) e  $f_{v,k}$  o parâmetro de resistência ao cisalhamento da ligação (N/mm<sup>2</sup>).

$$R_{ax,k} = \pi \times d \times l \times f_{v,k} \quad (2)$$

Apesar das equações para o cálculo da capacidade de carga das ligações com barras coladas em madeira serem semelhantes, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que existem discordâncias no seio da comunidade científica. Este fato se reflete na

---

<sup>5</sup> STEPINAC *et al.* (2013) não fizeram uma distinção entre o diâmetro da barra e o diâmetro da linha de cola.

necessidade de realizar ensaios experimentais destrutivos das conexões, de forma a conhecer o modo de influência dos fatores na capacidade de carga das ligações. Por outro lado, os ensaios destrutivos permitem a calibração de modelos numéricos para a previsão da capacidade de carga das ligações.

## 2.1 Teoria

Devido ao fato de possuírem três materiais com comportamentos mecânicos distintos, os mecanismos das ligações não estão abrangidos pela teoria convencional da Resistência dos Materiais, uma vez que esta apenas se aplica a materiais homogêneos. É pertinente acrescentar a exposição de SERRANO e GUSTAFSSON (2006), na qual é referida que deverão ser consideradas tensões iniciais presentes nos materiais da ligação. Estes esforços adicionais são devidos às microfissuras decorrentes do processo de cura dos adesivos e dos defeitos de formação e secagem da madeira, formação tais como: nós, fissuras, bolsa de resina e presença de medula.

Para um melhor entendimento do modo de funcionamento das ligações coladas, é necessário recorrer à mecânica de fratura. Existem duas abordagens: a Mecânica de Fratura Elástica Linear (MFLE) e a Mecânica de Fratura Elasto-plástica (MFEP). A MFLE prevê a pré-existência de esforços e concentrações de tensões iniciais e admite que a velocidade de propagação da fissura é constante, por outro lado, para materiais cuja ductilidade é elevada, como o caso da madeira, na qual existe plastificação do material antes de ocorrer a fratura, fazendo com que a velocidade de propagação desta não seja constante, sendo então necessário aplicar a MFEP (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

Segundo BUENO e BITTENCOURT (2015), o gráfico tensão x deformação ( $\sigma \times \epsilon$ ) do MFEP (Gráfico 2) apresenta três estágios: estágio 1, no qual ocorre a plastificação, com velocidade constante, do local onde posteriormente irá se desenvolver a fissura, sendo caracterizado pelo comportamento elástico linear; estágio 2, onde ocorre o início da propagação das fraturas, com velocidade não constante, caracterizado pelo comportamento

elástico não-linear; estágio 3, durante o qual as fissuras se propagam sem que haja um aumento de  $\sigma$ .

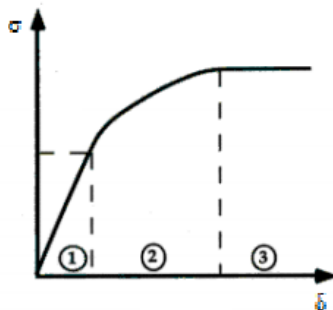


Gráfico 2.  $\sigma \times \epsilon$  da MFEP (Adaptado de Bueno e Bittencourt, 2015).

Segundo CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2009), o MFEP é complexo e não existe conhecimento suficiente para a sua aplicação em ligações com barras coladas. Por conseguinte, DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004) referem que, para o dimensionamento das ligações com barras coladas em madeira, se despreza o comportamento não-linear (estágios 2 e 3) e apenas se considera a fase linear (estágio 1).

Para analisar as distribuições dos esforços na ligação, é pertinente introduzir a Teoria de Volkersen, que tem em consideração a MFEP (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). Para esta teoria levou-se em conta a configuração de ligações coladas sobrepostas (Figura 10), compostas por materiais isotrópicos com comportamentos elásticos lineares, cuja distribuição de esforços está representada na Figura 13. É perceptível que, as superfícies aderentes 1 e 2 estão sujeitas à tração axial, enquanto que a camada de adesivo está sujeita ao esforço de cisalhamento ( $\tau$ ), cuja distribuição tem valores máximos nas extremidades da superfície de colagem.

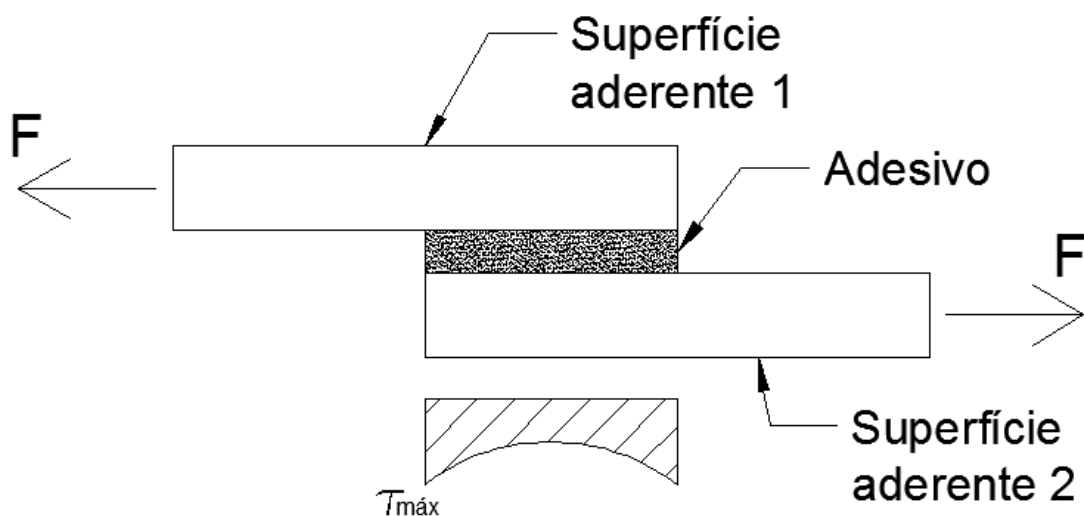


Figura 13. Diagrama da distribuição de  $\tau_m$  (Fonte: O autor).

Para proceder à análise de tensões em ligações com barras coladas, é necessário ter em consideração a revolução perimetral da ligação colada sobreposta e da respectiva distribuição de tensões da Teoria de Volkersen, apresentados na Figura 13. De forma análoga ao funcionamento da ligação colada sobreposta, o mecanismo de funcionamento das ligações com barras coladas em madeira consiste na transferência de cargas axiais (tração ou compressão) entre a barra e a madeira através do cisalhamento do adesivo, originando tensões nas interfaces madeira-adesivo e adesivo-barra, conforme apresentado nas Figuras 14 e 15. Para as ligações coladas entre barras e madeira, deve-se considerar a plastificação do adesivo durante a aplicação da carga, que se traduz na diminuição de  $\sigma$  com o aumento de  $\epsilon$ , resultando na Teoria de Volkersen Generalizada por Gustafsson (Serrano, 2004).

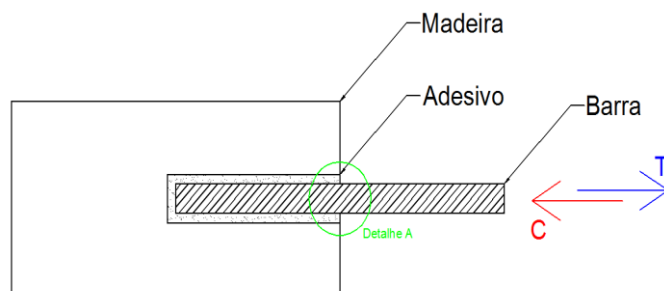


Figura 14. Mecanismo de transferência de esforços (Fonte: O autor).

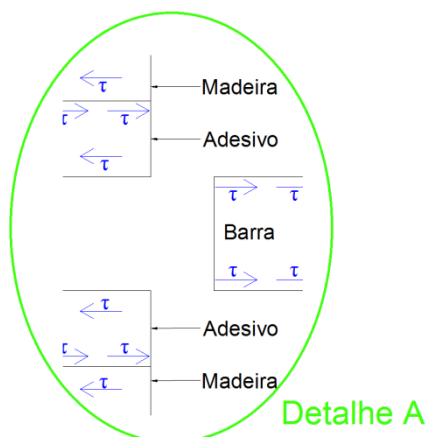


Figura 15. Detalhe A da Figura 14 (Fonte: O autor).

Segundo CIMADEVILA, RODRÍGUEZ e CHANS (2007), TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) é possível afirmar que a distribuição de esforços da Figura 13 é dependente das características mecânicas dos materiais, da geometria da ligação e da carga aplicada na ligação.

## 2.2 Modos de fratura e de ruptura

Apesar de, durante o dimensionamento, se considerar apenas a fase elástica linear do comportamento das conexões, é pertinente conhecer os modos de fratura e de ruptura que ocorrem durante os ensaios, de forma a classificar o tipo de falha da ligação (Gardelle e Morlier, 2007) e para se conhecer a adequabilidade da geometria da conexão para atendimento das solicitações. TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e TEIGER (2011) expõem que o modo de fratura traduz a ductilidade da ruptura da ligação, sendo que o modo de ruptura consiste na localização onde a falha ocorreu. É pertinente ter em consideração que o modo de fratura (dúctil ou frágil) é diferente em cada modo de ruptura.

TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que os modos de ruptura das ligações com barras coladas em madeira podem ser: ruptura por cisalhamento da madeira (Figura 16a), ruptura por tração da madeira (Figura 16b), ruptura por cisalhamento do bloco de madeira (Figura

16c), ruptura por separação da madeira (Figura 16d) e ruptura por escoamento da barra (Figura 16e).

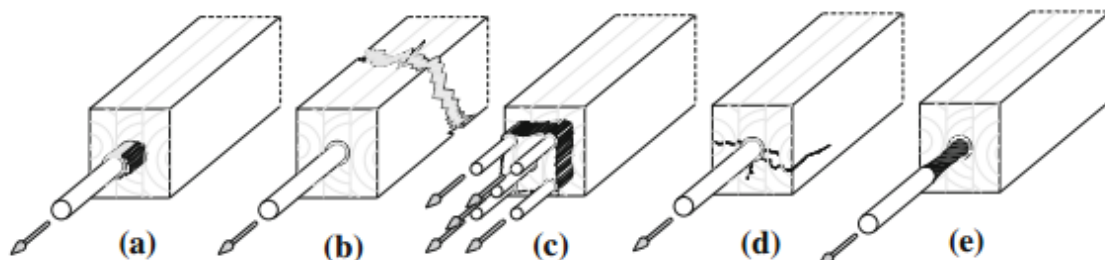


Figura 16. Modos de ruptura (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

Em relação aos modos de rupturas apresentados na Figura 16, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER, (2011) expõem que a ruptura por cisalhamento (Figura 16a e 16c) é governada pela resistência ao cisalhamento da madeira. A ruptura por tração do bloco (Figura 16b) se dá em situações em que a barra está posicionada perpendicularmente às fibras da madeira, coincidindo com a direção ortogonal de menor resistência mecânica da madeira. A ruptura por separação da madeira (Figura 16d) ocorre devido às tensões perpendiculares às fibras causadas por carregamentos axiais imperfeitos ou quando existe pouca quantidade de madeira em torno da barra; A ruptura por escoamento da barra (Figura 16e) acontece quando a resistência à tração da barra condiciona o comportamento global da ligação.

O modo de ruptura por escoamento da barra (Figura 16e) é considerado como o modo de ruptura ideal para situações de projeto, atendendo à maior ductilidade e previsibilidade do comportamento da barra (Bainbridge *et al.*, 2002). Os restantes modos de ruptura não deverão ser previstos no dimensionamento das ligações, uma vez que possuem modos de fratura menos dúcteis, além do fato da madeira possuir grande variabilidade da sua estrutura anatômica, que se reflete na imprevisibilidade do seu comportamento mecânico. Para STEIGER, GHERI e WIDMANN (2004) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) a ruptura no adesivo deverá ser evitada, devido ao fato de apresentar modo de fratura frágil. Por conseguinte, na fase de

projeto, é necessário garantir o dimensionamento das ligações de forma a que a barra de aço seja o elo mais fraco da conexão.

Para que a ductilidade da ligação seja garantida, é pertinente ter em consideração a resistência e a elasticidade da madeira, a espessura do adesivo, o comprimento de ancoragem da barra, as condições de carregamento (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011) e as dimensões da seção transversal do bloco de madeira (Carvalho e Carrasco, 2007).

### **2.3 Ensaio e corpos de prova**

A falta de consenso com relação às formulações numéricas para a previsão da capacidade de carga das ligações expõe a necessidade de proceder a ensaios destrutivos das ligações. Os resultados obtidos através das campanhas experimentais permitem calibrar modelos numéricos de forma a prever corretamente as resistências mecânicas das conexões. Segundo a exposição realizada por FAYE *et al.* (2004) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), apesar da necessidade de proceder a experimentos destrutivos, não existem métodos padronizados de ensaio ou de execução de CPs. Por conseguinte, é necessário proceder a um levantamento das metodologias de ensaio e das boas práticas para a execução de CPs.

CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER, (2011) referem que é comum encontrar três sentidos de aplicação de cargas dinâmicas ou monotônicas nos CPs: tração axial (Figura 17), tração-compressão (Figura 18) e compressão axial (Figura 19). RIBERHOLT (1986) refere que as ligações com barras de aço coladas em madeira possuem maior resistência à compressão do que à tração, o que poderá justificar o fato da maioria dos estudos realizarem ensaios de tração simples. O caráter dinâmico da carga permite conhecer a resistência à fadiga das ligações com barras coladas em madeira, enquanto que a solicitação monotônica permite obter a capacidade de carga das conexões. PIGOZZO (2004) faz referência à diminuição da resistência mecânica e da rigidez das ligações com barras coladas quando sujeitas à aplicação de ciclos de carga sucessivos.

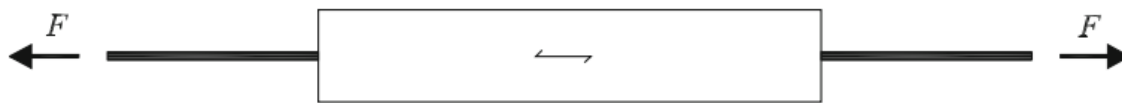


Figura 17. Tração axial (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

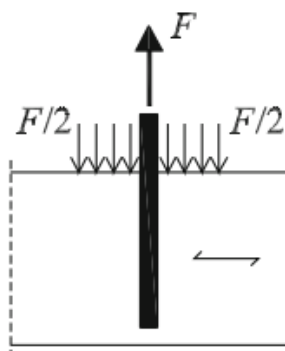


Figura 18. Tração-compressão (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

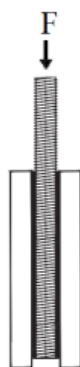


Figura 19. Compressão axial (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2008).

É possível encontrar estudos científicos com valores diferentes das velocidades de ensaio, além disso, não existem trabalhos que tomem este parâmetro como variável de estudo para avaliar os impactos deste parâmetro nos resultados, apesar de ser relevante considerar que as ligações estão sujeitas a cargas de longa duração, durante o seu período de serviço.

Os trabalhos de CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009), CHANS *et al.* (2010), CIMADEVILA *et al.* (2012) e CIMADEVILA, CHANS e GUTIÉRREZ (2012) apresentam as durações totais dos ensaios de  $5 \pm 2$  minutos, em conformidade com as disposições para ensaios de curta duração



da norma EN 408: *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties* (CEN, 2011). Existem trabalhos que expressam a velocidade de ensaio em termos da taxa de aplicação da carga, como no caso de PIGOZZO (2004), no qual foi adotado um valor de 100 N/s. A NBR 7190 refere que a determinação das características mecânicas das madeiras deverá ser realizada com velocidade de ensaio de 10 MPa/min.

Também é possível encontrar casos nos quais é definida a taxa de aplicação de deslocamento, como os exemplos dos trabalhos de BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a), BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e LING *et al.* (2014), nos quais foi adotada uma velocidade de 2 mm/min. O trabalho de SERRANO (2001a) recorreu a uma taxa de aplicação de deslocamento de 0.003 mm/s, enquanto que MADHOUSHI e ANSELL (2004) optaram por utilizar o valor de 2.54 mm/min, tendo como base a norma americana de ensaios em ligações mecânicas ASTM D 1761 – *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood*.

Relativamente à execução dos CPs, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) apresentam casos em que os processos de execução dos corpos de prova influenciaram o comportamento global das ligações. No estudo de JOHANSSON-JÄNKÄNPÄÄ (2008) foi testada a possibilidade de colagem na horizontal, tendo sido verificado que a resistência da conexão diminuiu devido à não uniformidade da distribuição do adesivo, o que resultou em decréscimos da resistência das ligações.

Conforme TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), furos com grandes comprimentos requerem a utilização de equipamentos para auxiliar a inserção das barras nos adesivos. Este fato se deve à resistência inerente ao empuxo do adesivo, durante a introdução da barra. Os mesmos autores também apresentam a possibilidade de colagem horizontal (Figura 20) recorrendo à introdução do adesivo pelo orifício de injeção, preenchendo o furo principal com posterior remoção dos excessos através do orifício de expulsão.

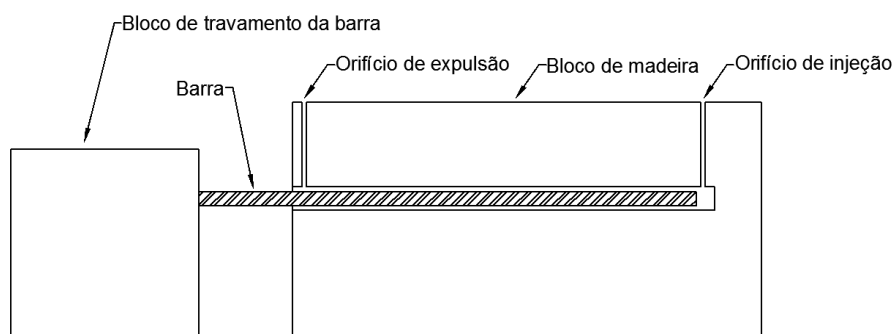


Figura 20. Colagem horizontal (Fonte: O autor).

Para furos cujo diâmetro é próximo ao da barra, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) recomendam a aplicação de adesivo na superfície da barra com a posterior introdução desta de forma rotacional. No entanto este processo não permite evitar a formação de bolhas de ar nas superfícies aderentes. Conforme CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2009), devido à necessidade de promover a melhor adesão, as superfícies aderentes deverão ser preparadas através de limpeza e coladas imediatamente, de forma a evitar a acumulação de partículas e substâncias nas superfícies aderentes, que interferem na ligação química e física entre os materiais e o adesivo.

## 2.4 Bloco de madeira

Conforme referido em 2.2, a geometria e as características mecânicas da madeira interferem na capacidade de carga das ligações. No caso das características mecânicas, estas dependem das condições de contorno (temperatura e umidade do ar) e da presença de defeitos na madeira (nós, rachaduras, bolsas de resina).

### 2.4.1 Densidade

O modo como a densidade influencia a capacidade de carga das ligações coladas com barra e madeira não é consensual no seio da comunidade científica, resultando na contestação das formulações numéricas presentes nas normas de dimensionamento (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2008; Chans *et al.*, 2010; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

Segundo CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), com o aumento da densidade, poderá existir um incremento da resistência mecânica da ligação. No entanto, madeiras com alta densidade possuem porosidade reduzida, o que interfere na impregnabilidade do adesivo e, conseqüentemente, reduz a adesão, podendo diminuir a resistência mecânica da ligação.

Dentre os estudos que excluem por completo as interferências da densidade nas capacidades de carga das ligações, estão os trabalhos de KORIN, BUCHANAN e MOSS (1999), BUCHANAN, MOSS e WONG (2001), BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000), FELIGLIONI *et al.*, 2003 e PIGOZZO (2004).

SERRANO (2004) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que densidades elevadas resultam em aumentos da resistência e da rigidez das ligações com barras coladas em madeira. Estas afirmações têm sido verificadas nos estudos mais recentes, no entanto, SERRANO (2001a), BERNASCONI (2001) e CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008) expõem a dificuldade em quantificar a relação entre a densidade e a resistência das conexões. Os estudos de CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009), CHANS *et al.* (2010), CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2013) comprovam essa dificuldade ao concluir que existe influência, embora não tenham conseguido quantificar essas relações.

De um modo geral, CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009) afirmam que a densidade está relacionada com o módulo de elasticidade das madeiras, o que afeta a distribuição dos esforços na interface madeira-adesivo. Por outro lado, CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2013) referem que, quanto maior a densidade da madeira, menor será a influência de  $\lambda$ .

Os trabalhos que estabelecem relações lineares entre a capacidade de carga e a densidade da madeira são os estudos de GEROLD (1992) e RIBERHOLT (1996). WIDMANN, STEIGER e GEHRI (2007) e STEIGER, GEHRI e WIDMANN (2007) estabelecem relações exponenciais entre resistência e a densidade para barras de aço paralelas às fibras da madeira. No caso de barras coladas perpendicularmente às fibras da madeira, os

trabalhos de WIDMANN, STEIGER e GEHRI (2007) e STEIGER, GEHRI e WIDMANN (2007) não apresentam resultados conclusivos.

Dos estudos supracitados, dois evidenciam a influência da densidade da madeira na capacidade de carga de forma linear e outros dois estabelecem uma relação exponencial. Os demais trabalhos apresentados consideram a influência da densidade, porém não estabelecem relação entre esta e o aumento da resistência da ligação. Também existem estudos que não relacionam a densidade com a resistência mecânica da conexão.

#### 2.4.2 Geometria

Para avaliar a influência da geometria dos CP, é preciso considerar as variáveis presentes nas Figuras 21 e 22: distância entre o eixo da barra e a borda do bloco de madeira ( $b$  e  $a_2$ ), distância entre eixos das barras ( $a_1$ ), distância entre extremidades das barras ( $L_i$ ), comprimento de ancoragem ( $L$ ), comprimento externo da barra ( $L_e$ ), diâmetro do furo ( $D$ ), diâmetro da barra ( $d$ ). Uma vez que  $L$  e  $d$  dependem diretamente das barras, as considerações inerentes a estes dois parâmetros serão apresentadas no subitem 2.6.4. Uma vez que  $D$  está diretamente relacionado com a espessura do adesivo, as suas considerações serão realizadas no subitem 2.5.3.

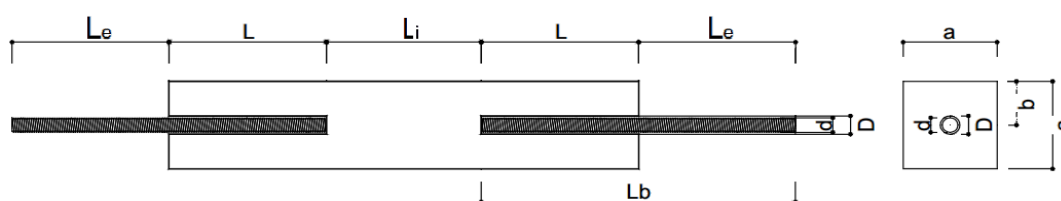


Figura 21. Variáveis geométricas (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009).

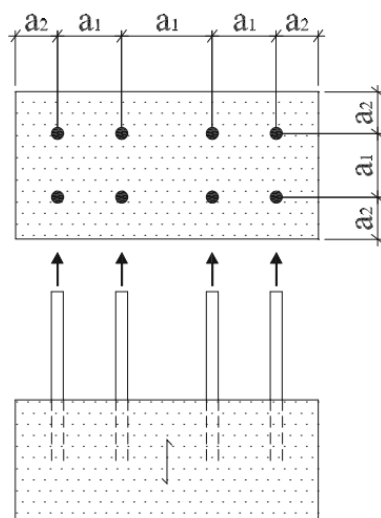


Figura 22. Variáveis geométricas (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

Conforme referido em 2.2, a distância entre o eixo da barra e a borda do bloco de madeira influencia o modo de ruptura. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e GARDELLE e MORLIER (2007) expõem que  $b$  deverá ter em conta o diâmetro de colagem e não o parâmetro  $d$ . SERRANO (2001a) afirma que existe ruptura por separação da madeira quando  $b$  assume valores entre  $1,5d$  e  $2,25d$ . Este mesmo autor refere que a uniformidade do diagrama de  $\tau$  (Figura 13) diminui com o aumento dos valores do parâmetro  $b$ . BLASS e LASKEWITZ (1999), que usaram MLC para proceder a ensaios com o objetivo de averiguar os valores limites de  $b$ , concluíram que, para valores inferiores a  $2d$ , ocorrem problemas durante a furação e, para valores de  $b$  abaixo de  $2,5d$ , a capacidade de carga da ligação diminui.

No seu estudo com MLC de conífera, RIBERHOLT (1986) concluiu que  $b$  deverá ser sempre superior a  $2d$  para evitar a ruptura por separação da madeira (Figura 16d). BUCHANAN e MOSS (1999) e PIGOZZO e LAHR (2006b) afirmam que  $b$  deverá ser superior a  $1,5d$  e STEIGER, GEHRI e WIDMANN (2007) referem que  $b$  não deverá tomar valores inferiores a  $2,3d$ . Segundo TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) as normas que prevêm o dimensionamento de ligações com barras coladas tomam como valor mínimo para  $b$  igual  $2,5d$ , à exceção da norma STEP 1, que estabelece  $1,5d$ .

A distância entre os eixos de barras ( $a_1$ ) em ligações com múltiplas barras coladas paralelamente às fibras, interfere no modo de ruptura da ligação, visto que poderá haver uma sobreposição de áreas de influência das barras, o que favorece a ruptura por separação da madeira, conforme apresentado na Figura 16d. (Blass e Laskewitz 1999; Serrano, 2001a; Pigozzo e Lahr, 2006c; Fueyo *et al.* 2009). BLASS e LASKEWITZ (1999) definiram que  $a_1$  deverá tomar valores superiores a  $5d$ .

BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e PIGOZZO e LAHR (2006c) afirmam que a distância entre eixos de barras deverá ser superior a  $2d$  de forma a evitar decréscimos na resistência mecânica da ligação. No trabalho de TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), é possível verificar que as normas de dimensionamento apresentam valores diferentes para o parâmetro  $a_1$ . O Eurocódigo 5 estipula  $3d$ , a norma DIN 1052:2004 estabelece  $4d$ , o *French Professional Guide* atribui  $5d$  e a norma STEP 1 determina  $2d$ .

AICHER, HÖFFLIN e WOLF (1998) fizeram uma investigação numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF) e concluíram que, para valores de  $L_i$  inferiores a  $L$ , existe um aumento significativo das tensões. No mesmo estudo é possível verificar que, para valores de  $L_i$  entre  $L$  e  $2L$ , não existem aumentos significativos de concentrações de tensões e, para valores superiores a  $2L$ , não são constatados quaisquer aumentos de concentração de tensão.

Em suma, é possível afirmar que a maioria dos trabalhos refere que  $b$  não deverá ser inferior a  $2,3d$  e  $L_i$  deverá ter como valor mínimo  $L$ .

#### 2.4.3 Defeitos da madeira e erros de produção

A quantidade de defeitos das madeiras depende da espécie de madeira presente e do fato da madeira ser serrada ou composta. Conforme já referido, na fabricação de madeira composta (por exemplo: MLC ou LVL), é possível ter um maior controle sobre a presença de defeitos de crescimento e de secagem (Yeboah, Gilbert e Gilfillan, 2009). No entanto, no caso das madeiras serradas, a exclusão das imperfeições é mais difícil.

Embora no estudo de BUCHANAN e BARBER (1996) seja referido que os defeitos da madeira são considerados locais de concentração de tensões e, conseqüentemente, de baixa resistência mecânica, a sua influência é menor do que normalmente se considera (Grunwald *et al.*, 2014). CHANS *et al.* (2010) afirmam que os defeitos de crescimento e de secagem das madeiras não interferiram no seu estudo, quer em termos de resistência, quer no modo de ruptura. GRUNWALD *et al.* (2014) expõem que é possível estabelecer relações entre os defeitos e a capacidade de carga da ligação.

CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2009) referem que antes de proceder à colagem é necessário efetuar a ativação das superfícies aderentes. Este processo consiste na promoção de superfícies isentas de substâncias e partículas que poderão diminuir a qualidade da adesão, resultando no decréscimo da resistência da ligação. Estes mesmos autores expõem que, após a furação dos blocos, ocorre o processo de inativação da superfície da madeira que esteve em contato com a broca, através do afloramento das substâncias extrativas.

BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) alegam que durante o processo de execução do furo, poderá ocorrer combustão da madeira em contato com a broca, diminuindo a possibilidade de estabelecimento de conexões mecânicas e químicas suficientemente sólidas com o adesivo.

É consensual que os defeitos da madeira podem condicionar a capacidade de carga da ligação, no entanto é difícil quantificar a sua influência. Antes da colagem, deverão ser atendidos os critérios necessários para se conseguir uma boa adesão, para que a resistência mecânica da ligação não seja influenciada negativamente.

#### 2.4.4 *Temperatura e teor de umidade*

As características mecânicas das madeiras são afetadas diretamente pelas condições de contorno, tais como a temperatura e umidade do ar, sendo que, segundo FECH *et al.* (2014), estes dois parâmetros são normalmente indissociáveis. Os mesmos autores referem que os estudos que focam a avaliação da influência da temperatura nas ligações, não têm aplicações

práticas, atendendo ao fato que, durante o tempo de vida útil da estrutura, não são registrados valores que permitam diminuir significativamente as características mecânicas da madeira, exceto em caso de incêndio.

FECHE *et al.* (2014) expõem que a resistência mecânica da madeira diminui linearmente e de forma reversível com o aumento da temperatura no intervalo de 0°C a 100°C. Devido à ortotropia da madeira, essa perda de resistência não é igual para todas as direções ortogonais. PIZZO *et al.* (2002) reportam que o coeficiente de expansão térmica (TEC) da madeira na direção perpendicular às fibras possui valores semelhantes aos do aço. Por outro lado, na direção paralela às fibras, a madeira apresenta valores de TEC bastante inferiores. Todavia, quer na direção perpendicular, quer na direção paralela, os TEC da madeira são diferentes dos valores do epóxi, o que dificulta a compatibilização de variações dimensionais entre estes dois materiais.

Em geral, o aumento do teor de umidade acima de 22% implica na diminuição de resistência mecânica da madeira e da redução da adesão. Com o aumento da umidade presente na madeira, ocorre o preenchimento dos vazios na superfície aderente, impedindo o estabelecimento das conexões mecânicas e físicas necessárias para garantir a ligação com o adesivo (Broughton e Hutchinson, 2001a; Molina e Júnior, 2005; Pigozzo e Lahr, 2006a; Cavalli *et al.*, 2014; Amoah, Kwarteng e Dadzie, 2014).

BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) expõem que, para valores de teor de umidade superiores a 22%, ocorre uma redução acentuada da resistência mecânica da madeira. Este fato é corroborado pela exposição presente no estudo de BOUGHTON e HUTCHINSON (2001a), na qual é referido que, para valores de teor de umidade iguais a 30%, ocorre uma redução da resistência mecânica de 65%. O aumento do teor de umidade da madeira provoca a diminuição da sua resistência mecânica, podendo resultar na alteração do modo de ruptura, visto que existe uma tendência para ocorrer o afastamento da fratura em relação ao eixo da barra (Broughton e Hutchinson, 2001a; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011; Cavalli *et al.*, 2014).

A oscilação do teor de umidade provoca a variação dimensional da madeira, introduzindo esforços adicionais na interface madeira-adesivo, o que



pode provocar diminuições da qualidade da adesão (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2001; Cavalli *et al.*, 2014). JOHANSSON-JÄNKÄNPÄÄ (2008) alega que poderão ocorrer decréscimos de 50% da capacidade de carga das ligações, quando estas estão sujeitas a variações de teor de umidade da madeira.

Apesar de ser possível efetuar a colagem de madeiras verdes, desde que sejam tomadas em consideração as devidas precauções (Broughton e Hutchinson, 2001a), o estudo das ligações com barras coladas em madeira deve centrar-se em casos de teor de umidade inferiores aos valores aos quais irão estar sujeitas durante o seu tempo de vida útil (Pigozzo e Lahr, 2006c). LARTIGAU *et al.* (2015) referem que o teor de umidade ideal para realizar a colagem é em torno de 12%.

## **2.5 Adesivo**

Conforme já referido, os adesivos têm como função principal transferir os esforços entre a madeira e a barra, conseqüentemente, estes terão que possuir boa durabilidade e resistência (Broughton e Hutchinson, 2003; Bainbridge *et al.*, 2002). Os adesivos também deverão possuir baixa viscosidade, de forma a preencher todos os espaços vazios das superfícies aderentes.

Uma vez que poderão ser sujeitos a variações de temperatura e de teor de umidade da madeira, os adesivos deverão apresentar variações volumétricas compatíveis com os materiais adjacentes, de forma a garantir uma área de colagem contínua e sem concentração de tensões (Broughton e Hutchinson, 2001c; Del Senno, Piazza e Tomasi, 2004; Pigozzo e Lahr, 2006c; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

### 2.5.1 Materiais

Segundo TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER, 2011, os adesivos mais utilizados nas ligações estruturais coladas com barras de aço e madeira são o epóxi (EPX), fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e poliuretano (PUR). PIGOZZO e LAHR (2004b) referem que, para o mesmo tipo de adesivo, é possível encontrar características mecânicas diferentes, uma vez que estas dependem das formulações químicas (Pigozzo e Lahr, 2006c).

Comparativamente aos demais adesivos de aplicação estrutural, BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) afirmam que o EPX é o adesivo que apresenta as melhores propriedades de preenchimento de vazios, melhor resistência mecânica e durabilidade, menor retração e melhor compatibilidade com a rigidez da madeira. BROUGHTON e HUTCHINSON (2003), YEBOAH, GILBERT e GILFILLAN (2009) e CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2009) acrescentam que EPX não necessita de pressão durante o processo de aplicação e cura, apresentando maiores tolerâncias às variações de espessura e de temperatura. BAINBRIDGE *et al.* (2002) e BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) salientam que EPX possui uma boa aderência à madeira e ao aço entre temperaturas de -30°C a 60°C. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e BROUGHTON e HUTCHINSON (2003) referem que, devido à sua tolerância às condições de temperatura, umidade, condições das superfícies aderentes e variações da geometria da ligação, EPX poderá ser utilizado em operações de reparação *in situ*. Devido a estas vantagens, PIGOZZO e LAHR (2004b) referem que EPX é o adesivo com maior utilização.

WHEELER e HUTCHINSON (1998) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que PRF possui resistência mecânica inferior ao EPX. BAINBRIDGE *et al.* (2002) referem este adesivo possui boa aderência à madeira, no entanto o mesmo não acontece com o aço. Além disso, devido à sua rigidez e retração acentuada durante o processo de cura, o PRF sofre rupturas ao longo do seu volume. Ainda em relação ao seu processo de cura, BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) referem que o PRF possui propriedades de preenchimento de vazios limitadas. BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) referem que as ligações com PRF cuja

madeira tenha sido queimada durante o processo de furação, sofrem uma redução da sua resistência mecânica de 10% a 24%.

Em termos de resistência mecânica, SERRANO (2004) afirma que PUR é inferior ao PRF. PIGOZZO e LAHR (2006c) limitam a utilização deste adesivo em casos em que teor de umidade é inferior a 10%. Este fato é sustentado pela afirmação de BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a) e PIGOZZO e LAHR (2006c) que expõem a formação de dióxido de carbono quando PUR entra em contato com a madeira, criando bolhas de ar que reduzem a superfície de contato e, conseqüentemente diminuem a qualidade da adesão. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) e BAINBRIDGE *et al.* (2002) referem que a redução da superfície de contato diminui a resistência mecânica das ligações e produzem rupturas na interface madeira-adesivo, caracterizadas pelo modo de fratura frágil.

O adesivo com melhores características é o EPX, visto que é a opção que melhor se adapta aos diferentes comportamentos mecânicos dos materiais envolvidos na ligação, além de possuir estabilidade dimensional durante a sua cura e de tolerar melhor as variações de umidade e temperatura. Ao contrário do EPX, o fato do PRF e PUR serem adesivos mais sensíveis às condições de colagem, AICHER e DILL-LANGER (2001) não recomendam a sua aplicação *in situ*.

### 2.5.2 Características mecânicas

Conforme já referido, a característica do adesivo que mais influencia o comportamento global das ligações é a sua resistência ao cisalhamento (Serrano, 2001a). Por conseguinte, as suas características mecânicas afetam o estado de tensão no interior da linha de cola (Del Senno, Piazza e Tomasi, 2004; Fecht *et al.*, 2014).

Para resinas<sup>6</sup> dúcteis (por exemplo: EPX), o aumento do volume providencia maiores resistências mecânicas das ligações, no entanto, estas vão diminuindo ao longo do tempo. No caso dos adesivos frágeis (por exemplo: PRF), FELIGLIONI *et al.* (2003) afirmam que não ocorrem perdas de resistência mecânica ao longo do tempo.

Uma vez que os adesivos são materiais de natureza distinta das madeiras, estes possuem valores de TEC superiores, o que dificulta a compatibilização entre estes dois materiais com as formulações químicas disponíveis no mercado (Pizzo *et al.*, 2002).

Geralmente, cada fabricante estipula o período de cura dos adesivos, sendo comum a necessidade de decorrerem sete dias para os adesivos atingirem a sua resistência máxima (Feliglioni *et al.*, 2003). Apesar disso, BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a) alegam que os adesivos possuem 25% mais resistência mecânica após 25 dias de cura, quando comparados com os valores registrados no final de sete dias. Segundo os autores, isto se deve à expulsão da umidade da interface madeira-adesivo.

### 2.5.3 Geometria

Neste ponto serão analisadas as disposições presentes no estado da arte relativamente à espessura do adesivo. Deve ser ressaltado que, apesar do comprimento do adesivo também ser um parâmetro geométrico, este depende linearmente do comprimento embutido da barra, por conseguinte, a sua discussão será incorporada no subitem 2.6.4.

A espessura do adesivo influencia a transferência de cargas entre a barra e a madeira, devido à sua proporcionalidade com a área do fuste que, por sua vez, está relacionada com a superfície de contato com a madeira (Feliglioni *et al.*, 2003; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). À medida que a

---

<sup>6</sup> O conceito de “resina” deverá ser compreendido como sendo o adesivo no estado líquido isto é, antes da sua cura. O conceito de “resina” é diferente do termo “bolsa de resina”, uma vez que este se refere aos locais no interior da árvore onde ocorre a acumulação de fluidos característicos de cada tipo de madeira.

espessura aumenta, existe uma “substituição” da madeira por adesivo, aumentando a rigidez da ligação e, devido ao aumento da área de contato com a superfície aderente, existe uma diminuição do pico e da uniformidade do esforço de cisalhamento, resultando numa maior resistência da conexão (Broughton e Hutchinson, 2001b; Cimadevila, Rodríguez e Chans, 2007; Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011; Martín, Estévez e Otero, 2013).

As espessuras podem variar entre 0,5 mm e 3 mm (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011), no entanto DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004) afirmam que os melhores comportamentos mecânicos são conseguidos com espessuras entre 1 mm e 2 mm. PIGOZZO e LAHR (2006c) afirmam que o diâmetro do furo deverá ser entre  $1.2d$  e  $1.5d$  e, por sua vez, BUCHANAN e MOSS (1999) referem que este parâmetro deverá ser  $1.25d$ . Para espessuras inferiores a 1 mm, a execução da ligação fica dificultada e mais dependente da viscosidade do adesivo, sendo que esta propriedade é preponderante na capacidade de carga da ligação, atendendo ao fato de que determina a qualidade da adesão (Del Senno, Piazza e Tomasi, 2004).

As ligações com espessuras de adesivo reduzidas possuem menor resistência à fadiga (Madhoushi e Ansel, 2004). BROUGHTON e HUTCHINSON (2001 b) e HARVEY *et al.* (2000) referem que, para espessuras superiores a 3 mm, o fenômeno de retração do adesivo durante o processo de cura é mais acentuado, podendo resultar em decréscimos de resistência. Na Tabela 3 encontram-se resumidos os intervalos das espessuras informados pelos diversos autores presentes na bibliografia.

Tabela 3. Resumo das espessuras mínimas e máximas dos adesivos

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>	<b>Espessura máxima (mm)</b>
Buchanan e Moss	1999		$1,25d$
Broughton e Hutchinson	2001	1	6
Del Senno, Piazza e Tomasi	2004	1	2
Tlustochowicz, Serrano e Steiger	2011	0,5	3

Fonte: O autor

BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) estudaram a influência da variação da espessura do adesivo entre 1 mm e 6 mm, tendo chegado à conclusão de que a resistência da ligação aumenta linearmente com a espessura. DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004) acrescentam que a rigidez da conexão aumenta proporcionalmente com a variação da espessura do adesivo. As exposições de BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) e DEL SENNO, PIAZZA e TOMASI (2004) poderão ser justificadas pela afirmação de MADHOUSHI e ANSELL (2004), na qual é referido que o aumento da espessura do adesivo resulta numa solicitação de um volume maior de madeira solicitada, podendo resultar na alteração do modo de ruptura da ligação.

Por outro lado, MARTÍN, ESTÉVEZ e OTERO (2013) referem que o aumento da espessura não implica um aumento proporcional da superfície de contato e, conseqüentemente, não ocorrem ganhos lineares de resistência mecânica da ligação. Os mesmos autores fazem uma exposição em relação aos gastos econômicos inerentes ao aumento da espessura do adesivo, referindo que os ganhos de resistência mecânica da ligação com o aumento da espessura do adesivo poderão não ser viáveis segundo uma análise custo-benefício.

É possível concluir que a espessura de adesivo poderá ser igual ou superior a 0,5 mm, sendo que deverá ser levado em consideração a facilidade de produção da ligação através da utilização de adesivos com viscosidade adequada. Por outro lado, o valor máximo da espessura do adesivo deverá ter em consideração os ganhos de resistência e o fator financeiro, além dos decréscimos de resistência que poderão ser registrados devido aos fenômenos de retração das resinas durante os seus processos de cura.

#### *2.5.4 Defeitos na produção*

Os erros na produção de CPs estão diretamente relacionados com as propriedades dos adesivos nos estados líquido e sólido. Por conseguinte, poderá ocorrer a mistura deficiente dos componentes do adesivo, a falta de preenchimento do furo com resina e o deslocamento da barra no orifício durante o processo de cura, resultando na espessura de colagem incorreta.

Quanto ao processo de preparação das resinas, BUCHANAN e BARBER (1996) afirmam que a mistura dos seus componentes é decisiva na eficiência da ligação. BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) complementam a afirmação anterior expondo que a deficiente mistura dos componentes dos adesivos poderá reduzir em até 50% a capacidade de carga da ligação.

Em relação à introdução do adesivo nos furos, BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) referem que a injeção de quantidades insuficientes de resina nos furos reduz a área de interface entre a madeira e o adesivo, o que poderá resultar em decréscimos da resistência mecânica da ligação.

Para avaliar as consequências da espessuras incorreta de adesivo, BENGTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000) executaram CPs com barras de 16 mm de diâmetro coladas com epóxi em MLC de espruce. Para avaliar os efeitos da irregularidade da espessura do adesivo, os autores estipularam três espessuras para o adesivo: 0,5 mm, 1 mm e 2 mm. As conclusões do estudo apresentam aumentos de resistência em até 30% para os CPs com EPX e PUR, no entanto os espécimes com PRF sofreram reduções da capacidade de carga em até 45%, o que poderá ser explicado pela intensidade do fenômeno de retração durante o processo de cura.

É necessário proceder à correta execução das ligações, garantir a espessura constante do adesivo e a correta mistura dos bi-componentes nas quantidades indicadas pelos fabricantes, caso contrário, poderá ocorrer diminuições das capacidades de carga. Outro fator que poderá interferir na capacidade de carga da ligação é o posicionamento da barra e a sua correta execução do furo, uma vez que estes dois fatores estão diretamente relacionados com a constância da espessura do adesivo e, conseqüentemente, na presença da concentração de esforços na linha de colagem.

### 2.5.5 Temperatura e teor de umidade

De um modo geral, a umidade diminui a resistência mecânica dos adesivos, podendo promover alterações químicas nestes, enquanto que as temperaturas, a partir de determinados valores, reduzem as propriedades mecânicas. CUSTÓDIO, BROUGHTON e CRUZ (2009) referem que dois fatores-chave para que a umidade e a temperatura não afetem o desempenho dos adesivos são a utilização de madeiras com teores de umidade adequados e a utilização de ligações cuja localização da linha de cola seja suficiente para evitar o seu contato com a umidade.

Conforme já referido, para teores de umidade elevados, ocorre o preenchimento das cavidades da superfície aderente da madeira, reduzindo a área disponível para a fixação do adesivo (Amoah, Kwartan e Dadzie, 2014). Por outro lado, é possível que a água interaja quimicamente com o adesivo de forma irreversível, originando a sua alteração química ou até mesmo a sua diluição (Custódio, Broughton e Cruz, 2009; Amoah, Kwartan e Dadzie, 2014; Cavalli *et al.*, 2014). PIGOZZO e LAHR (2006c) referem que EPX tem bons comportamentos para valores de teor de umidade inferiores a 22%.

Em relação à temperatura, o parâmetro fundamental para a determinação das propriedades térmicas dos adesivos, em termos de rigidez e resistência mecânica, é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), a partir da qual o adesivo sofre reduções das suas características mecânicas originais (Fecht *et al.*, 2014; Lartigau *et al.*, 2015). Estas alterações das propriedades mecânicas são dependentes do tipo de formulação química dos adesivos (Buchanan e Barber, 1996).

PRF e PUR estão sujeitos a reduções das suas características mecânicas a partir de 50°C e 40°C, respectivamente (Aicher e Dill-Langer, 2001). A  $T_g$  do EPX situa-se, geralmente, entre os 50°C e os 60°C (Broughton e Hutchinson, 2001c; Harris, 2004; Mussa *et al.*, 2013; Lartigau *et al.*, 2015), sendo dependente das condições de mistura, de cura, de serviço e da presença de umidade (Custódio, Broughton e Cruz, 2011). Quando o EPX atinge a  $T_g$ , ocorre a diminuição parcial das suas propriedades viscoelásticas



(Buchanan, 1994; Buchanan e Barber, 1996; Aicher e Dill-Langer, 2001; Lartigau *et al.*, 2015).

PIGOZZO e LAHR (2006c) referem que, quando o EPX está sujeito a variações entre -20°C e 70°C, reduz em 15% a resistência mecânica da ligação. LARTIGAU *et al.* (2015) expõem o fato de que o EPX sofre reduções irreversíveis da sua rigidez (6%) e do seu módulo de elasticidade (45%) em temperaturas iguais a 60°C. Quando a temperatura atinge os 80°C, a resistência do EPX é cerca de metade da sua rigidez inicial.

De um modo geral, a exposição prolongada ao calor altera as propriedades mecânicas do adesivo, aumentando a ductilidade (Buchanan e Barber, 1996; LARTIGAU *et al.*, 2015) e diminuindo a resistência ao cisalhamento e fadiga, além de interferir na sua fluência (Custódio, Broughton e Cruz, 2009). Além de promover a variação dimensional dos adesivos, a exposição prolongada ao calor também poderá potencializar a delaminação (Pizzo *et al.*, 2002), resultando na diminuição da durabilidade da conexão, caso a formulação química da resina proporcione um TEC incompatível com a madeira (Fecht *et al.*, 2014).

Uma vez que a previsão do comportamento mecânico dos adesivos sob temperaturas abaixo de T<sub>g</sub> é menos complexa (Fecht *et al.*, 2014), a escolha do tipo de formulação química deverá recair sobre a opção que não apresente diminuições das propriedades mecânicas quando sujeitas à situação de serviço, durante a qual poderão ser registrados valores até 60°C (Tlustochowicz, Serrano E Steiger, 2011). Diante do exposto, o EPX é a opção que melhor cumpre os requisitos de estabilidade das propriedades mecânicas.

## **2.6 Barra**

### *2.6.1 Materiais*

A bibliografia disponível apresenta vários tipos de barras aplicadas em ligações coladas com madeira: barras de madeira, GFRP, CFRP, aço nervurado (utilizadas em concreto armado) ou rosqueado.

As barras de madeira são de fácil produção (Jensen e Sasaki, 2002) e possuem módulos de elasticidade semelhantes aos dos blocos (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011), o que diminui a complexidade da compatibilização entre adesivo e superfícies aderentes. No entanto, devido à baixa resistência à tração da madeira, em comparação com o aço, a utilização de pinos de madeira em ligações com barras coladas não é comum.

TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) referem que as barras compostas por GFRP e CFRP possuem maior compatibilidade com EPX e PUR, são mais eficientes nas transferências de esforços e são fáceis de produzir. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001a), MADHOUSHI e ANSELL (2004) e FUEYO *et al.* (2009) acrescentam que as barras de GFRP e de CFRP são resistentes à umidade, podem ser utilizadas em ambientes corrosivos e possuem peso próprio reduzido. No entanto, BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) mencionam o seu elevado custo de produção.

Devido à sua ductilidade e resistência à tração, as barras de aço são as mais utilizadas (Bainbridge *et al.*, 2002; Broughton e Hutchinson, 2003). LING *et al.* (2014) referem que as ligações com barras de aço nervurado coladas em madeira são uma forma de conexão mais barata do que a solução com barras de aço rosqueadas. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) afirmam que as barras rosqueadas permitem a ligação mecânica nos casos em que existe déficit de adesivo. Além disso, a presença da rosca pode aumentar a ductilidade das barras, no entanto SERRANO (2001a) expõem que este fato diminui a rigidez axial da barra, prejudicando o comportamento mecânico da ligação.

### 2.6.2 Superfícies

Nas ligações com barras coladas em madeira, a interação entre as superfícies aderentes e o adesivo é outro parâmetro fundamental do mecanismo global da conexão. As interações poderão ter caráter mecânico ou químico, sendo dependentes das condições em que se encontram as superfícies aderentes. Concomitantemente, as superfícies das barras influenciam diretamente na qualidade da adesão, podendo ser necessário

recorrer a tratamentos mecânicos de forma a providenciar o aumento da superfície aderente. BUCHANAN e BARBER (1996) referem que, o fato das superfícies lisas apresentarem menor área de contato com o adesivo, impede a sua utilização em ligações com barras coladas em madeira. Por conseguinte, RIBERHOLT (1986), BAINBRIDGE *et al.* (2002), MADHOUSHI e ANSELL (2004) e CHANS *et al.* (2010), expõem que as barras de GFRP e CFRP deverão sofrer tratamento mecânico através de lixamento.

BAINBRIDGE *et al.* (2002) alegam que, devido às características da sua superfície, as barras de aço nervuradas possuem uma superfície de contato inferior às barras rosqueadas. Devido a este fato, MOLINA e JÚNIOR (2005) e PIGOZZO e LAHR (2006c) afirmam que as ligações com barras de aço nervuradas coladas em madeira possuem desempenhos inferiores aos das ligações com barras de aço rosqueadas coladas em madeira, uma vez que podem apresentar rupturas por perda de adesão do epóxi na barra. Por conseguinte, CHANS *et al.* (2010) referem que as barras nervuradas necessitam de tratamento na sua superfície para aumentar a superfície aderente ou para melhorar a sua aderência.

Quanto às barras de aço rosqueadas, RIBERHOLT (1986), SERRANO (2001a), CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2013) alegam que a presença da rosca implica no aumento da superfície aderente, excluindo a necessidade de tratamentos superficiais (Chans *et al.*, 2010). TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2013) referem que o tipo de rosca influencia a qualidade da adesão, visto que está diretamente relacionada com a área de contato entre a barra e adesivo. Os mesmos autores referem que a rosca métrica permite uma maior ligação mecânica, além de facilitar a conexão com outros elementos metálicos.

No entanto, YEBOAH, GILBERT e GILFILLAN (2009) expõem que as ligações com barras de aço rosqueadas apresentam concentrações de tensões maiores do que as barras de aço nervuradas na direção paralela às fibras. Os mesmos autores afirmam que as barras de aço nervuradas tendem a provocar rupturas por separação da madeira (Figura 16d), caracterizada pela alta fragilidade.

As barras também poderão ser sujeitas a limpezas químicas, consistindo na ativação das suas superfícies através da aplicação de produtos químicos. PIGOZZO e LAHR (2006a) elaboraram um estudo no qual as superfícies das barras de aço CA-50 possuíam diferentes condições: oxidação com limpeza mecânica e química (aplicação de *thinner* para remoção de resíduos), oxidação sem limpeza mecânica e química, zincagem por imersão a quente, oxidação com limpeza somente química. Os autores concluíram que somente a limpeza química produziu piores resultados de resistência da ligação, tendo obtido os melhores desempenhos mecânicos com o tratamento mecânico e químico. Por outro lado, o mesmo estudo refere que a oxidação sem limpeza e a zincagem por imersão a quente têm pouca influência nas resistências mecânicas das ligações.

Barras de aço galvanizadas dispensam tratamentos químicos para ativação da superfície, uma vez que possuem proteção contra a corrosão (Riberholt, 1986; Chans *et al.*, 2010). No estudo de BENGTTSSON, KEMMSIES e JOHANSSON (2000), no qual foram avaliados diversos defeitos de produção, concluiu-se que as superfícies das barras congeladas ou oleosas não interferem no desempenho mecânico das ligações, no entanto, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) expõem a necessidade de proceder à limpeza das superfícies aderentes de forma a obter a melhor adesão possível.

É pertinente referir que, tanto o processamento mecânico quanto o tratamento químico das superfícies das barras aumentam os custos de produção das ligações (Bainbridge *et al.*, 2002; Pigozzo e Lahr, 2006c).

### 2.6.3 Características mecânicas

Conforme referido, as barras de aço rosqueadas conjugam boa resistência mecânica, ductilidade, disponibilidade no mercado, custo reduzido e possibilidade de garantir uma boa adesão química e mecânica. Neste ponto apenas se incluem as considerações referentes a esta opção de conector.

Para barras de aço rosqueadas, a resistência mecânica é classificada através da sua resistência à tração e pelo seu limite de escoamento (Quadro

2). Se o aço que compõe uma barra rosqueada for de grau 12.9, significa que a sua resistência à tração é de, no mínimo, 1200 MPa e que o seu limite de escoamento é de 90%, portanto 1098 MPa.

Quadro 2. Classes de resistência de barras de aço rosqueado.

<b>Grau</b>	<b>Material e tratamento</b>	<b><math>f_{tk,min}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_y</math> (Mpa)</b>
3,6	Aço carbono	300	180
4,6		400	240
4,8		400	320
5,6		500	300
5,8		500	400
6,8		600	480
8,8	Aço carbono com ou sem aditivos temperado e revenido <sup>7</sup>	800	640
9,8	Aço carbono com ou sem aditivos temperado e revenido	900	720
<u>10,9</u>	Aço carbono martensítico <sup>8</sup> com aditivos temperado e revenido	1000	900
10,9	Aço carbono com ou sem aditivos temperado e revenido	1000	900
	Liga de aço temperado e revenido		
12,9	Liga de aço temperado e revenido	1200	1080

Adaptado de: ISO (2013).

PARIDA, JOHNSON e FRAGIACOMO (2013) estudaram formas de aumentar a ductilidade das ligações coladas com múltiplas barras de aço tendo concluído que, de um modo geral, quanto menor é a tensão de escoamento ( $f_y$ ) da barra rosqueada, maior será a ductilidade da ligação, sendo preferível introduzir várias barras de diâmetros reduzidos em detrimento de poucas

<sup>7</sup> Durante o seu processo de produção, os aços ficam sujeitos à têmpera para aumentar a sua dureza e resistência, através do aquecimento e esfriamento rápido. Por conseguinte são introduzidas tensões internas no aço, tornando-o frágil (Wikipedia, 2005a). Consequentemente, o revenimento consiste em reaquecer o material a uma temperatura inferior à da têmpera, de forma a ser possível corrigir os erros (Wikipedia, 2005b).

<sup>8</sup> Estrutura de ferro e carbono obtida após o processo de têmpera, caracterizada por elevada dureza e fragilidade (Siderurgia Brasil, 2015).

barras com diâmetros superiores. CIMADEVILA, CHANS e GUTIÉRREZ (2013) referem que, quanto maior forem os comprimentos de ancoragem das barras nas ligações coladas, os seus diâmetros e as espessuras dos adesivos, maior poderá ser o grau das barras rosqueadas.

#### 2.6.4 Geometria

##### 2.6.4.1 Diâmetro

Os diâmetros das barras mais utilizados são 12 mm e 24 mm (Bengtsson, Kemmsies e Johansson, 2000; Pigozzo e Lahr, 2006c).

Existem divergências quanto às interferências do diâmetro da barra na resistência das ligações com barras coladas em madeira, justificadas pelo fato de existirem diversas abordagens e pela complexidade do comportamento das ligações (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011). BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) e PIGOZZO e LAHR (2006c) referem que o diâmetro das barras não é preponderante na resistência da ligação, embora interfira na distribuição do esforço de cisalhamento (Broughton e Hutchinson, 2001b; Pigozzo e Lahr, 2006c; Yeboah, Gilbert e Gilfillan, 2009).

No estudo de CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009), no qual foram utilizadas barras com diâmetros de 8 mm, 10 mm e 12 mm, não foram encontradas interferências na capacidade de carga da ligação. No entanto, os estudos de FELIGLIONI *et al.* (2003), CIMADEVILA, RODRÍGUEZ e CHANS (2007) e CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008), revelaram que a resistência mecânica das ligações foi influenciada pela variação do diâmetro das barras. No caso das normas de dimensionamento e da Equação (2), é possível verificar que a capacidade de carga da ligação é proporcional ao diâmetro da barra.

Quanto menor for o diâmetro, menor será a uniformidade da distribuição dos esforços de cisalhamento na linha de colagem (Serrano, 2001a). A diminuição do diâmetro da barra também resulta na diminuição da rigidez da ligação (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009; Fueyo *et al.*, 2009; Xu, Bouchaïr e Racher, 2015) e no aumento da ductilidade (Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2008; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009). PARIDA, JOHNSON e

FRAGIACOMO (2013) referem que apenas é possível obter um comportamento dúctil através da utilização de barras de diâmetros inferiores a 20 mm e grau 6.8.

#### 2.6.4.2 Ângulo em relação às fibras da madeira

Existem divergências quanto à influência da inclinação das barras em relação às fibras. Alguns estudos referem que as resistências das ligações com barras posicionadas perpendicularmente às fibras da madeira foram menores do que no caso em que se encontram paralelas (Gustafsson e Serrano, 2001), sendo que também é possível verificar conclusões de estudos que afirmam o contrário (Faye *et al.*, 2003; Pigozzo e Lahr, 2006c; Widmann, Steiger e Gehri, 2007). No seu estudo, YEBOAH, GILBERT e GILFILLAN (2009) afirmaram que a inclinação das barras não reduziu significativamente a resistência da ligação. Todavia, TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) afirmam que a inclinação das barras em relação às fibras da madeira deverá ser sempre minimizada.

Barras de aço inclinadas entre 0° e 90° provocam menos ancoragem na madeira (Ceccoti, 1995), menos rachaduras, aumentam a resistência ao cisalhamento da madeira e possuem baixas deformações (Madsen, 1996). No caso das ligações com barras perpendiculares às fibras, estas apresentam deslocamentos acentuados (Miotto, 2009; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2014). PIGOZZO e LAHR (2006c) afirmam que a rigidez das ligações inclinadas aumenta de 2 a 10 vezes quando comparadas aos casos com barras perpendiculares às fibras e que este aspecto depende do diâmetro.

Segundo CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2014), a influência da variação do ângulo de inclinação entre as barras e as fibras da madeira ( $\theta$ ) depende de  $L$ . Nos casos em que a barra se encontra perpendicular às fibras, o diâmetro e tipo da barra não interferem na resistência mecânica, sendo que esta varia linearmente com o  $L$  (Yeboah, Gilbert e Gilfillan, 2009). No entanto, quando a barra está posicionada paralelamente às fibras, os parâmetros  $d$ ,  $L$  e o tipo da barra afetam significativamente a resistência (Yeboah, Gilbert e Gilfillan, 2009).

TLUSTOCHOWICZ et al. (2011) referem que a consideração de  $\theta$  poderá ser confundida com a introdução de uma excentricidade da solitação. Este fato pode conduzir a considerações incorretas uma vez que a excentricidade da solitação implica na alteração das condições de contorno e do modo de carregamento. Neste caso, as comparações entre as resistências mecânicas das ligações com barras coladas paralelamente ou perpendicularmente às fibras poderão não ser corretas.

#### 2.6.4.3 Número de barras

A maioria dos estudos apresentam CP's com barras isoladas, atendendo à necessidade de diminuir a complexidade do estudo das ligações estruturais com várias barras. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) referem que a resistência mecânica da ligação com duas barras na mesma face é quase o dobro da capacidade de carga das ligações com apenas uma barra. BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b) afirmam que o aumento do número de barras, provoca uma maior distribuição e uniformidade dos esforços ao longo do comprimento de ancoragem.

Conforme referido, em ligações com múltiplas barras, é necessário considerar a ductilidade da ligação através da instalação de várias barras de diâmetros reduzidos, ao invés da utilização de um menor número de barras com diâmetros maiores, uma vez que a concentração de esforços é mais acentuada neste caso (Fueyo *et al.*, 2009; Xu, Bouchaïr e Racher, 2015).

Em todo o caso, segundo FUEYO *et al.* (2009), o número de barras depende da seção transversal do elemento de madeira, uma vez que, em ligações com várias barras,  $a_1$  e  $a_2$  estão condicionados aos limites apresentados no subitem 2.4.2. Além de ser dependente do tipo de solitação, o número de barras também é dependente das condicionantes financeiras, uma vez que, quanto maior o número de barras, maior será a quantidade de aço e adesivo aplicados.



#### 2.6.4.4 Comprimento de ancoragem

Uma vez que  $L$  e  $d$  permitem determinar a área de contato entre a madeira e o adesivo, é comum encontrar formulações numéricas que consideram estes parâmetros (ou  $\lambda$ ) para determinar a resistência mecânica da ligação (Tlustochowicz, Serrano e Steiger, 2011).

Várias formulações numéricas das normas e dos estudos científicos demonstram que a resistência mecânica da ligação é diretamente proporcional  $L$  (Pigozzo e Lahr, 2006c; Chans, Cimadevila e Gutiérrez, 2009; Stepinac *et al.*, 2013). BROUGHTON e HUTCHINSON (2001b), ROSSIGNON e ESPION (2008) e LING *et al.* (2014) também admitem que a capacidade de carga da ligação tende a aumentar linearmente com o aumento de  $L$ .

YEBOAH, GILBERT e GILFILLAN (2009) referem que a relação entre a resistência da ligação com  $L$  é quase linear. CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008), CHANS *et al.* (2010) e MARTÍN, ESTÉVEZ e OTERO (2013) afirmam em seus estudos que os ganhos de resistência mecânica das ligações não são proporcionais ao aumento de  $L$ .

BROUGHTON e HUTCHINSON (2001c) verificaram em seu estudo que a resistência da ligação apenas aumenta linearmente a partir de valores de  $L$  iguais a 40 mm. CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009) referem que apenas existem ganhos de resistência até valores de  $L$  iguais a  $10d$ . Porém, CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2013) afirmam que a partir de  $15d$  para madeiras com densidade baixa e  $18d$  para madeiras com densidade elevada, não são registrados acréscimo de resistência. PIGOZZO e LAHR (2006c) expõem que o comprimento de ancoragem deverá variar entre  $5d$  e  $20d$ . BUCHANAN e DENG (1996), por sua vez, afirmam que o comprimento de ancoragem não deverá ser superior a  $20d$ . Já a norma DIN 1052:2004 estipula que o comprimento de ancoragem mínimo deverá ser superior a  $10d$  ou  $0.5d^2$ . No Quadro 3 encontram-se resumidos os valores máximos e mínimos de  $L$  presentes na bibliografia.

Quadro 3. Resumo dos valores limites de  $L$ .

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b><math>L_{\min}</math></b>	<b><math>L_{\max}</math></b>
Buchanan e Deng	1996	-	$20d$
Pigozzo e Lahr	2006	$5d$	$20 d$
DIN 1052	2008	máx. entre $10d$ e $0,5d^2$	-
Chans, Cimadevila e Gutiérrez	2009	-	$10 d$
Chans, Cimadevila e Gutiérrez	2013	-	$15d$ (madeira com densidade baixa)
			$18d$ (madeira com densidade elevada)

Fonte: O autor

SERRANO (2001a) e CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009) afirmam que o aumento de  $L$  implica em picos de tensão de cisalhamento nas extremidades da barra maiores. CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2009) afirmam que não existe influência de  $L$  na rigidez da ligação e que as deformações são pouco afetadas. FUEYO *et al.* (2009) afirmam que  $L$  deverá ser superior aos comprimentos das regiões dos elementos estruturais nas quais se verificam concentrações de esforços críticas.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais e geometria dos CP

Os tipos de madeira escolhidos foram madeira jovem<sup>9</sup> de *Citriodora* (*Corymbia Citriodora*) e Maçaranduba (*Manilkara spp*), cedidas pelas empresas CM Venturoli e Madeireira Victória, respectivamente. A madeira de *Citriodora* se encontrava estocada na carpintaria da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA) por um período de cerca de sete anos, enquanto que, a Maçaranduba foi entregue no dia 7 de abril de 2015.

Segundo IPT (2009), *Citriodora* é uma espécie de árvore originária do leste da Austrália, pertencente ao gênero *Corymbia*<sup>10</sup> à família *Myrtaceae*. No Brasil, a madeira de *Citriodora* provém de culturas de reflorestamento, ocorrendo com maior frequência nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Maranhão, Pernambuco e Paraíba. Possui cerne pardo e alburno branco-amarelado, ambos sem brilho, cheiro e gosto. A sua densidade é elevada, o que se reflete na dificuldade em cortar a sua madeira e na resistência ao apodrecimento, no entanto é susceptível à atividade de seres xilófagos. A sua secagem é difícil, pelo que deverá ser realizada de forma lenta, caso contrário, poderá resultar em rachaduras, empenamentos ou até mesmo o colapso.

Segundo IPT (2015b), a Maçaranduba pertence ao grupo de espécies de árvores do gênero *Manilkara*, estando englobado na família das *Sapotaceae*. No Brasil, é possível verificar a sua ocorrência nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rondônia e Santa Catarina. O seu cerne é vermelho, variando de claro a escuro, e sem brilho. A sua densidade é elevada, o que dificulta o seu corte. Possui resistência ao ataque de seres xilófagos e fungos.

---

<sup>9</sup> Com oito anos de idade antes do corte da árvore.

<sup>10</sup> HILL e JOHNSON (1995) apresentaram fundamentações para a alteração de *Eucalyptus* para *Corymbia*, passando a designar-se *Corymbia Citriodora*. Neste trabalho a espécie será somente designada por *Citriodora*.

A sua secagem deverá ser realizada de forma lenta e controlada em estufa, uma vez que poderá sofrer rachaduras, empenamentos e endurecimento superficial.

A escolha destas espécies também foi fundamentada pela exposição de CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008), na qual é referida a existência de poucos estudos de ligações com barras de aço rosqueadas coladas em madeira com massa específica elevada. Além disso, a escolha destas duas espécies também se deve às suas disponibilidades no Estado da Bahia e à frequência de utilização em estruturas de madeira. Outro motivo que justifica a escolha da Citriodora é o fato desta espécie ser proveniente de cultivos de reflorestação e de possuir crescimento rápido.

As barras eram compostas por aço galvanizado de médio carbono, com resistência à tração de 422 MPa, ¼” (6,3mm) de diâmetro e rosca UNC-20. Esta escolha é justificada pelo fato de existirem poucos estudos que recorrem à utilização de barras com diâmetros inferiores a 8 mm. A escolha das barras rosqueadas possibilita melhor aderência do adesivo, uma vez que a rosca apresenta maior superfície aderente, o que melhora a transferência de cargas entre o adesivo e a barra, devido à existência de uma interação predominantemente mecânica (Chans *et al.*, 2010). Este fato dispensa o beneficiamento mecânico ou tratamentos químicos das barras rosqueadas, ao contrário do que é recomendado para barras lisas. A galvanização favorece a proteção da barra contra a oxidação, o que poderia reduzir a resistência mecânica da barra (Molina e Júnior, 2005; Pigozzo e Lahr, 2006b).

O adesivo utilizado foi o epóxi *Compound* de média viscosidade bi-componente, oferecido pela *Vedacit*. A escolha do EPX é justificada por este adesivo possuir maior resistência mecânica, menor retração durante a cura, possuir maior Tg e maior tolerância às variações dimensionais causadas pela temperatura e umidade. A resina EPX é um polímero termofixo que apresenta alta resistência mecânica, baixa retração, alta adesão a substratos, isolamento elétrico, baixa toxicidade e resistência química (Boyle, Martin e Neuner, 2001). É fornecido sob a forma de pré-polímero que endurece através da sua mistura com um catalisador (Epóxi, 2015). Segundo informações da Vedacit, a resina

*Compound* possui cor branca e o catalizador apresenta cor preta, sendo composto por poliamina. O seu processo de cura ocorre através de uma reação química exotérmica entre a epiclóridrina e bisfenol-a (Epóxi, 2015).

$L$  foi escolhido como variável de estudo para analisar a evolução do comportamento mecânico da ligação. O interesse do estudo de  $L$  é fundamentado pela necessidade de verificar a consistência dos resultados obtidos através das formulações numéricas presentes nos estudos científicos e nas normas de dimensionamento.  $L$  também está diretamente relacionado com a quantidade de defeitos de crescimento da madeira de *Citriodora*, uma vez que, quanto maior o seu valor, maior será a dificuldade de evitar a inclusão de anomalias nos CPs devido ao aumento das dimensões dos blocos de madeira.

O intervalo dos valores de  $L$  foi definido entre  $5,0d$  e  $22,5d$ , com incrementos de  $2,5d$ , resultando em oito séries de cada espécie de madeira. A escolha de oito séries de  $L$  é devido à necessidade de se obter uma maior resolução da variação do comportamento mecânico da ligação com a variação de  $L$ . Optou-se por realizar seis repetições por cada série para cumprir com o requisito de caracterização simples de uma amostra, preconizado na norma NBR 7190.

Os valores de  $L$  foram escolhidos em conformidade com as boas práticas de projeto, de forma a se obter modos de ruptura por escoamento das barras. O valor mínimo de  $L$  igual a  $5,0d$  corresponde ao valor mais baixo apresentado por PIGOZZO e LAHR (2006c), não sendo interessante o estudo da resistência para valores inferiores. Valores reduzidos de  $L$  tendem a produzir maiores concentrações de tensões, o que reduz a resistência mecânica da ligação e produz modos de ruptura por cisalhamento da madeira, o que não garante o comportamento dúctil da ligação. O valor máximo de  $L$  ( $22,5d$ ) é justificado pela necessidade de avaliar os ganhos de resistência acima dos valores informados no Quadro 3 e para avaliar eventuais influências dos defeitos de crescimento da madeira. Conforme será discutido em 4.1.5, a quantidade de nós aumenta proporcionalmente com o aumento das dimensões do CP.

Foi estipulado um valor de  $b$  igual a  $2,78d$  para evitar que a resistência da ligação fosse condicionada pela ruptura por separação da madeira (Figura 16Figura 16d), atendendo ao fato de que este modo de ruptura possui um modo de fratura frágil, não é indicado para questões de dimensionamento. Por outro lado, quanto menor for o valor de  $b$ , maior será a exposição do adesivo aos efeitos da temperatura e da umidade, o que é prejudicial à estabilidade do desempenho da ligação.

Em relação à espessura do adesivo, foi adotado o valor de 0,85 mm, para minimizar eventuais efeitos da retração durante a cura da resina. Além disso, este valor de espessura permite aumentar a resistência mecânica da ligação em relação à fadiga (Madhoushi e Ansell, 2004) e favorece a economia de material sem comprometer a resistência da ligação. Finalmente, o valor de 0,85 mm está em conformidade com os intervalos de valores sugeridos por TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), apresentados na Tabela 3.

A identificação dos CPs foi realizada através da espécie de madeira (E para Citriodora e M para Maçaranduba), o número da série e o número da repetição, conforme apresentado na Figura 23. No Quadro 4 se encontram todas as nomenclaturas das séries e as dimensões dos CPs.



Figura 23. Exemplo de identificação dos CP (Fonte: O autor).

Quadro 4. Geometria e nomenclaturas dos CPs.

Série	Seção transversal (cm x cm)	L (cm)	d (mm)	$\lambda$	D (mm)	Citriodora	Maçaranduba
1	3,5 x 3,5	3,2	6,3	5,0	8,0	E1-x	M1-x
2	3,5 x 3,5	4,7	6,3	7,5	8,0	E2-x	M2-x
3	3,5 x 3,5	6,3	6,3	10,0	8,0	E3-x	M3-x
4	3,5 x 3,5	7,9	6,3	12,5	8,0	E4-x	M4-x
5	3,5 x 3,5	9,5	6,3	15,0	8,0	E5-x	M5-x
6	3,5 x 3,5	11,0	6,3	17,5	8,0	E6-x	M6-x
7	3,5 x 3,5	12,6	6,3	20,0	8,0	E7-x	M7-x
8	3,5 x 3,5	14,2	6,3	22,5	8,0	E8-x	M8-x
TESTE	3,5 x 3,5	14,2	6,3	22,5	8,0	ET-x	-

Fonte: O autor

Nota: x representa o número do CP dentro da série de seis repetições.

### 3.2 Ensaios preliminares

Conforme referido no capítulo 2, não existe uma padronização de metodologias de ensaio e de execução de CPs. Atendendo à necessidade de adotar os melhores procedimentos de execução dos CPs e de estipular os procedimentos de ensaios, criou-se uma série de ensaios preliminares denominada “TESTE” (ET-x).

Nesta série de CPs foram confeccionadas oito unidades com características geométricas iguais à série E8-x, devido ao fato desta série possuir as maiores dimensões e, por conseguinte, permitir antever dificuldades inerentes à execução e procedimentos de ensaio.

### 3.3 Estocagem, 1ª medição da umidade, corte e furação das madeiras

Segundo IPT (2009), o teor de umidade médio das madeiras para a cidade de Salvador é de 15,6%, podendo variar durante as estações do ano. O período durante o qual se procedeu à campanha experimental (abril e maio de

2015) foi caracterizado por precipitação anormalmente elevada. Uma vez que a Maçaranduba foi entregue durante um período de grande pluviosidade (Figura 24) e devido ao fato de ter sofrido a incidência direta da chuva, houve a necessidade de estocar esta madeira em local ventilado e protegido das intempéries (Figura 25) durante um período de 3 semanas.

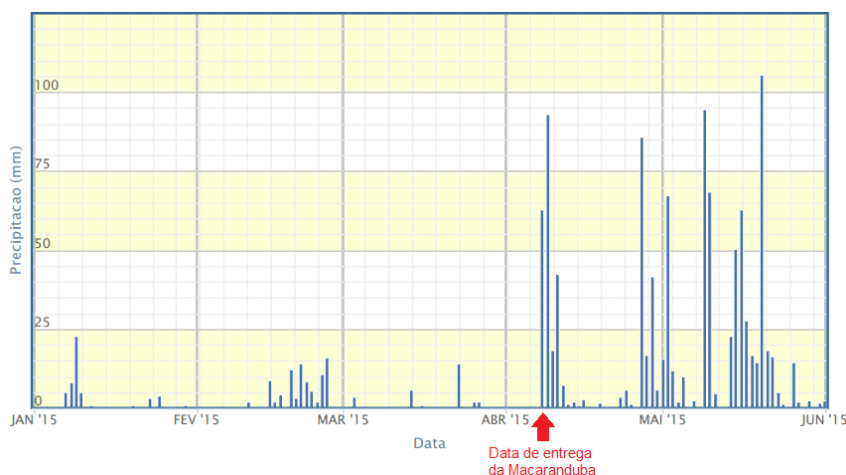


Figura 24. Precipitação no período de ensaio (Adaptado de: INMET, 2015a).

Após as madeiras terem sido cortadas conforme as dimensões apresentadas no Quadro 4, com a maior dimensão no sentido paralelo às fibras da madeira, procedeu-se à medição do teor de umidade com um xilohigrômetro de contato, de forma a se obter uma noção preliminar do teor de umidade da madeira e para avaliar a adequabilidade da madeira. A escolha do xilohigrômetro de contato em detrimento do xilohigrômetro de perfuração, foi devido à necessidade de não introduzir concentrações de esforços nos blocos de madeira, uma vez que poderia causar diminuições de resistência mecânica das ligações.

A medição do teor de umidade foi realizada em dois blocos de madeira em simultâneo (Figura 26). O equipamento utilizado foi um xilohigrômetro de contato da Digisystem, modelo DUC 2050 (Figura 27). Foi adotada uma metodologia de recolha de dados em dois blocos simultaneamente, devido às medições em um CP apresentarem valores de teor de umidade inferiores em cerca de 4%. Isto ocorreu pelo fato da placa de contato do xilohigrômetro



possuir uma largura de 5,1 cm, sendo superior à largura dos CPs (3,5cm), conforme demonstrado na Figura 28.

Foram realizadas medições de teor de umidade nas maiores faces dos blocos de madeira, totalizando quatro medições por CP. Posteriormente foi calculado o valor médio do teor de umidade para cada CP -  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ . É relevante considerar que o xilohigrômetro de contato apenas fornece os dados dos teores de umidade na superfície do CP, que poderão ser diferentes aos valores presentes nas regiões de colagem.



Figura 25. Estocagem da madeira de Maçaranduba (Fonte: O autor).



Figura 26. Medição da umidade do CP (Fonte: O autor).



Figura 27. Xilohigrômetro de contato (Fonte: O autor).



Figura 28. Placa do xilohigrômetro de contato (Fonte: O autor).

Depois da primeira medição do teor de umidade com o xilohigrômetro de contato, as madeiras foram furadas conforme as dimensões dos comprimentos de ancoragem presentes no Quadro 4, recorrendo a uma furadeira de bancada vertical da marca Helmo, modelo FBE-16. A furadeira é acionada através de um motor de monofásico da Eletromotores WEG, S. A., modelo C560884, com 1720 rotações por minuto, voltagem igual a 110/220v e com potência de  $\frac{1}{2}$  hp (Figura 29).

Os blocos de madeira foram devidamente nivelados e fixos à bancada da furadeira através da utilização de sargentos. Devido à limitação de curso da furadeira, os furos superiores a 8 cm de comprimento foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, a furação era realizada até 8 cm de profundidade e, na segunda etapa, os blocos de madeira foram erguidos de forma a broca ficar embutida 8 cm no CP, com posterior complementação da furação até atingir o comprimento desejado.

Durante a furação dos blocos de madeira foram verificados desvios dos furos em relação ao eixo longitudinal das peças e a existência de folga no mandril. Constatou-se em três CPs de Maçaranduba que os furos atravessaram completamente as faces (Figura 30), tendo sido descartados. Os casos nos quais não se verificou o rompimento da face externa pela broca,

foram mantidos para verificar a influência da inclinação da barra de aço no comportamento da ligação.



Figura 29. Furação dos blocos de madeira (Fonte: O autor).



Figura 30. Blocos de madeira inutilizados (Fonte: O autor).

Após a execução dos furos, foi realizada a limpeza dos mesmos através da aplicação de um jato de ar comprimido (Figura 31). Este processo se justifica pela necessidade de eliminar partículas de pó de serra, que poderiam constituir pontos fracos de adesão, uma vez que a sua vinculação ao restante bloco é nula. Atendendo ao fato de que o afloramento de substâncias extrativas da madeira poderia afetar a adesão, a colagem foi efetuada no menor espaço de tempo (um dia) possível após a furação.



Figura 31. Limpeza do furo da madeira (Fonte: O autor).

### 3.4 Preparação e inserção do adesivo

Para a utilização do adesivo, foram misturados os componentes A e B em proporções iguais, recorrendo ao auxílio de uma balança de precisão, da marca Scientech, modelo ESL 1000 (Figura 32). Durante a execução das ligações da série ET-x, foi realizada a introdução do adesivo diretamente no furo com o auxílio de uma seringa descartável com capacidade de 60 ml. Devido à viscosidade do adesivo, a injeção direta da resina resultava no aprisionamento do ar no orifício, o que impedia o preenchimento total do furo.

Para contornar este problema, foi necessário criar um sistema de bombeamento do epóxi que permitisse que o adesivo atingisse a extremidade inferior do furo. Este sistema era composto por uma seringa de 60 ml acomplado a um tubo de acrílico (caneta BIC) através de um encamisamento no seu topo constituído por um pedaço de canudo selado com fita durex, conforme apresentado na Figura 33.



Figura 32. Mistura dos componentes do epóxi (Fonte: O autor).

O preenchimento do furo na madeira foi realizado por intermédio de sucessivos ciclos de injeção de epóxi. Cada ciclo consistiu na sucção do epóxi até preencher o tubo de acrílico (Figura 34). Na sequência, se introduzia o tubo no furo com posterior injeção de epóxi (Figura 35). Depois da aplicação do adesivo, o sistema foi limpo com solvente de epóxi através da aplicação de dez bombeamentos para minimizar o acúmulo de solvente no tubo de injeção (Figura 36). A limpeza do sistema teve como objetivo reduzir as interferências

do solvente na formulação química do epóxi. Segundo informações da *Vedacit*, o solvente de epóxi é constituído por hidrocarbonetos e possui densidade de 0,85 g/m<sup>3</sup>.

A limpeza do sistema em todos os ciclos foi justificada pela necessidade de remover resíduos de epóxi localizados nas paredes do sistema. O volume de epóxi residual que permanecia nas paredes do tubo provocava o aumento da dificuldade de bombeamento, reduzindo a velocidade de execução e aumentando a duração do processo, o que ocasionou, por vezes, a inutilização da resina.

Segundo informações da *Vedacit*, o tempo máximo de utilização do epóxi desde a mistura dos bi-componentes é de 50 minutos, no entanto foi verificado que, cerca de 30 minutos após a mistura dos componentes A e B, a trabalhabilidade da resina era bastante reduzida. Apesar deste fato, optou-se por investigar os efeitos inerentes à injeção do epóxi com baixa trabalhabilidade, uma vez que esta situação poderá ocorrer *in situ*.



Figura 33. Sistema de bombeamento do adesivo (Fonte: O autor).



Figura 34. Sucção do epóxi (Fonte: O autor).



Figura 35. Injeção do epóxi no furo (Fonte: O autor).



Figura 36. Limpeza do sistema de bombeamento (Fonte: O autor).

### 3.5 Processamento e inserção das barras

Atendendo ao fato de que as barras de aço possuíam um metro de comprimento, foi necessário proceder ao corte, com posterior desbaste das pontas (Figuras 37 e 38) de forma a permitir a introdução nos furos e evitar lesões nas mãos durante a execução dos CPs. O comprimento final das barras cortadas ( $L_b$ ) era composto pela soma do valor de  $L$  com  $L_e$ , sendo este último parâmetro igual a 10 cm, de forma a possibilitar a fixação do CP nas garras do equipamento de ensaio. Os valores de  $L$  estão apresentados no Quadro 4.





Figura 37. Extremidades das barras após o corte (Fonte: O autor).



Figura 38. Desbaste das pontas das barras (Fonte: O autor).

A galvanização do aço é um tratamento superficial que impede a ação da corrosão. Conseqüentemente, o corte e desbaste das barras de aço provocou a remoção dessa proteção. Como consequência, foi verificada a oxidação do material, apesar das barras terem sido introduzidas nos furos um dia após o seu processamento. Para elucidar o leitor acerca da intensidade da atividade corrosiva, a Figura 39 mostra a extremidade de uma barra de aço rosqueada oxidada com nove dias após o seu corte.

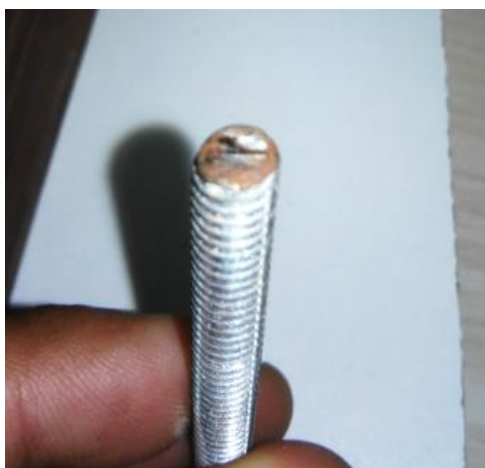


Figura 39. Oxidação nas pontas das barras (Fonte: O autor).

As barras de aço foram introduzidas no adesivo de forma rotatória e no sentido da rosca (rotação no sentido horário), de forma a não criar bolhas de ar e, conseqüentemente, maximizar a área de contato entre o epóxi e a barra de

aço. Após a inserção das barras, procedeu-se à remoção do excesso de adesivo na superfície do bloco de madeira (Figura 40). Finalmente, os CP foram mantidos em um suporte previamente construído, durante o período mínimo de cura do adesivo de sete dias, conforme recomendações do fabricante do epóxi, de forma a que as barras não se deslocassem para fora do furo (Figura 41).



Figura 40. Remoção do excesso de epóxi (Fonte: O autor).



Figura 41. Cura do adesivo no suporte (Fonte: O autor).

### 3.6 Defeitos externos dos CPs

Devido ao fato de várias barras se encontrarem enviesadas, em relação ao eixo do bloco de madeira, foi necessário quantificar e catalogar os ângulos de inclinação das barras em relação às fibras da madeira ( $\theta$ ), para tal, foi adotada a numeração das faces dos blocos de madeira, apresentada na Figura 42. Com o auxílio de um suporte com transferidor e de um dispositivo de captação de imagens digitais, os CPs foram fotografados nas quatro posições de cada extremidade (Figuras 43 e 44), totalizando oito registros por CP e contabilizando um total de 768 registros fotográficos.

Recorrendo ao *software Meazure*, produzido pela *C Thing Software*, foi possível quantificar  $\theta$  dos CPs (Figura 45). Também foram fotografadas todas as seis faces dos CPs com o intuito de catalogar a presença de defeitos na madeira, tais como nós, bolsas de resina, presença de medula e rachaduras de secagem, contabilizando um total de 576 registros fotográficos.



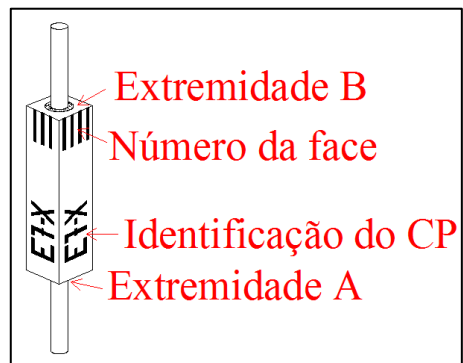


Figura 42. Sistema de referência dos CP (Fonte: O autor).



Figura 43. Medição de  $\theta$  do CP M8-4 - visão geral (Fonte: O autor).

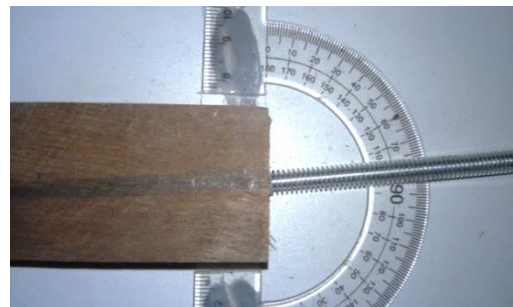


Figura 44. Medição de  $\theta$  do CP M6-1 - visão aproximada (Fonte: O autor).

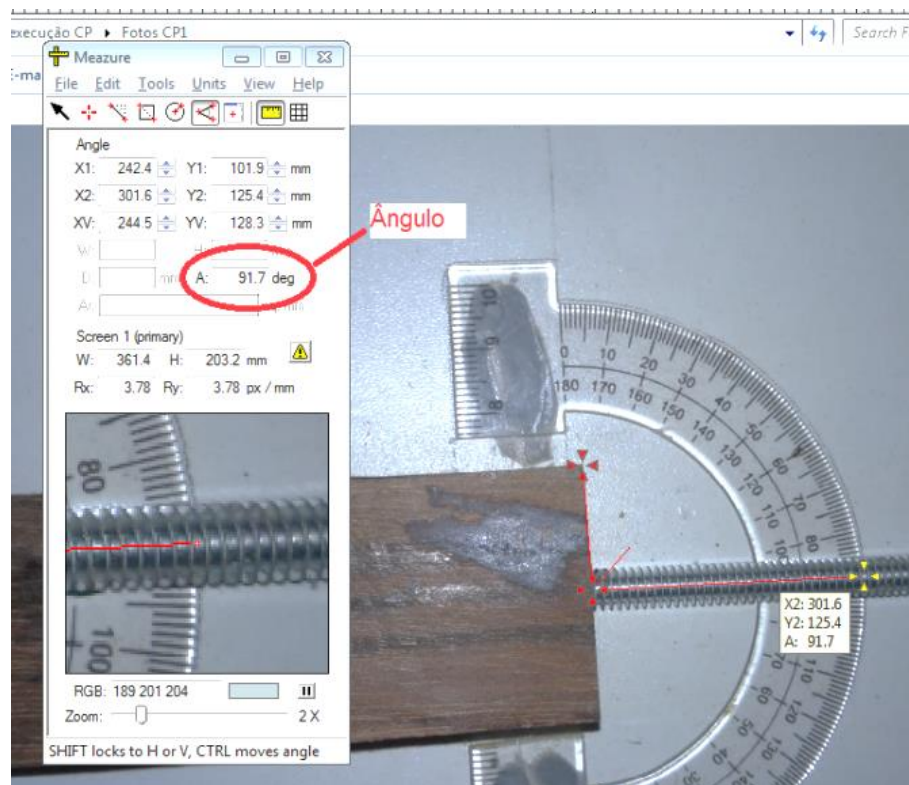


Figura 45. Medição de  $\theta$  no software *Meazure* (Fonte: O autor).

### 3.7 2ª medição da umidade e ensaio das ligações

O teor de umidade dos CPs foi novamente medido imediatamente antes de serem submetidos aos ensaios de tração ( $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ ), com o intuito de se registrar eventuais variações de umidade. Os procedimentos utilizados para a medição do teor de umidade foram mantidos e estão referenciados no subitem 3.3.

Os ensaios das ligações decorreram entre os dias 20 e 25 de maio de 2015, numa máquina universal Instron 1000 HDX, com célula de carga de 1000 kN (Figura 46), sob uma velocidade de 50 N/seg, ajustada durante a fase de ensaios preliminares com a série ET-x. Com esta taxa de aplicação de carga foi possível obter durações totais de ensaios de  $5 \pm 2$  minutos (entre o início do ensaio e o momento da ruptura total da ligação), conforme as disposições para ensaios de curta duração, preconizadas na norma EN 408: *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties* (CEN, 2011). Nos casos em que não foi possível proceder à fixação dos CPs nas garras do equipamento de ensaio, devido à inclinação das barras, foi necessário recorrer a um torno para efetuar a correção da barra, conforme apresentado na Figura 47.



Figura 46. Ensaio de tração em CP  
(Fonte: O autor).



Figura 47. Dobramento da barra do CP  
(Fonte: O autor).

Através dos ensaios de tração, foram obtidos gráficos carga x extensão, os valores da força e extensão na ruptura, a duração total do ensaio e o instante no qual ocorre o limite de proporcionalidade.

### **3.8 Defeitos internos e 3ª medição da umidade**

Depois da realização dos ensaios de tração, os CPs foram cortados transversalmente às fibras. Os CPs das séries E1-x, E2-x, M1-x e M2-x foram cortados no meio dos blocos de madeira, uma vez que os seus comprimentos não permitem a divisão em três segmentos iguais sem que as barras sejam atingidas. Os demais CPs foram divididos em três blocos de menores dimensões, de forma a permitir o aproveitamento do trecho central para os ensaios de determinação  $\rho_{bás}$  e do teor de umidade através da secagem em estufa ( $U_{estufa}$ ), conforme será exposto no próximo subitem.

Para a realização do registro fotográfico dos defeitos de colagem das ligações, as extremidades dos CPs foram abertas com o auxílio de um formão e de um malho de madeira, conforme apresentado na Figura 48. Recorrendo a um dispositivo de captação de imagem, foi realizado o registro e catalogamento dos defeitos de colagem presentes nas linhas de colagem (Figura 49) assim como de vestígios de combustão ocorrida durante a furação dos blocos de madeira.



Figura 48. Abertura das extremidades dos CPs (Fonte: O autor).



Figura 49. Registro fotográfico de defeitos de colagem (Fonte: O autor).

Simultaneamente ao registro fotográfico, procedeu-se à medição do teor de umidade dos CPs recorrendo a um xilohigrômetro de perfuração da marca Digisystem, modelo DL 200. Foram realizadas quatro medições junto a cada linha de colagem ( $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ ) em todos os CPs, conforme apresentado na Figura 50, obtendo-se um total de 768 medições.



Figura 50. Medição da umidade junto à linha de colagem (Fonte: O autor).

Para avaliar a consistência das medições dos teores de umidade com o xilohigrômetro de contato e a proximidade com os valores medidos junto à linha de colagem, foram realizadas quatro medições do teor de umidade nas faces externas ( $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ ) de cada extremidade dos CPs. Foram utilizadas as séries E6-x, E7-x, E8-x, M6-x, M7-x e M8-x, correspondente a 37,5% do total de CPs, totalizando 288 medições.

### 3.9 4ª e 5ª medições da umidade e densidades aparente e básica

Para proceder à 4ª e 5ª medições do teor de umidade e às medições das densidades aparente ( $\rho_{\text{ap}}$ ) e básica ( $\rho_{\text{bás}}$ ) das madeiras, foram escolhidos aleatoriamente três segmentos centrais dos CPs das séries com  $L$  superior a  $7,5d$ , totalizando 36 CPs.

As massas dos segmentos centrais dos CPs foram aferidas em uma balança de precisão da marca *BEL* e modelo L2102i. Os comprimentos das arestas dos CPs foram medidos com o auxílio de um paquímetro. O volume dos CPs foi calculado através das médias de cada direção ortogonal do CP. O valor de  $\rho_{\text{ap}}$  foi calculado através da Equação (4), onde  $m$  e  $V$  são, respectivamente a massa (kg) e o volume ( $\text{m}^3$ ).  $\rho_{\text{ap}}$  é expresso em ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$$\rho_{ap} (\%) = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Os mesmos segmentos centrais dos CPs foram submetidos à medição do teor de umidade com xilohigrômetro de contato ( $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ ), seguindo os procedimentos descritos em 3.3.

Para a determinação de  $U_{\text{estufa}}$ , foi seguida a metodologia adaptada da norma NBR 7190. Para este ensaio foram selecionados 50% dos blocos intermédios dos CPs das séries com  $L$  acima de  $7,5d^{11}$ . Os CPs, cujas dimensões (em cm) estão presentes na Figura 51 foram sujeitos à secagem em estufa com temperatura de  $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Durante o tempo de secagem, as massas dos CPs foram medidas na balança supracitada, em intervalos de oito horas, ao invés das seis horas, determinadas pela norma NBR 7190. Segundo as disposições da norma, o ensaio termina quando a diferença entre as massas dos CPs for inferior a 0,5%. Posteriormente, o teor de umidade ( $U$ ) foi calculado recorrendo à Equação (5), onde  $m_i$  é a massa inicial e  $m_s$  é a massa após secagem, sendo ambas medidas em gramas.

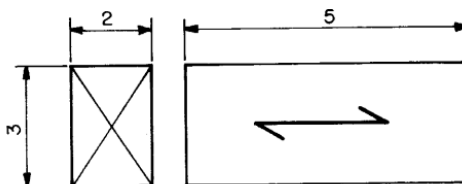


Figura 51. Dimensões dos CPs para  $\rho_{\text{bás}}$  e  $U_{\text{estufa}}$  (ABNT, 1997).

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Para a determinação de  $\rho_{\text{bás}}$ , os CPs foram imersos em água (Figura 52). As massas dos CPs foram medidas de 12 em 12 horas até a haver uma

---

<sup>11</sup> Foram selecionadas as séries 3, 4, 5, 6, 7 e 8 das madeiras de Citriodora e de Maçaranduba. As séries 1 e 2 foram excluídas, uma vez que as dimensões dos CPs, preconizadas na NBR 7190, são incompatíveis com as dimensões dos CPs de ligações dessas séries.



variação inferior a 0,5%, sendo posteriormente efetuadas medições de todas as arestas dos CPs, necessárias para o cálculo das densidades básicas através da Equação (6), onde  $\rho_{bás}$  é a densidade básica (em kg/m<sup>3</sup>),  $m_s$  é a massa após secagem (em kg) e  $V_{sat}$  é o volume do CP após a sua saturação (em m<sup>3</sup>).



Figura 52. Saturação dos CPs em água (Fonte: O autor)

$$\rho_{bás} (\%) = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (6)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Características físico-mecânicas das madeiras

#### 4.1.1 Teores de umidade

Conforme referido, foram realizadas medições do teor de umidade com o xilohigrômetro de contato no momento da colagem ( $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ), imediatamente antes do ensaio de tração dos CPs das ligações com barras coladas em madeira ( $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ ) e no início do ensaio de secagem em estufa ( $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ ).

Tomando o momento da colagem das barras como dia “zero” do CP, o tempo decorrido entre as medições de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  e os resultados médios das medições dos teores de umidade encontram-se na Tabela 4. Os valores de todas as medições encontram-se em Anexos (Tabelas de A – 1 a A - 9).

Tabela 4. Intervalos de tempo e valores médios de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ .

Série	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$		$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$		$U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$	
	(%)	Dia	(%)	Dia	(%)	Dia
E1-x	17,26	0	18,07	13	17,89	23
E2-x	16,66	0	17,18	13	18,22	23
E3-x	18,40	0	17,94	14	16,89	24
E4-x	17,44	0	17,96	14	17,58	24
E5-x	17,76	0	18,33	16	17,00	26
E6-x	15,95	0	16,30	16	15,95	26
E7-x	16,53	0	17,59	17	16,35	27
E8-x	17,62	0	17,50	21	17,88	31
Média	17,20	-	17,61	-	17,22	-
M1-x	19,53	0	19,07	12	18,82	22
M2-x	22,34	0	21,10	13	20,92	23
M3-x	24,57	0	23,63	13	20,03	23
M4-x	19,43	0	19,06	9	17,85	19
M5-x	19,41	0	19,44	10	18,20	20
M6-x	20,13	0	19,46	10	18,80	20
M7-x	22,32	0	21,98	12	20,59	22
M8-x	17,42	0	17,09	11	17,53	21
Média	20,64	-	20,10	-	19,09	-

Fonte: O autor



Comparando os teores de umidade das duas madeiras, é possível verificar que a Citriodora possui menores teores de umidade. Para o caso da Maçaranduba, existiu uma tendência para haver um decréscimo dos teores de umidade, enquanto que os valores registrados para a Citriodora revelaram alguma constância.

Na Tabela 5 encontram-se os valores médios de teor de umidade obtidos através do xilohigrômetro de perfuração junto à linha de colagem ( $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ ) para cada série de CPs. Na mesma tabela, também é possível observar os valores médios de teor de umidade obtido através do xilohigrômetro de perfuração junto à linha de colagem ( $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ ) dos CPs das séries E6-x, E7-x, E8-x, M6-x, M7-x e M8-x.

Tabela 5. Valores médios das medições de  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$

Série	$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ (%)	$U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ (%)	Série	$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ (%)	$U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ (%)
E1-x	13,30	-	M1-x	12,39	-
E2-x	13,22	-	M2-x	15,09	-
E3-x	13,81	-	M3-x	15,82	-
E4-x	12,73	-	M4-x	14,25	-
E5-x	13,31	-	M5-x	13,95	-
E6-x	12,84	13,32	M6-x	15,40	16,47
E7-x	13,57	13,84	M7-x	16,56	17,48
E8-x	14,45	15,14	M8-x	13,54	14,31
Média	13,40	14,10	Média	14,63	16,09

Fonte: O autor

Comparando os valores dos teores de umidade obtidos para cada espécie de madeiras, é possível constatar que, para a Maçaranduba, foram registrados os valores mais altos, no entanto a diferença é menor do que no caso das medições com o xilohigrômetro de contato (Tabela 4).

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios de teor de umidade obtidos através do ensaio de secagem em estufa ( $U_{\text{estufa}}$ ) com a metodologia adaptada da norma NBR 7190, para as séries de CPs com  $L$  igual ou superior a 10,0d. É possível verificar que os resultados apresentam maior teor de umidade no caso da Citriodora, sendo que as duas madeiras apresentam

valores próximos do teor de umidade de equilíbrio para a cidade de Salvador (15,6%).

Tabela 6. Valores médios das medições de  $U_{estufa}$ .

Série	$U_{estufa}$ (%)	Série	$U_{estufa}$ (%)
E1-x	-	M1-x	-
E2-x	-	M2-x	-
E3-x	16,28	M3-x	17,02
E4-x	15,66	M4-x	15,06
E5-x	17,78	M5-x	14,82
E6-x	17,41	M6-x	15,41
E7-x	16,48	M7-x	15,56
E8-x	17,05	M8-x	14,00
Média	16,78	Média	15,31

Fonte: O autor

Atendendo à importância da determinação do teor de umidade, pretende-se demonstrar a confiabilidade da utilização dos xilohigrômetros de contato e de perfuração para determinar o teor de umidade no momento da colagem. Por conseguinte, a Tabela 7 apresenta uma síntese das médias dos valores obtidos para  $U_{colagem}^{contato}$ ,  $U_{ensaio}^{contato}$ ,  $U_{pré-estufa}^{contato}$ ,  $U_{interior}^{perfuração}$ ,  $U_{exterior}^{perfuração}$  e  $U_{estufa}$  nas madeiras de Citriodora e de Maçarandura.

Tabela 7. Teores de umidade médios obtidos pelos três métodos.

	Citriodora	Maçaranduba
$U_{colagem}^{contato}$ (%)	17,20	20,64
$U_{ensaio}^{contato}$ (%)	17,61	20,10
$U_{pré-estufa}^{contato}$ (%)	17,22	19,09
Média – contato (%)	17,34	19,95
$U_{interior}^{perfuração}$ (%)	13,40	14,63
$U_{exterior}^{perfuração}$ (%)	14,10	16,09
Média – perfuração (%)	13,75	15,36
$U_{estufa}$ (%)	16,78	15,31

Fonte: O autor

Para avaliar a constância dos teores de umidade à superfície dos blocos de madeira, foi utilizado o teste estatístico *t-Student*, bi-lateral, com nível de significância de 5% e presumindo variâncias diferentes. As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados dos testes estatísticos para comparar as médias dos valores de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  obtidos para todos os CPs.

Tabela 8. Teste *t-Student* para as umidades de contato para Citriodora.

	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$
GL	190	190	190
Stat t	-1,095	-0,049	1,042
P(T<=t)	0,276	0,961	0,300
$t_{\text{crit}}$	1,986	1,986	1,986

Fonte: O autor

Tabela 9. Teste *t-Student* para as umidades de contato para Maçaranduba.

	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ e $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$
GL	94	94	94
Stat t	1,141	2,712	3,686
P(T<=t)	0,257	0,008	0,000
$t_{\text{crit}}$	1,993	1,993	1,993

Fonte: O autor

No caso da Citriodora, é possível constatar que  $t_{\text{crit}}$  é sempre superior a *Stat t*. Para a Maçaranduba,  $t_{\text{crit}}$  é superior a *Stat t* no caso da análise entre  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ , enquanto que, nas demais relações,  $t_{\text{crit}}$  é inferior a *Stat t*. Por conseguinte, os resultados dos testes *t-Student* permitem concluir que, para a Citriodora, os valores de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  são estatisticamente próximos e, no caso da Maçaranduba, apenas os valores de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  são estatisticamente próximos entre si.

Os testes *t-Student* permitem afirmar que, para o período de tempo considerado, não existiram variações significativas de teor de umidade da Citriodora, no entanto, no caso da Maçaranduba, é possível constatar que

existiram variações significativas de teores de umidade na superfície dos blocos de madeira.

A Tabela 10 apresenta os valores médios de  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  para as madeiras de Citriodora e Maçaranduba. A medição de  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  permite obter leituras localizadas em camadas mais profundas, quando comparadas com as leituras provenientes do xilohigrômetro de contato. Por conseguinte, os valores obtidos para  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  são inferiores às medições obtidas com o xilohigrômetro de contato, atendendo ao fato de que a água da chuva absorvida pelas madeiras durante o seu transporte apenas se mantém nas regiões superficiais das madeiras. É pertinente referir que as leituras registradas através do xilohigrômetro de perfuração são referentes a locais pontuais dos blocos de madeira.

Tabela 10. Valores médios de  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ .

	<b>Citriodora</b>	<b>Maçaranduba</b>
$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ (%)	13,40	14,63
$U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ (%)	14,10	16,09
Média	13,75	15,36

Fonte: O autor

Os teores de umidade medidos nos interiores dos CPs são inferiores aos valores obtidos na parte exterior dos CPs, o que é devido ao fato de se tratar de madeiras secas e os volumes internos serem menos susceptíveis às trocas de umidade com o meio externo. Conforme referido e exposto na Tabela 10, a Citriodora apresenta menores valores de  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ .

Para verificar a proximidade entre os teores de umidade obtidos com o xilohigrômetro de perfuração no interior e no exterior dos CPs, realizou-se um teste estatístico *t-Student*, bi-lateral, com nível de significância de 5% e presumindo variâncias diferentes (Tabela 11). É possível constatar que  $t_{\text{crit}}$  é sempre superior a *Stat t*, tanto para a Citriodora, quanto para a Maçaranduba.

Tabela 11. Teste *t-Student* para medições com xilohigrômetro de perfuração.

	$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ e $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$	$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ e $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$
	<b>Citriodora</b>	<b>Maçaranduba</b>
GL	34	34
Stat t	0,846	1,144
P(T<=t)	0,404	0,261
$t_{\text{crit}}$	2,032	2,032

Fonte: O autor

Os resultados obtidos permitem concluir que os valores de  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  são estatisticamente próximos para as duas madeiras, o que permite afirmar que o teor de umidade da madeira não tem variações significativas na direção radial dos CPs. Este fato se deve às seções transversais reduzidas dos blocos de madeira (3,5 cm x 3,5 cm), o que implica em variações de teor de umidade insignificantes.

Atendendo ao fato dos valores provenientes dos ensaios de determinação do teor de umidade através da secagem da madeira em estufa serem considerados os mais fidedignos, recorreu-se ao teste *t-Student* para analisar a semelhança entre as umidades obtidas pelos três métodos (xilohigrômetro de contato, xilohigrômetro de perfuração e  $U_{\text{estufa}}$ ) para as duas madeiras (Tabelas 12 e 13). Foi utilizado um teste bi-lateral, com nível de significância de 5% e presumindo variâncias diferentes.

Tabela 12. Teste *t-Student* para comparação dos métodos – Citriodora.

	$U_{\text{estufa}}^{\text{colagem}}$ e $U_{\text{estufa}}^{\text{ensaio}}$	$U_{\text{estufa}}^{\text{ensaio}}$ e $U_{\text{estufa}}^{\text{pré-estufa}}$	$U_{\text{estufa}}^{\text{pré-estufa}}$ e $U_{\text{estufa}}^{\text{perfuração interior}}$	$U_{\text{estufa}}^{\text{perfuração interior}}$ e $U_{\text{estufa}}^{\text{perfuração exterior}}$
GL	34	34	34	16
Stat t	0,843	2,324	1,910	3,077
P(T<=t)	0,406	0,026	0,065	0,009
$t_{\text{crit}}$	2,110	2,110	2,110	2,306

Fonte: O autor

Tabela 13. Teste *t-Student* para comparação dos métodos – Maçaranduba.

	$U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ $U_{\text{estufa}}$	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ $U_{\text{estufa}}$	$U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ $U_{\text{estufa}}$	$U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$ $U_{\text{estufa}}$	$U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ $U_{\text{estufa}}$
GL	34	34	34	18	16
Stat t	7,287	7,586	8,095	0,340	-1,793
P(T<=t)	0,000	0,000	0,000	0,736	0,096
$t_{\text{crit}}$	2,110	2,110	2,110	2,110	2,306

Fonte: O autor

Em relação às comparações entre  $U_{\text{estufa}}$  e as medições com o xilohigrômetro de contato da madeira de Citriodora, é possível verificar que  $t_{\text{crit}}$  apresenta superiores a *Stat t* para as comparações de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  com  $U_{\text{estufa}}$ . A comparação entre  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{estufa}}$  da madeira de Citriodora apresenta  $t_{\text{crit}}$  inferiores a *Stat t*. Considerando as comparações de  $U_{\text{estufa}}$  com  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ , é possível verificar que a Citriodora apresenta  $t_{\text{crit}}$  inferiores a *Stat t*.

No caso da Maçaranduba, as comparações de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  com  $U_{\text{estufa}}$  apresentam valores de  $t_{\text{crit}}$  inferiores a *Stat t*. Para as comparações entre  $U_{\text{estufa}}$  com  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  da madeira de Maçaranduba, é possível constatar valores de  $t_{\text{crit}}$  superiores aos valores absolutos de *Stat t*.

No caso da Citriodora, o fato de  $U_{\text{estufa}}$ , não ser estatisticamente semelhante a  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ , é possível verificar que  $t_{\text{crit}}$  não está muito distante de *Stat t*. Por outro lado, o teste *t-Student* realizado para comparar os valores de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ , revelou haver semelhança estatística entre estas amostras. Por conseguinte, o teste *t-Student* permite concluir que os teores de umidade obtidos através de medições com o xilohigrômetro de contato nas madeiras de Citriodora são semelhantes aos valores de  $U_{\text{estufa}}$ .

Uma vez que os valores de  $t_{\text{crit}}$  são claramente inferiores a *Stat t*, para as comparações de  $U_{\text{estufa}}$  com  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$  da Citriodora, é possível afirmar que não existe semelhança estatística entre  $U_{\text{estufa}}$  e os teores de umidade obtidos através do xilohigrômetro de perfuração.

No caso da Maçaranduba, uma vez que as comparações de  $U_{\text{colagem}}^{\text{contato}}$ ,  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  e  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  com  $U_{\text{estufa}}$  apresentaram valores de  $t_{\text{crit}}$  inferiores a *Stat t*, não é possível afirmar a existência de semelhança estatística. No entanto, para as comparações de  $U_{\text{estufa}}$  com  $U_{\text{interior}}^{\text{perfuração}}$  e  $U_{\text{exterior}}^{\text{perfuração}}$ , é possível constatar que os valores de  $t_{\text{crit}}$  são superiores a *Stat t*, permitindo afirmar a existência de semelhança estatística.

Conforme referido, a Citriodora apresenta os menores teores de umidade com medição por contato, não tendo sido constatadas variações significativas destes valores durante o período de 31 dias. Além disso, as medições obtidas pelo xilohigrômetro de contato são próximas dos valores de  $U_{\text{estufa}}$ . Estes fatos são justificados pela estocagem prolongada (sete anos) da madeira de Citriodora na carpintaria da Escola Politécnica da UFBA, onde permaneceu protegida da incidência direta da chuva. Este detalhe fez com que a madeira utilizada possuísse uma maior homogeneidade de valores de teor de umidade. De referir ainda que o valor de  $U_{\text{estufa}}$  da madeira de Citriodora revela que o teor de umidade desta madeira está em equilíbrio com o ar.

Em relação aos teores de umidade da Citriodora obtidos com o xilohigrômetro de perfuração, o fato das medições serem diferentes de  $U_{\text{estufa}}$ , é devido à calibração da curva de medição do xilohigrômetro de perfuração. Em comparação com a Maçaranduba, a Citriodora apresenta menor densidade, por conseguinte o seu teor de umidade deveria ser aferido numa curva de calibração mais próxima da curva 2<sup>12</sup>. Este fato iria fornecer valores de teor de umidade superiores aos obtidos nesta pesquisa. Em todo o caso, os teores de umidade da Citriodora registrados com o xilohigrômetro de perfuração não inviabilizam a aceitação dos resultados, uma vez que se encontram próximos aos valores de equilíbrio em relação ao ar.

---

<sup>12</sup> Devido às diferenças entre os teores de umidade das duas espécies de madeira, aprofundou-se a investigação do teor de umidade da Citriodora. Com o xilohigrômetro de perfuração calibrado na curva 2, foram detectados valores 2% mais altos, revelando o equilíbrio do teor de umidade da Citriodora em relação ao ar.

Para a Maçaranduba, foram constatados os maiores valores de teor de umidade medidos com xilohigrômetro de contato. Foi observado que estes valores variaram durante o período de tempo de 23 dias e que existe uma diferença significativa entre os teores de umidade obtidos através do xilohigrômetro de contato e  $U_{estufa}$ . Isto é devido à Maçaranduba ter absorvido água proveniente da incidência direta da chuva durante o seu transporte.

Após a recepção da Maçaranduba, procedeu-se à secagem das madeiras em local arejado e protegido das intempéries, resultando na evaporação parcial da água presente na superfície do bloco de madeira, uma vez que o local era arejado e protegido das intempéries durante o tempo em que se procedeu à sua secagem ao ar. As medições obtidas através do xilohigrômetro de perfuração são próximas aos valores de  $U_{estufa}$ . Os valores obtidos com o xilohigrômetro de perfuração sugerem que a Maçaranduba possui teor de umidade de equilíbrio em relação ao ar.

#### 4.1.2 Densidades básicas

Na Tabela 14 encontram-se os valores de  $\rho_{bás}$  obtidos através do ensaio de secagem em estufa, segundo a metodologia adaptada da norma NBR 7190, para as séries de CPs com  $L$  igual ou superior a  $10,0d$ . Na Tabela A - 10, constante em Anexos, é possível encontrar os valores obtidos para todos os CPs selecionados para este ensaio. No Gráfico 3 é possível observar as distribuições de  $\rho_{bás}$  das madeiras de Citriodora e de Maçaranduba.

Tabela 14. Valores médios de  $\rho_{bás}$ .

Série	$\rho_{bás}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Série	$\rho_{bás}$ (kg/m <sup>3</sup> )
E1-x	-	M1-x	-
E2-x	-	M2-x	-
E3-x	708,32	M3-x	979,97
E4-x	749,15	M4-x	965,54
E5-x	734,24	M5-x	956,02
E6-x	630,78	M6-x	1001,69
E7-x	701,30	M7-x	929,12
E8-x	687,00	M8-x	942,88
Média	701,80	Média	962,54

Fonte: O autor



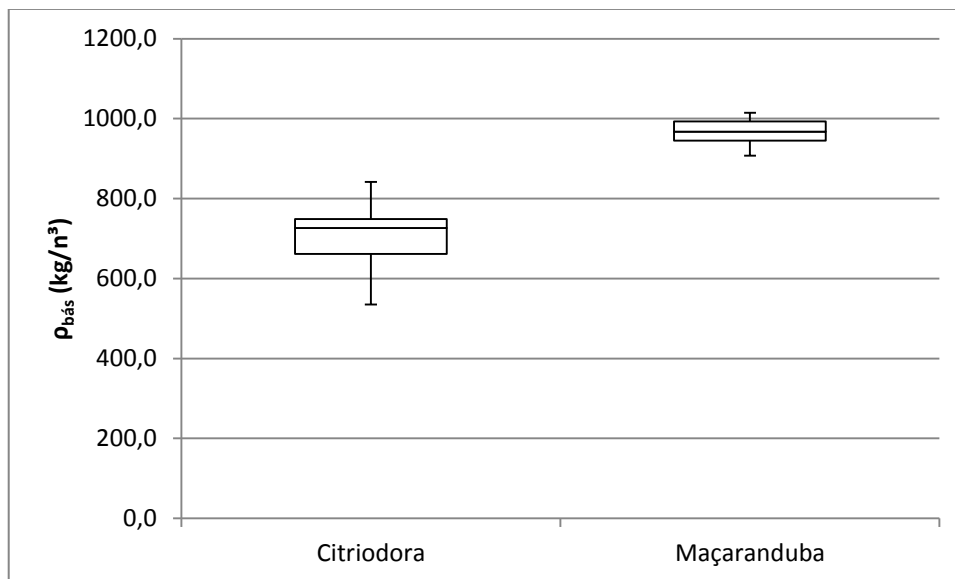


Gráfico 3.  $\rho_{bás}$  de citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O Autor).

É possível observar que a Citriodora apresenta menor  $\rho_{bás}$  do que a Maçaranduba e uma maior dispersão de dados. Comparando os valores obtidos para a densidade básica da Citriodora com o valor de  $867 \text{ kg/m}^3$  apresentado por IPT (2015a), se constata que o material ensaiado apresenta um valor inferior. O mesmo também é possível ser verificado para a Maçaranduba, cujo valor de  $\rho_{bás}$  apresentado por IPT (2015b) é de  $833 \text{ kg/m}^3$ , diferindo do valor obtido neste estudo ( $962,54 \text{ kg/m}^3$ ). As diferenças poderão ser devidas às diferentes condições de crescimento das madeiras, da diferença de espécies ensaiadas, do local da árvore do qual foram extraídos os CPs e da presença de albúno, no caso da Citriodora<sup>13</sup>.

#### 4.1.3 Densidades aparentes

Os valores de  $\rho_{ap}$  traduzem a densidade da madeira para o teor de umidade de equilíbrio que, neste caso é de 16,78% para a Citriodora e 15,31%

<sup>13</sup> Albúno é a camada de madeira que circunda o cerne. Pertence à parte “viva” da árvore, pela qual circulam as substâncias desde as raízes da planta até às suas folhas. Apresenta coloração clara e menor densidade do que o cerne (Junior, Lahr e Dias, 2004).

para a Maçaranduba. A Tabela 15 apresenta os valores médios de  $\rho_{ap}$  obtidos através da Equação (5), apresentada em 3.9. É possível verificar que a Citriodora apresenta um valor médio de  $\rho_{ap}$  igual a 856,77 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que a Maçaranduba apresenta um valor de 1112,17 kg/m<sup>3</sup>. Na Tabela A - 11, em Anexos, encontram-se todos os valores de  $\rho_{ap}$  das duas madeiras, calculados através da Equação (4). Na Citriodora, a variação de  $\rho_{ap}$  foi de 110,49 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que a Maçaranduba apresentou uma variação de 53,95 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 15. Valores médios de  $\rho_{ap}$  segundo a Equação (4)

Série	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Série	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
E1-x	-	M1-x	-
E2-x	-	M2-x	-
E3-x	867,05	M3-x	1131,91
E4-x	897,58	M4-x	1100,55
E5-x	895,77	M5-x	1091,47
E6-x	787,09	M6-x	1145,26
E7-x	846,34	M7-x	1112,48
E8-x	846,78	M8-x	1091,31
Média	856,77	Média	1112,17

Fonte: O autor

MELO (2013) refere que  $\rho_{ap}$  poderá ser calculada através da Equação (5), sendo  $U_i$  o teor de umidade inicial, expresso em porcentagem, e  $CV_{U_i}$  a contração volumétrica, igual à diferença de volumes entre os estados saturado e inicial, expressa em m<sup>3</sup>. Na Tabela 16 é possível verificar que os valores médios de  $\rho_{ap}$  são: 818,94 kg/m<sup>3</sup> para a Citriodora e 1109,72 kg/m<sup>3</sup> para a Maçaranduba. Na Tabela A - 12, constante em Anexos, é possível verificar todos os valores de  $\rho_{ap}$  da Citriodora e da Maçaranduba calculados através da Equação (5). Na Citriodora, a variação de  $\rho_{ap}$  foi de 126,82 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que a Maçaranduba apresentou uma variação de 73,96 kg/m<sup>3</sup>.

$$\rho_{ap} = \left( \frac{1 + \frac{U_i}{100}}{1 - \frac{CV_{U_i}}{100}} \right) \times \rho_{bás} \quad (5)$$

Tabela 16. Valores médios de  $\rho_{ap}$  segundo a Equação (5).

Série	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Série	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
E1-x	-	M1-x	-
E2-x	-	M2-x	-
E3-x	822,96	M3-x	1146,60
E4-x	866,67	M4-x	1110,84
E5-x	864,77	M5-x	1097,39
E6-x	739,85	M6-x	1155,98
E7-x	815,25	M7-x	1072,64
E8-x	804,13	M8-x	1074,88
Média	818,94	Média	1109,72

Fonte: O autor

O Gráfico 4 apresenta a distribuição dos valores de  $\rho_{ap}$  das madeiras de Citriodora e de Maçaranduba sem *outliers*, obtidos através das Equações (4) e (5). É possível observar que as duas equações apresentam configurações semelhantes e que a Equação (5) apresenta uma distribuição de  $\rho_{ap}$  inferior à Equação (4). É perceptível que existe uma maior dispersão no caso da Citriodora do que na Maçaranduba.

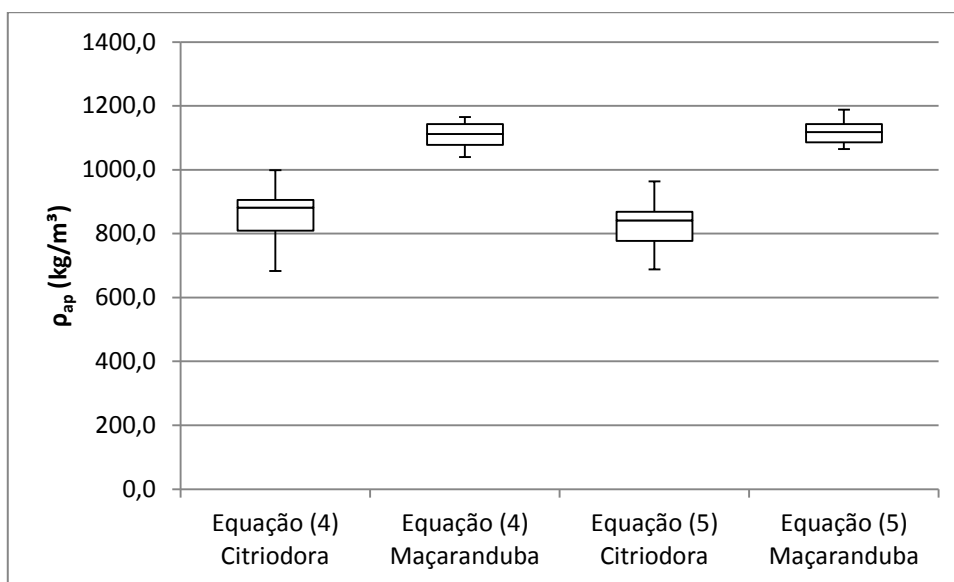


Gráfico 4.  $\rho_{ap}$  de citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O Autor).

A norma NBR 7190 refere que a Citriodora possui  $\rho_{ap}$  igual a 999 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que a Maçaranduba apresenta um valor de referência igual a 1143

kg/m<sup>3</sup>. No caso da Citriodora, a dispersão apresentada no Gráfico 4 e as diferenças entre os valores obtidos através das Equações (4) e (5) em relação aos valores da norma NBR 7190 são devidas às condições de crescimento da madeira, localização (horizontal e vertical) da extração na árvore e à inclusão de madeira de alburno nos CPs. A presença de alburno nos CPs de Citriodora é justificada pelas dimensões reduzidas dos troncos das árvores jovens desta espécie e o fato de ser comum a sua utilização em estruturas. Para a Maçaranduba, é possível verificar que os valores das Tabelas 15 e 16 estão bastante próximos.

#### 4.1.4 Caracterização mecânica

A NBR 7190 estipula que a caracterização mínima de uma espécie conhecida deverá conter a determinação das resistências à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ), tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ) e cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v0}$ ). Os valores normativos estão apresentados na Tabela 17. Uma vez que o foco do presente estudo é a caracterização das influências de alguns fatores materiais e geométricos nas resistências mecânicas das ligações e não a caracterização mecânica das madeiras, não foram realizados ensaios mecânicos.

Tabela 17. Valores da NBR 7190 para  $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ .

<b>Espécie</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{t0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0}</math> (MPa)</b>
Citriodora	62,0	123,6	10,7
Maçaranduba	82,9	138,5	14,9

Fonte: O autor

DIAS e LAHR (2004) utilizaram os resultados dos ensaios de caracterização mecânica de quarenta madeiras nativas para realizar análises de regressão, de forma a relacionar a  $\rho_{ap}$  com as características mecânicas. Foram consideradas as expressões numéricas obtidas por DIAS e LAHR (2004) que permitem a realização da caracterização mínima segundo a norma NBR 7190. Na Tabela 18 estão apresentadas as equações que permitem

relacionar as três resistências supracitadas com  $\rho_{ap}$ , para teores de umidade de 12%, e os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Tabela 18. Relações entre  $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  com  $\rho_{ap}$ .

Equação	$R^2$
$f_{c0} = 0,0714 \rho_{ap}^{1,006}$	0,77104
$f_{t0} = 0,1561 \rho_{ap}^{0,9472}$	0,62773
$f_{v0} = 0,0237 \rho_{ap}^{0,9691}$	0,78433

Fonte: DIAS e LAHR (2004)

Recorrendo às regressões de DIAS e LAHR (2004) presentes na Tabela 19 e aos valores de  $\rho_{ap}$  obtidos com a Equação (4), no subitem 4.1.3, obtiveram-se os valores médios de  $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$  para as madeiras de Citriodora e Maçaranduba. Na Tabela 19 é possível encontrar os valores característicos da resistência à compressão ( $f_{c0,k}$ ), resistência à tração ( $f_{t0,k}$ ) e resistência ao cisalhamento ( $f_{v0,k}$ ). As resistências mecânicas características foram determinadas através ordenação prévia dos dados por ordem crescente e posterior aplicação da Equação (6), onde  $f_{wk}$  é a resistência característica,  $n$  é o número de dados e  $f_i$  é a resistência mecânica na posição  $i$ .

Tabela 19.  $f_{c0,k}$ ,  $f_{t0,k}$  e  $f_{v0,k}$  calculados segundo DIAS e LAHR (2004).

	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)
Citriodora	56,15	83,65	14,65
Maçaranduba	85,72	124,52	22,01

Fonte: O autor

$$f_{wk} = \left( 2 \times \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (6)$$

A norma NBR 7190 estipula uma tolerância de 18% para as solicitações axiais e de 28% para as solicitações tangenciais. Observando os dados apresentados na Tabela 19, é possível constatar que  $f_{c0,k}$  das duas madeiras e  $f_{t0,k}$  da Maçaranduba estão dentro das tolerâncias supracitadas. Os valores de

$f_{t0,k}$  da Citriodora e de  $f_{v0,k}$  das duas madeiras não respeitam as tolerâncias preconizadas pela NBR 7190. Por conseguinte, é necessário recorrer às Equações (7) e (8), provenientes da caracterização simplificada da NBR 7190. A Tabela 20 apresenta os valores calculados através das fórmulas da Tabela 18 e das Equações (7) e (8).

A NBR 7190 refere que os valores das resistências mecânicas deverão ser corrigidas para o teor de umidade de 12%. Para realizar essa correção, foi necessário aplicar a Equação (9), onde  $U\%$  é o teor de umidade em que as madeiras se encontram (16,78% para a Citriodora e 15,31% para a Maçaranduba) e  $f_{U\%}$  é a resistência mecânica que a madeira apresenta, em MPa. Na Tabela 21 é possível observar os valores das resistências mecânicas corrigidas para o teor de umidade de 12%.

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad (7)$$

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,12 \quad (8)$$

$$f_{12\%} = f_{U\%} \times \left[ 1 + \frac{3 \times (U\% - 12)}{100} \right] \quad (9)$$

Tabela 20.  $f_{c0,k}$ ,  $f_{t0,k}$  e  $f_{v0,k}$  segundo DIAS e LAHR (2004) e NBR 7190.

	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)
Citriodora	56,15	72,92	6,74
Maçaranduba	85,72	124,52	10,29

Fonte: O autor

Tabela 21.  $f_{c0,k}$ ,  $f_{t0,k}$  e  $f_{v0,k}$  corrigidos para  $U = 12\%$ .

	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)
Citriodora	56,15	83,37	7,70
Maçaranduba	85,72	136,88	11,31

Fonte: O autor

Os valores de  $f_{t0}$  da Citriodora e de  $f_{v0}$  das duas madeiras são inferiores às referências apresentadas pela norma NBR 7190, atendendo ao fato de que as equações (7) e (8) prescrevem valores mínimos normatizados, no entanto é possível constatar que as madeiras desta pesquisa podem ser incluídas na classe C60 da mesma norma.

Os valores obtidos com as equações (7) e (8) são inferiores às referências apresentadas pela NBR 7190, devido ao fato dessas formulações numéricas serem aplicáveis a todas as espécies de madeira apresentadas pela NBR 7190. Na realidade, as relações  $f_{c0}/f_{t0}$  e  $f_{v0}/f_{c0}$  são diferentes para cada espécie de madeira e, conseqüentemente, as equações (7) e (8) representam os casos mais conservativos.

Para a Citriodora, é pertinente enaltecer que os CPs também incluem madeira de alburno, o que também justifica os valores inferiores das suas características mecânicas em relação aos valores da NBR 7190.

#### 4.1.5 Defeitos de crescimento e de secagem da madeira

Conforme já referido, os defeitos de crescimento da madeira divididos em nós firmes (Figura 53), bolsas de resina (Figura 54) e medula (Figura 55), enquanto que os defeitos de secagem são as rachaduras (Figura 56). Os Quadros de A – 1 a A - 10, constantes em Anexos, apresentam a descrição visual e localização dos defeitos de crescimento das madeiras encontrados nas faces dos blocos dos CPs. A Tabela 22 apresenta a quantidade de CPs com defeitos nos blocos de madeira.

Recorrendo ao *software* Measure, foi possível determinar as dimensões dos defeitos de crescimento da madeira em cada face dos CPs. Os nós apresentaram diâmetro máximo 3,4 de cm e valor médio de 1,2 cm. As rachaduras apresentaram comprimento máximo de 35,0 cm e média de 6,3 cm, sendo que apresentaram espessuras superiores 1 mm.



Figura 53. Nó em CP de Citriodora (Fonte: O autor).



Figura 54. Bolsa de resina em CP de Citriodora (Fonte: O autor).



Figura 55. Medula em CP de Citriodora (Fonte: O autor).



Figura 56. Rachadura em CP de Maçaranduba (Fonte: O autor).

Tabela 22. Número de defeitos nos blocos de madeira dos CPs.

Série	Nó	Rachadura	Medula	Bolsa de resina
E1-x	0	1	0	0
E2-x	1	0	0	0
E3-x	3	1	0	0
E4-x	4	0	1	0
E5-x	15	0	1	1
E6-x	21	1	3	0
E7-x	8	1	2	1
E8-x	23	1	3	0
M1-x	0	2	0	0
M2-x	0	1	0	0
M3-x	0	0	0	0
M4-x	0	0	0	0
M5-x	0	0	0	0
M6-x	0	0	0	0
M7-x	0	0	0	0
M8-x	0	0	0	0

Fonte: O autor



É possível constatar que os CPs de Citriodora possuem mais defeitos de que os espécimes de Maçaranduba, sendo que a existência de nós, medula e bolsas de resina apenas são constatáveis na Citriodora. Também é possível verificar que o tipo de defeito da madeira mais frequente é o nó. Para avaliar a influência do tamanho do CP na quantidade de defeitos encontrados nos blocos de madeira, a Tabela 23 apresenta a relação entre  $L$  e a quantidade de defeitos encontrados nas duas espécies de madeira. No Gráfico 5 está apresentada a evolução do número de nós com o aumento de  $L$ .

Tabela 23. Relação entre  $L$  e a quantidade de defeitos.

$L$	Nó	Rachadura	Medula	Bolsa de resina	Total
5,0d	0	3	0	0	3
7,5d	1	1	0	0	2
10,0d	3	1	0	0	4
12,5d	4	0	1	0	5
15,0d	15	0	1	1	17
17,5d	21	1	3	0	25
20,0d	8	1	2	1	12
22,5d	23	1	3	0	27

Fonte: O autor

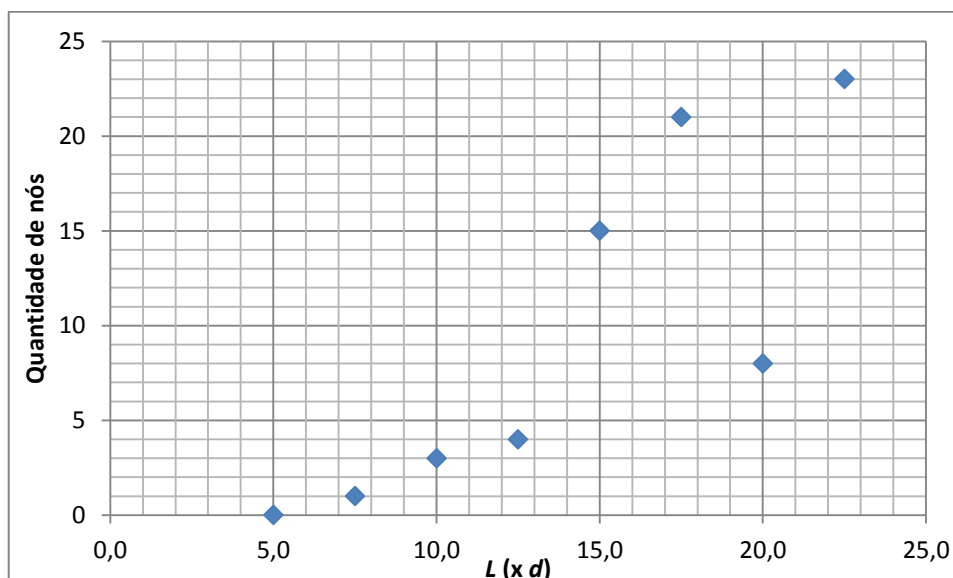


Gráfico 5. Quantidade de nós x  $L$  (Fonte: O autor).

Observando a Tabela 23, é possível verificar que apenas 16% dos CPs com  $L$  menor ou igual a 12,5d, apresentaram nós. Através do Gráfico 5 é

possível constatar que a quantidade de defeitos aumenta com o incremento de  $L$ . A série com  $L$  igual a 20,0d é a exceção da tendência de aumento da quantidade de defeitos, que é influenciada, sobretudo, pela quantidade de nós presentes na Citriodora.

A inclusão dos defeitos da madeira de Citriodora nos CPs se deve ao diâmetro reduzido do tronco das árvores jovens desta espécie. Os CPs de Maçaranduba não apresentaram defeitos de crescimento devido à maior idade e às dimensões dos troncos das árvores.

Uma vez que a Citriodora é uma madeira jovem, possui uma grande quantidade de defeitos de formação e, quanto maior as dimensões dos blocos de madeira (conforme foi verificado no capítulo 2 o comprimento dos blocos aumenta consoante  $L$ ), maior é a probabilidade de inclusão destas anomalias.

#### 4.1.6 Considerações

Devido às dimensões reduzidas dos CPs, a necessidade de não interferir na integridade da madeira e à importância do teor de umidade na qualidade da adesão, foi realizada uma quantificação exaustiva deste fator. Foram utilizados três métodos que se revelaram estatisticamente próximos, uma vez que os teores de umidade no interior das madeiras eram estáveis. Os teores de umidade médios das madeiras de Citriodora e de Maçaranduba encontram-se na Tabela 24.

Durante a campanha experimental, foi realizado o ensaio de determinação da densidade básica através secagem da madeira, como forma de subsidiar a caracterização das madeiras. Uma vez que a caracterização das madeiras não é o foco desta pesquisa, foram utilizadas formulações numéricas provenientes da literatura para obter aproximações válidas para as densidades das madeiras, tendo como referência os valores preconizados na norma NBR 7190. Os valores médios de  $\rho_{ap}$  e  $\rho_{bás}$  estão presentes na Tabela 24.

Com as formulações numéricas presentes na literatura e na norma NBR 7190, foi possível obter aproximações para  $\rho_{ap}$ ,  $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$  e  $f_{v0}$ . Segundo a norma NBR 7190, estas são as propriedades físicas e mecânicas que permitem a caracterização mínima de espécies conhecidas. O resumo dos valores das

características físico-mecânicas das de Citriodora e de Maçaranduba utilizadas nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Propriedades físico-mecânicas das madeiras utilizadas.

<b>Espécie</b>	<b>U (%)</b>	<b><math>\rho_{bás}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{t0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0}</math> (MPa)</b>
Citriodora	16,78	701,80	818,94	60,88	79,06	7,31
Maçaranduba	15,31	962,54	1109,72	82,64	107,32	9,92

Fonte: O autor

Uma vez que as madeiras utilizadas possuíam defeitos de crescimento e de secagem, foi necessário proceder ao catalogamento destas particularidades como forma de subsidiar o entendimento dos modos de ruptura e as contribuições para as eventuais reduções das capacidades de carga das ligações. É pertinente referir que este trabalho não tem como objetivo a quantificação dos decréscimos de resistência mecânica devido à presença de defeitos de crescimento e de secagem da madeira, mas sim demonstrar a viabilidade de utilização de madeiras com defeitos em ligações com barras de aço rosqueadas coladas.

## 4.2 Erros de execução

### 4.2.1 Ângulos de inclinação

O programa Meazure fornece o ângulo entre a face do CP e a barra, através da marcação manual do vértice do bloco de madeira e dos centros geométricos da furação e da barra, conforme apresentado na Figura 45 do ponto 3.6. Para se obter o ângulo de inclinação entre a barra e as fibras da madeira ( $\theta$ ) é necessário subtrair  $90^\circ$  ao valor fornecido pelo programa. Nas Tabela de A – 12 a A – 14, constante em Anexos, estão apresentados os valores de  $\theta$  de todos os CPs. Para os CPs de Citrodora,  $\theta$  variou entre  $0^\circ$  e  $4,9^\circ$ , enquanto que os CPs de Maçaranduba apresentaram variações entre  $0^\circ$  e  $6,0^\circ$ .

Uma vez que as barras estão inseridas nos furos,  $\theta$  depende do modo de furação. A principal causa para a ocorrência de inclinações da furação é o

estado de conservação do equipamento de furação, uma vez que, devido à falta de manutenção, possui folga no mandril, o que produz variações da posição da ponta da broca. Consequentemente, surgiu a necessidade de avaliar as características da madeira e geometria da ligação que possam influenciar as inclinações das furações. Neste ponto são avaliadas as influências de  $\rho_{ap}$ , de  $L$  e de  $U_{estufa}$  na variação de  $\theta$ . Foram considerados os CPs utilizados no ensaio de determinação de  $U_{estufa}$  e  $\rho_{bás}$  para as análises das influências de  $\rho_{ap}$  e  $U_{estufa}$  com  $\theta$ .

Uma vez que a Maçaranduba apresenta maior densidade que a Citriodora, para analisar a influência de  $\rho_{ap}$  em  $\theta$ , o Gráfico 6 apresenta as distribuições de  $\theta$ , obtidos através da utilização do *software* Measure. Para complementar a análise, calcularam-se os coeficientes de Pearson para avaliar as correlações entre  $\theta$  e  $\rho_{ap}$ . Para tal, procedeu-se à construção dos Gráficos 7 e 8, que apresentam a relação entre  $\theta$  e  $\rho_{ap}$  sem *outliers* para as duas madeiras.

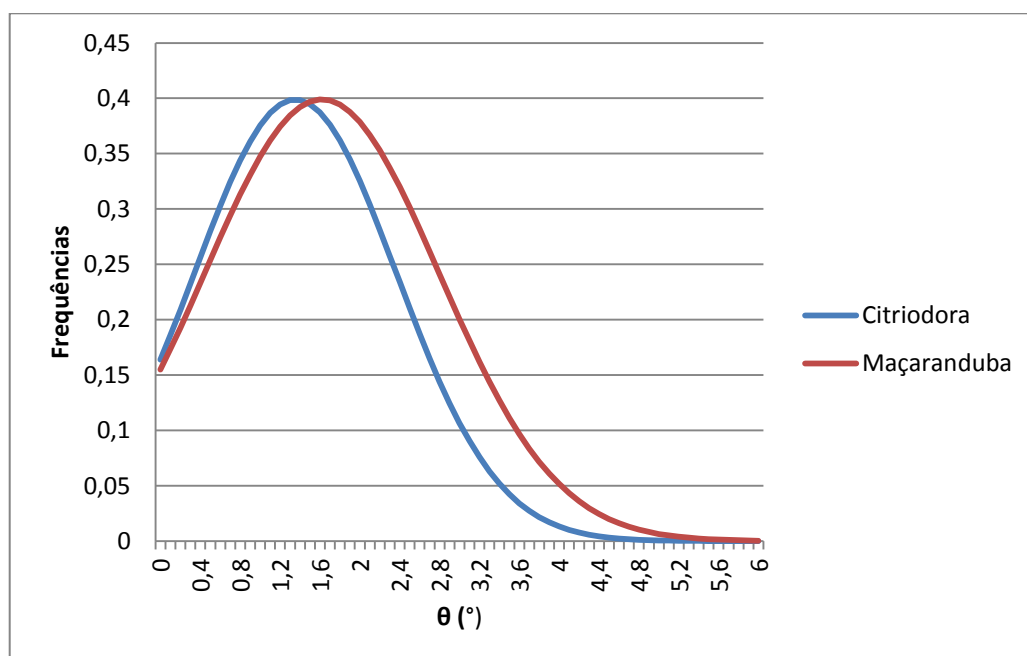


Gráfico 6. Distribuição de  $\theta$  da Citriodora e Maçaranduba (Fonte: O autor).

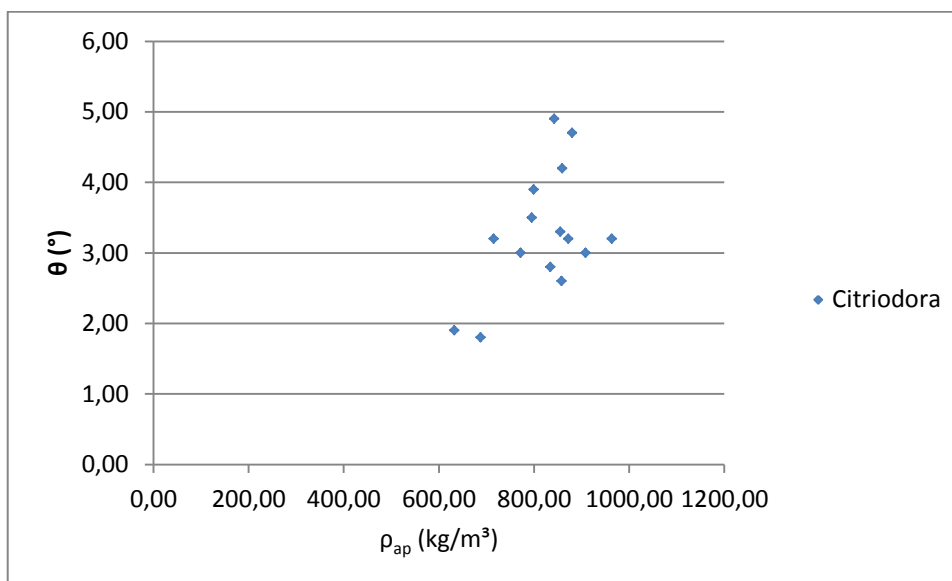


Gráfico 7.  $\theta$  x  $\rho_{ap}$  sem *outliers* – Citriodora (Fonte: O autor).

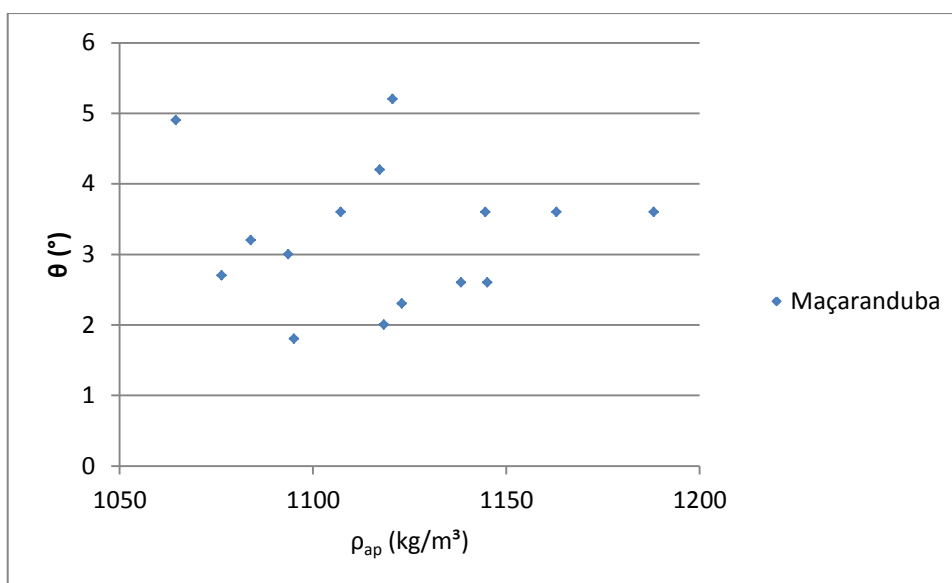


Gráfico 8.  $\theta$  x  $\rho_{ap}$  sem *outliers* – Maçaranduba (Fonte: O autor).

Analisando o Gráfico 6, é possível verificar que a Maçaranduba possui uma distribuição de  $\theta$  maior do que a Citriodora. Através dos Gráficos 7 e 8, foram obtidos coeficientes de Pearson de 0,461 e 0,209 para as madeiras de Citriodora e Maçaranduba, respectivamente. Por conseguinte, é possível afirmar que a relação entre  $\theta$  e  $\rho_{ap}$  é positiva.

Segundo a exposição de DIAS *et al.* (2015), o fato  $\theta$  aumentar com o incremento dos valores de  $\rho_{ap}$  é devido à resistência da broca em penetrar na

madeira, resultando no escorregamento desta, uma vez que o aumento de  $\rho_{ap}$  implica no aumento da dureza da madeira e na redução do volume de vazios entre os elementos anatômicos da madeira. Conforme DIAS *et al.* (2015), outro aspecto que também deve ser considerado é o fato da altura da broca ser controlada manualmente. Este fato é relevante uma vez que existe uma tendência para aplicar mais força no caso da Maçaranduba, o que favorece ainda mais o escorregamento da broca.

Para avaliar a influência de  $L$  em  $\theta$ , procedeu-se à construção dos Gráficos 9 e 10, através dos quais foram obtidos coeficientes de Pearson de 0,199 e 0,032 para as madeiras de Citriodora e Maçaranduba, respectivamente. Por conseguinte, é possível afirmar que a relação entre  $\theta$  e  $\rho_{ap}$  é positiva.

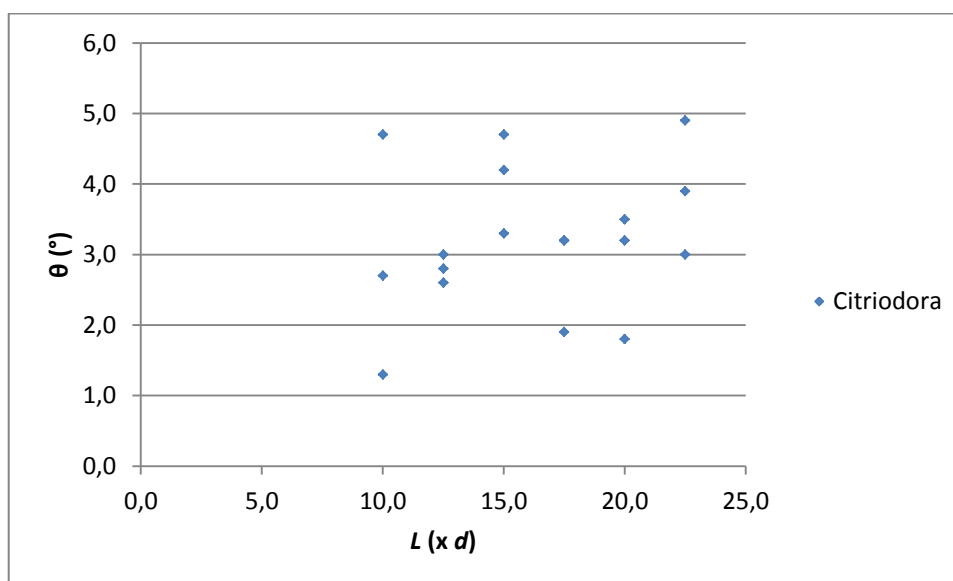


Gráfico 9.  $\theta$  x  $L$  – Citriodora (Fonte: O autor).

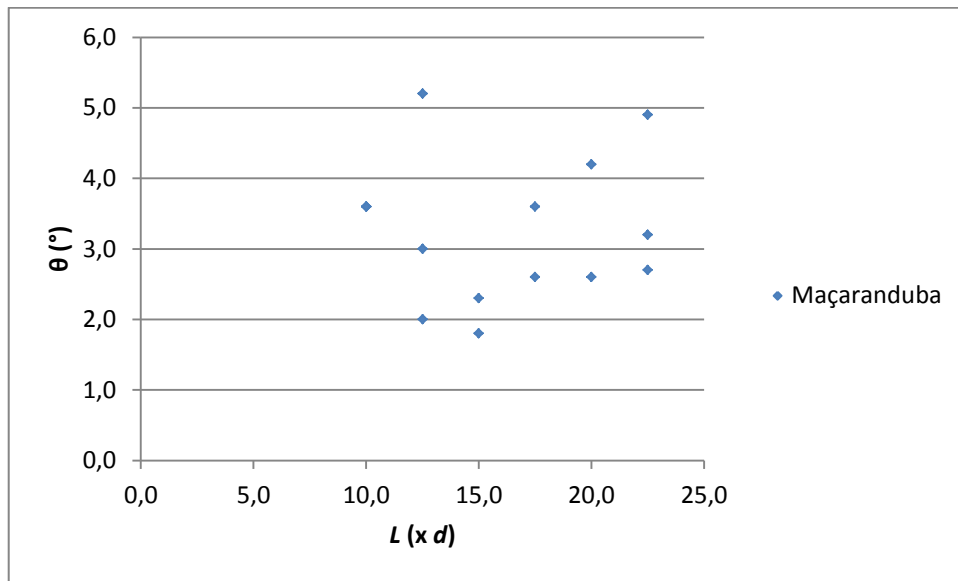


Gráfico 10.  $\theta \times L$  – Maçaranduba (Fonte: O autor).

Os resultados poderão ser explicados pelo fato da broca da furadeira escorregar na madeira devido à folga no mandril da furadeira. Quanto maior o comprimento de furação, maior é o tempo durante o qual a ponta da broca escorrega na madeira, o que produz maiores inclinações.

Os Gráficos 11 e 12 apresentam a relação entre  $U_{estufa}$  e  $\theta$  para as madeiras de Citriodora e de Maçaranduba. Foi realizado um teste de correlação, com intervalo de confiança de 95%, obtendo-se coeficientes de Pearson de -0,118 e 0,001 para a Citriodora e Maçaranduba, respectivamente. Para complementar a análise, os Gráficos 13 e 14 apresentam a plotagem de resíduos para avaliar o tipo de correlação existente entre estas duas variáveis.

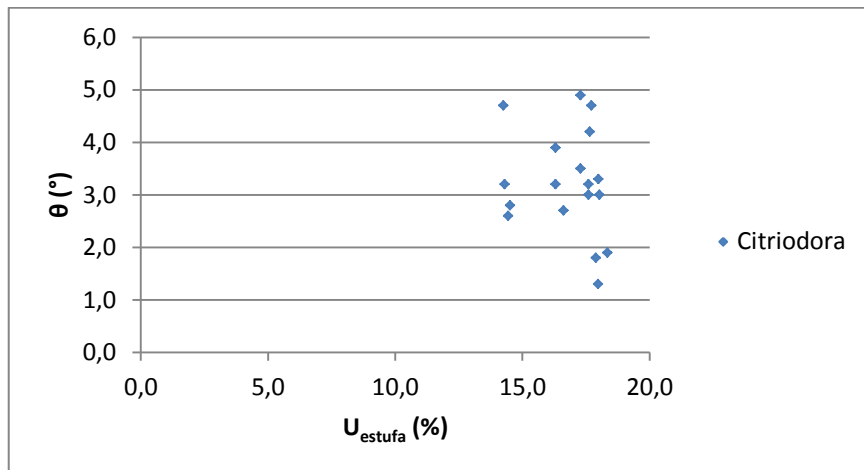


Gráfico 11.  $\theta$  x  $U_{estufa}$  - Citriodora (Fonte: O autor).

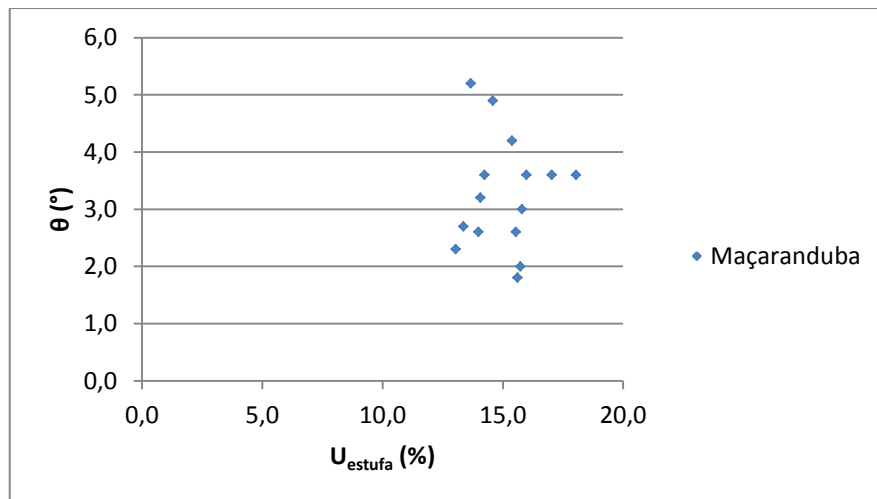


Gráfico 12.  $\theta$  x  $U_{estufa}$  - Maçaranduba (Fonte: O autor).

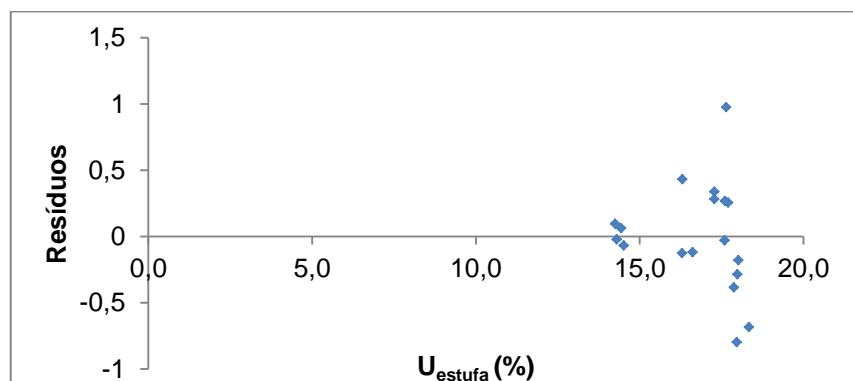


Gráfico 13. Plotagem de resíduos - Citriodora (Fonte: O autor).



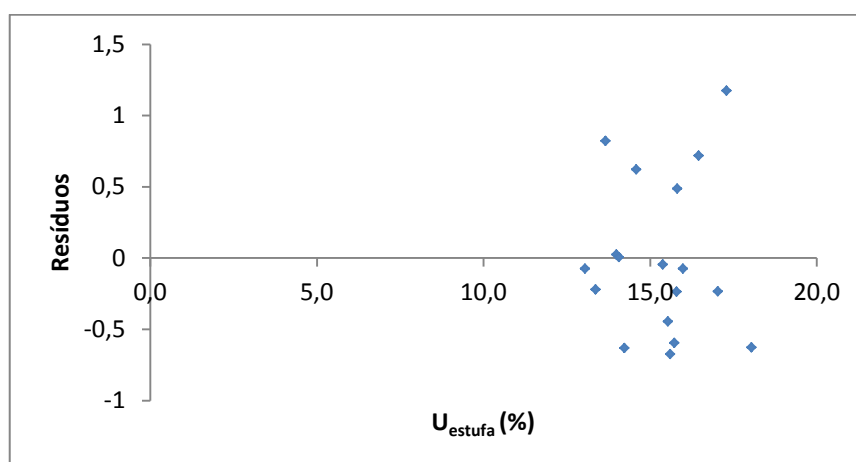


Gráfico 14. Plotagem de resíduos - Maçaranduba (Fonte: O autor).

Atendendo à ausência de um padrão nos Gráficos 11, 12, 13 e 14 e atendendo ao fato dos coeficientes de Pearson apresentarem valores próximos de zero, é possível afirmar que não existe correlação entre  $\theta$  e  $U_{estufa}$ . Este fato é devido à baixa variação de  $\theta$  e de  $U_{estufa}$ , além de que os valores dos teores de umidade das madeiras estão próximos do equilíbrio. Por conseguinte, não é possível obter uma clara definição da correlação entre estas variáveis.

#### 4.2.2 Combustão da madeira

Durante a furação dos blocos de madeira dos CPs de Maçaranduba, foi detectado o aparecimento de fumaça, estando relacionado com a combustão da madeira. Após a abertura das extremidades dos CPs também foi possível constatar a presença de madeira queimada em alguns pontos da linha de colagem em alguns CPs de Maçaranduba (Figura 57). Esse fenômeno ocorreu em oito CPs, conforme apresentado no Quadro A - 11, constante em Anexos.



Figura 57. Combustão pontual na linha de colagem (Fonte: O autor).

A combustão está relacionada com a densidade da madeira e com a intensidade da força exercida na manivela da furadeira, no caso dos CPs de Maçaranduba, uma vez que nenhum dos CPs de Citriodora apresentou sinais de combustão junto à linha de colagem. A broca foi utilizada pela primeira vez durante esta campanha experimental. Por conseguinte, o estado de conservação da broca não constitui a causa para a ocorrência de combustão da madeira.

#### 4.2.3 Defeitos de colagem

Conforme referido no capítulo 2, as bolhas de ar na linha de adesivo compõem discontinuidades nas interfaces adesivo-madeira e adesivo-barra,

fazendo com que haja uma concentração de tensões de cisalhamento nesses locais, reduzindo a resistência mecânica das ligações. Desta forma, surge a necessidade de manter cuidados durante a inserção das barras nos orifícios previamente preenchidos com adesivo.

Foi possível constatar a presença de bolhas de ar na linha de colagem de vários CPs, conforme mostra a região delimitada na Figura 57. A Tabela 25 apresenta a quantidade de CPs que apresentaram bolhas de ar na linha de colagem. O Quadro A - 11, em Anexos, encontram-se assinalados todos os CPs com defeitos de colagem. É possível constatar que a quantidade de CPs com defeitos de colagem não está relacionada com  $L$ .

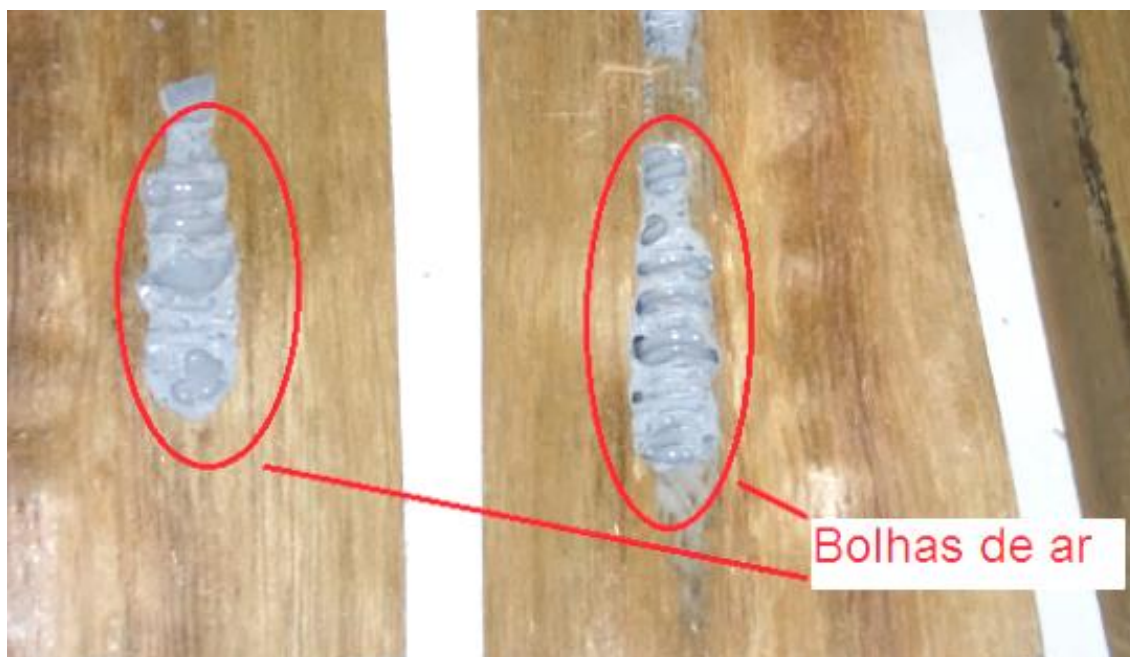


Figura 58. Registro fotográfico de defeitos de colagem (Fonte: O autor).

Tabela 25. Quantidade de CPs com bolhas de ar na linha de colagem.

Série	Nº de CPs com defeitos de colagem	Série	Nº de CPs com defeitos de colagem
E1-x	1	M1-x	2
E2-x	4	M2-x	3
E3-x	5	M3-x	5
E4-x	3	M4-x	3
E5-x	1	M5-x	4
E6-x	2	M6-x	4
E7-x	2	M7-x	3
E8-x	3	M8-x	6
Soma	21	Soma	30

Fonte: O autor

Conforme as indicações do fabricante do epóxi, o tempo de utilização máximo da resina é de cinquenta minutos. No entanto, foi verificado que após trinta minutos da mistura dos dois componentes do epóxi, ocorria a perda parcial de viscosidade da resina, dificultando a sua aplicação nos orifícios dos blocos de madeira. A perda parcial de trabalhabilidade resultou em menores volumes de epóxi succionados e injetados nos furos, aumentando o número de ciclos necessários para preencher cada orifício.

O processo de produção das ligações de cada série se iniciou pelos CPs de Citrodora, seguidos da madeira de Maçaranduba, sendo que esta sequência foi mantida durante todo o processo de execução das ligações. Constatou-se um grande esforço dispendido durante a introdução do adesivo nos furos da madeira, causando cansaço físico, o que influenciou a formação de bolhas de ar no momento de aplicação do adesivo. Por conseguinte, a Maçaranduba apresenta maior quantidade de CPs com bolhas de ar do que a Citrodora. Este fato poderá ocorrer em processos de execução das ligações *in situ*.

A existência das bolhas de ar na linha de adesivo também é explicado pelo aprisionamento do ar durante a introdução da barra no furo. O aprisionamento do ar também pode ter sido potencializado pelas dimensões reduzidas da rosca (passo) e pela viscosidade do epóxi. A presença de bolhas de ar na linha de colagem também pode ser devido à distância reduzida entre a rosca da barra e a madeira, o que dificulta a expulsão do ar.

#### 4.2.4 Considerações

O equipamento utilizado durante a execução dos furos das madeiras possibilitou desvios que permitiram simular a furação inclinada, que poderá ocorrer *in situ*. Na Citriodora, os ângulos de inclinação entre as barras e as fibras da madeira variaram entre 0,0° e 4,9°, enquanto que, na Maçaranduba, foram registradas variações entre 0,0° e 6,0°.

A combustão da madeira tende a ocorrer em madeiras com massas específicas maiores, sendo também dependente da intensidade da força exercida na manivela durante a furação.

### 4.3 Resistências mecânicas das ligações

Na Tabela 26 estão presentes os valores das forças de ruptura médias e características ( $F_{rupt,média}$  e  $F_{rupt,k}$ , respectivamente) provenientes dos ensaios de tração das ligações.  $F_{rupt,k}$  foi calculado de forma igual aos valores característicos das resistências mecânicas da madeira (subitem 4.1.4). Após os ensaios de tração foram gerados gráficos carga x extensão e os resultados referentes a todas as  $F_{rupt}$  se encontram em Anexos (Gráficos de A – 1 a A – 16 e Tabelas de A – 15 a A – 17, respectivamente).

Tabela 26. Forças de ruptura média, característica e de cálculo.

Série	$F_{rupt,média}$ (kN)	$F_{rupt,k}$ (kN)	Série	$F_{rupt,média}$ (kN)	$F_{rupt,k}$ (kN)
E1-x	14,99	12,76	M1-x	13,45	11,91
E2-x	16,93	16,27	M2-x	15,65	12,81
E3-x	17,34	14,91	M3-x	15,79	13,67
E4-x	15,28	13,47	M4-x	15,31	12,56
E5-x	16,71	16,32	M5-x	16,23	14,88
E6-x	17,36	15,26	M6-x	15,91	14,84
E7-x	18,50	19,94	M7-x	17,71	16,04
E8-x	17,11	17,78	M8-x	17,03	16,45

Fonte: O autor

Todos os CPs da série E1-x e os CPs M1-5 e M2-3<sup>14</sup> apresentaram rupturas por cisalhamento da madeira junto às interfaces com o adesivo (Figuras 59 e 60, respectivamente). Os demais CPs que romperam, apresentaram modo de ruptura por escoamento da barra de aço (Figura 61), Ressalta-se que os CPs que não romperam (E1-4, M1-1, M1-6 e M5-2) e os casos em que foi necessário proceder à correção das barras (M1-2, M5-5, M6-1, M7-1 e M7-4) foram excluídos das análises devido aos erros de execução de ensaios e às modificações das características mecânicas das barras, respectivamente.

Através do Gráfico 15 é possível verificar que os valores de  $F_{rupt,média}$  e  $F_{rupt,k}$  das séries de Maçaranduba são inferiores aos resultados registrados para as séries de Citriodora. Estes resultados contrariam a exposição realizada no capítulo 2, uma vez que a Maçaranduba possui  $\rho_{bás}$  e  $\rho_{ap}$  superiores à Citriodora. Ao longo deste sub-capítulo serão apresentadas e discutidas as diversas influências dos parâmetros materiais e físicos que influenciam as resistências mecânicas das ligações.

---

<sup>14</sup> Os modos de ruptura dos CPs M1-5 e M2-3 serão discutidos no subitem 4.4.6. que aborda a influência dos defeitos da madeira na resistência mecânica das ligações.



Figura 59. Cisalhamento da madeira em CP sem defeitos (Fonte: O autor).

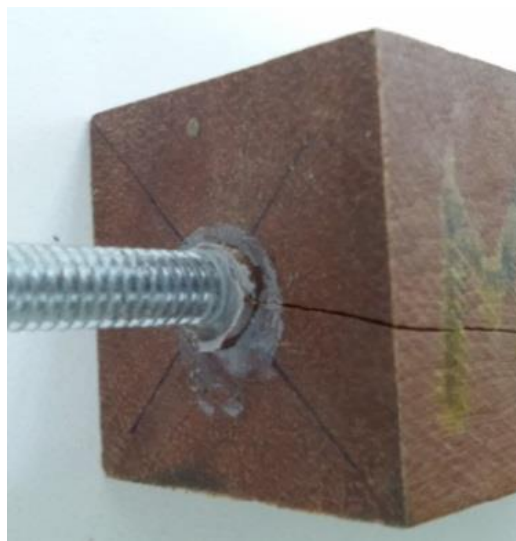


Figura 60. Cisalhamento da madeira em CP com defeito (Fonte: O autor).

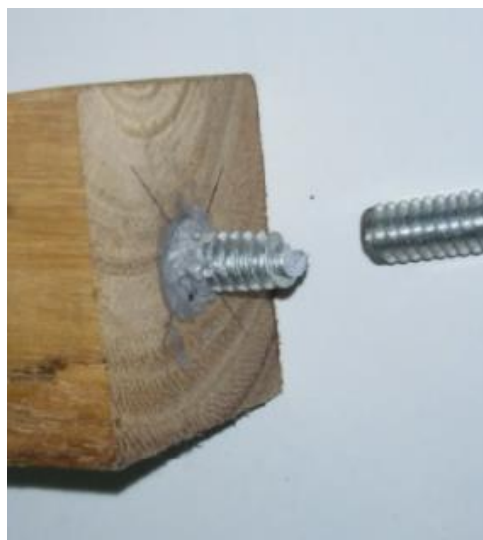


Figura 61. Ruptura por escoamento da barra (Fonte: O autor).

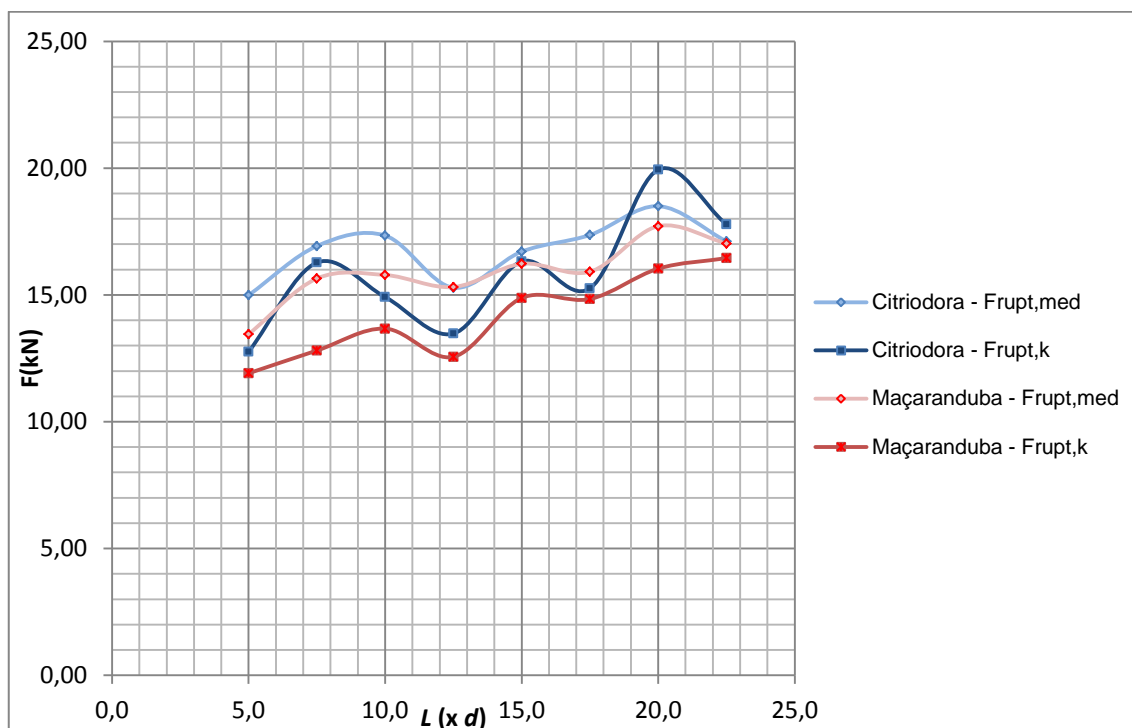


Gráfico 15. Variação de  $F_{rupt,média}$ ,  $F_{rupt,k}$  com  $L$  (Fonte: O autor).

#### 4.3.1 Influência do comprimento de ancoragem

Conforme verificado no capítulo 2, o incremento de  $L$  tende a provocar aumentos na resistência mecânica das ligações, essa variação poderá resultar em mudanças nos modos de ruptura. Quando  $L$  aumenta, o comprimento de ancoragem das barras é maior, originando um acréscimo das áreas das interfaces. O fato de haver um aumento das áreas de contato com o adesivo provoca decréscimos dos picos de tensões de cisalhamento nas extremidades da linha de adesivo, havendo uma maior distribuição do esforço ao longo das áreas de contato entre os três materiais. Por conseguinte, existe um aumento da capacidade de carga axial da ligação, no entanto nesta pesquisa a resistência à tração da barra de aço foi superada por esses ganhos.

A primeira série de Citriodora apresentou modo de ruptura por cisalhamento da madeira. Este fato é devido às áreas das interfaces madeira-adesivo e adesivo-barras da série E1-x serem menores quando comparadas com as demais séries. Isto resulta em elevadas concentrações de tensão de cisalhamento nas extremidades da linha de adesivo. Uma vez que a madeira



possui menor resistência ao cisalhamento do que a barra e o adesivo, ocorre a ruptura por cisalhamento da madeira junto à interface com o adesivo. As demais séries de Citriodora apresentaram modo de ruptura por escoamento das barras.

Na série M1-x, um CP rompeu por cisalhamento da madeira, dois CPs não romperam por erro de execução do ensaio e os demais CPs apresentaram modos de ruptura por escoamento das barras. Na série M2-x foi verificado o rompimento de um CP por cisalhamento da madeira, sendo que os demais apresentam modos de ruptura por escoamento das barras. Nas demais séries de Maçaranduba, verificou-se o modo de ruptura por escoamento das barras.

A bibliografia recomenda que a ruptura ocorra na barra de aço, o que aconteceu na maioria dos CPs ensaiados nesta pesquisa. Todavia, as exceções em que a ruptura ocorreu na madeira revelaram que a resistência do adesivo é maior do que a madeira, validando o EPX como adesivo estrutural.

Conforme referido, os modos de ruptura dos CPs M1-5 e M2-3 serão discutidos no subitem 4.3.5, uma vez que apresentam particularidades que exigem uma análise inerente aos defeitos da madeira.

Embora haja uma constância de modos de ruptura para valores de  $L$  entre  $7,5d$  e  $22,5d$ , verificou-se uma evolução da resistência mecânica das ligações, relacionada com o aumento das áreas das interfaces madeira-adesivo e adesivo-barra de aço.

Nos Gráficos de A – 17 a A – 36, constantes em Anexos, estão apresentadas as relações entre  $F_{rupt}$  e  $L$  das duas madeiras, e as respectivas linhas de tendência polinomial, linear, logarítmica, potência e exponencial. Nos Quadros 5 e 6 é possível encontrar as equações de todas as linhas de tendência calculadas, assim como os seus coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para os gráficos supracitados

Quadro 5. Linhas de tendência para  $F_{rupt}$ ,  $F_{rupt,média}$  e  $L$  – Citriodora.

L. tendência	$F_{rupt}$		$F_{rupt,média}$	
	Equação	$R^2$	equação	$R^2$
Polinomial	$F = -0,003L^2 + 0,1933x + 14,794$	0,163	$F = -0,0039L^2 + 0,2727x + 13,038$	0,248
Linear	$F = 0,1349L + 14,518$	0,160	$F = 0,1153L + 15,191$	0,380
Logarítmica	$F = 1,6695\ln(L) + 12,162$	0,169	$F = 1,4108\ln(L) + 13,227$	0,403
Potência	$F = 12,393L^{0,1079}$	0,166	$F = 13,495L^{0,0857}$	0,406
Exponencial	$F = 14,439e^{0,0087L}$	0,159	$F = 15,211e^{0,007L}$	0,379

Fonte: O autor

Quadro 6. Linhas de tendência para  $F_{rupt}$  e  $L$  – Maçaranduba.

L. tendência	$F_{rupt}$		$F_{rupt,média}$	
	Equação	$R^2$	Equação	$R^2$
Polinomial	$F = -0,0038L^2 + 0,2185x + 14,605$	0,390	$F = -0,0058L^2 + 0,3339x + 12,578$	0,742
Linear	$F = 0,1629L + 13,686$	0,245	$F = 0,1747L + 13,482$	0,722
Logarítmica	$F = 2,038\ln(L) + 10,783$	0,255	$F = 2,1363\ln(L) + 10,508$	0,766
Potência	$F = 11,229L^{0,1356}$	0,261	$F = 11,178L^{0,1385}$	0,770
Exponencial	$F = 13,637e^{0,0108L}$	0,246	$F = 13,576e^{0,0112L}$	0,711

Fonte: O autor

Conforme esperado, os gráficos das relações entre  $F_{rupt,média}$  e  $L$  permitem obter maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do que os gráficos das relações entre  $F_{rupt}$  e  $L$ , uma vez que as dispersões destes últimos são maiores. A partir da análise de  $R^2$  para  $F_{rupt,média}$  e  $L$ , presentes nos Quadros 5 e 6, é possível verificar que a linha de tendência potência apresenta uma maior aproximação aos dados. Por conseguinte, constata-se que a relação entre a resistência mecânica das ligações e  $L$  não é linear, embora a sua linha de tendência possa fornecer boas aproximações, uma vez que os seus coeficientes de determinação são próximos aos da linha de tendência potência.

O fato da linha de tendência potência apresentar melhor ajuste aos dados do que a linha de tendência linear confirma a exposição de CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008) e MARTIN, ESTÉVEZ e OTERO (2013), que referem que a relação entre a capacidade de carga das ligações e  $L$  não é linear. Os mesmos autores justificam esse fato com a não homogeneidade dos

decréscimos dos picos de esforço de cisalhamento nas extremidades do adesivo. Na extremidade embutida do adesivo ocorre um decréscimo mais acentuado da concentração de tensão do que na extremidade exterior, havendo uma tendência para a estabilização durante a variação do comprimento de ancoragem da barra. Segundo CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ (2008), a linearidade entre estes dois parâmetros apenas se verifica para pequenos comprimentos de embutimento, o que contraria as normas de dimensionamento, que admitem uma relação linear entre a resistência mecânica das ligações e  $L$ , independentemente dos valores de  $L$ .

Outro aspecto a ser considerado é o fato dos CPs da série com  $L$  igual a  $22,5d$  apresentarem decréscimos de  $F_{rupt,média}$  comparativamente com as séries com  $L$  igual a  $20,0d$ . Este fato corrobora a exposição de BUCHANAN e DENG (1996) e de PIGOZZO e LAHR (2006b), os quais referem que o valor máximo de  $L$  deverá ser de  $20,0d$ . Por outro lado, o limite  $18,0d$  referenciado por CHANS, CIMADEVILA e GUTIÉRREZ. (2013) para madeiras com densidade elevada foi ultrapassado nos casos da Citriodora e da Maçaranduba.

#### *4.3.2 Influência dos defeitos de colagem*

Para realizar a análise das influências dos defeitos de colagem na resistência mecânica da madeira, considerou-se a presença de bolhas de ar no adesivo de cada CP (Quadro A - 11, constante em Anexos). A Tabela 27 apresenta os valores de  $F_{rupt}$  das séries que possuíam igual proporção de CPs com e sem defeitos e isentos de vestígios de combustão da madeira (E4-x, E8-x, M4-x e M8-x). Esta amostra de dados corresponde a 25% do total de CPs utilizados na campanha experimental.

Tabela 27.  $F_{rupt}$  com e sem defeitos de colagem.

Série	$F_{rupt}$ (kN)		Série	$F_{rupt}$ (kN)	
	C/ defeitos	S/ defeitos		C/ defeitos	S/ defeitos
E4-x	18,34	16,23	M4-x	18,59	16,79
	14,51	15,88		15,88	15,34
	13,28	13,47		18,55	12,56
E8-x	17,51	17,44	M7-x	18,41	15,24
	17,26	17,15		17,50	18,17
	16,84	16,47		16,63	18,39

Fonte: O autor

Foram realizados testes *t-Student* bilaterais nas séries E4-x, E8-x, M4-x e M7-x, com nível de significância de 5%. Na Tabela 28 encontram-se os resultados dos testes *t-Student* para as quatro séries utilizadas. É possível constatar, para as séries analisadas, que  $t_{crit}$  é sempre superior a *Stat t*, o que significa que não foram encontradas diferenças estatísticas entre as médias de  $F_{rupt}$  dos CPs com e sem defeitos.

Tabela 28. Testes *t-Student* para efeitos dos erros de colagem em  $F_{rupt}$ .

	E4-x	E8-x	M4-x	M7-x
GL	4	4	4	4
Stat t	0,104	0,532	0,389	0,217
P(T<=t)	0,922	0,623	0,717	0,839
$t_{crit}$	2,776	2,776	2,776	2,776

Fonte: O autor

É possível afirmar que os defeitos de colagem não provocaram decréscimos da resistência mecânica das ligações, uma vez que não foram registradas diferenças significativas nas médias dos CPs com e sem defeitos. Visto que não foram registrados decréscimos da  $F_{rupt}$  nos CPs com defeitos de colagem, os possíveis efeitos negativos das bolhas de ar nos adesivos não se fizeram notar. Os defeitos de colagem, que ocorreram aleatoriamente, não comprometeram a resistência mecânica das ligações, uma vez que as superfícies da barra e das paredes dos furos nas madeiras ficaram revestidas pelo adesivo. Além disso, as bolhas de ar constituíam uma pequena

porcentagem em relação ao volume de adesivo presente nos furos das conexões.

#### 4.3.3 Influência da combustão da madeira

Conforme o Quadro A - 11, constante em Anexos, oito CPs apresentaram vestígios de combustão junto à linha de colagem. Por conseguinte, as séries M2-x, M5-x e M6-x apresentaram apenas um CP com vestígios de combustão da madeira, enquanto que a série M8-x apresentou três casos, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7. Comparação com CPs com vestígios de combustão.

CP	$F_{rupt}$ (kN)	Combustão?
M2-1	12,81	Não
M2-2	15,49	Não
M2-3	17,49	Não
M2-4	18,28	Sim
M2-5	12,84	Não
M2-6	16,87	Não
M5-1	17,24	Sim
M5-3	14,70	Não
M5-4	17,03	Não
M5-6	15,88	Não
M6-2	13,53	Não
M6-3	16,15	Sim
M6-4	16,80	Não
M6-5	16,46	Não
M6-6	16,20	Não

Fonte: O autor

É possível verificar que M2-4 e M5-1 possuem os maiores valores de  $F_{rupt}$ , comparativamente aos demais CPs das suas séries. M6-3 apresentou  $F_{rupt}$  próximo ao valor máximo registrado na série E6-x. Por conseguinte, é possível verificar que a combustão da madeira junto à linha de colagem não reduziu as resistências mecânicas dos CPs.

Para avaliar a influência da combustão da madeira na resistência mecânica das ligações na série M8-x, foi realizado um teste *t-Student*, com nível de significância de 5%. O resultado do teste revelou que o valor de  $t_{crit}$  é

superior a *Stat t* (Tabela 29), o que significa que não existe diferença estatística entre as médias de  $F_{rupt}$  com e sem vestígios de combustão da madeira junto à linha de cola.

Tabela 29. Teste *t-Student* para influência da combustão da madeira.

	<b>M8-x</b>
GL	4
Stat t	0,542
P(T<=t)	0,617
$t_{crit}$	4,303

Fonte: O autor

A combustão da madeira não interferiu na resistência mecânica da ligação devido ao fato de terem sido detectadas áreas reduzidas com este tipo de anomalia comparativamente à superfície de colagem entre o adesivo e a madeira.

#### 4.3.4 Influência dos ângulos de inclinação

Conforme constatado na revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, a variação de  $\theta$  interfere na resistência mecânica das ligações. Os Gráficos de A – 37 a A – 57, presentes em Anexos, mostram a variação de  $F_{rupt}$  com  $\theta$ . Este fato se justifica pela diferença de  $F_{rupt}$  quando existem modos de ruptura diferentes. Por conseguinte, a série M1-x ficou reduzida a dois CPs, o que impossibilita a sua inclusão na análise estatística.

Para os quinze gráficos  $F_{rupt} \times \theta$ , foram determinadas linhas de tendência exponencial, linear, logarítmica, polinomial e potência. A Tabela A – 18, constante em Anexos, apresenta todas as linhas de tendência e respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Para avaliar a adequabilidade da linha de tendência em relação aos dados dos gráficos, procedeu-se à mesma análise realizada em 4.3.1, na qual se fez a comparação dos valores de  $R^2$ .

Centrando a análise na média de  $R^2$ , é possível visualizar que a linha de tendência que menos se adapta aos dados é a exponencial ( $R^2 = 0,14490$ ) e a que melhor se aproxima dos valores obtidos é a polinomial ( $R^2 = 0,40361$ ). Por

outro lado, os valores médios de  $R^2$  da Citriodora são inferiores aos da Maçaranduba. Excetuando a linha de tendência polinomial, todas as restantes têm valores de  $R^2$  abaixo de 0,16.

Fazendo uma análise às evoluções das linhas de tendência exponenciais, é possível constatar que dez séries apresentam evoluções negativas de  $F_{rupt}$  quando  $\theta$  aumenta e cinco séries apresentam relações positivas entre estes dois parâmetros. Em relação à linha de tendência linear, onze séries apresentam correlação linear negativa entre  $F_{rupt}$  e  $\theta$ , sendo que as quatro restantes apresentam correlação linear positiva. Existem onze séries com linhas de tendência logarítmicas que revelam um decréscimo de  $F_{rupt}$  com o aumento de  $\theta$ , sendo que existem quatro séries que mostram uma relação positiva entre estes dois fatores.

Existem dez séries com linhas de tendência polinomiais cujas concavidades estão voltadas para o sentido positivo do eixo  $yy$  e cinco casos com as concavidades voltadas para o sentido negativo do mesmo eixo. Analisando os casos das linhas de tendência do tipo potência, é possível observar que dez séries apresentam relações negativas entre  $F_{rupt}$  e  $\theta$ , sendo possível encontrar cinco séries que apresentam relação positiva.

Da análise das linhas de tendência, é possível verificar que existem mais relações negativas (52) do que positivas (23), por conseguinte, é possível afirmar que existe uma tendência para ocorrer decréscimos da resistência mecânica da ligação com o aumento de  $\theta$ . As exposições de FAYE *et al.* (2003), PIGOZZO e LAHR (2006c), WIDMANN, STEIGER e GEHRI (2007) e TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011) confirmam o mesmo fenômeno. Uma vez que a aplicação da carga de tração na ligação foi realizada paralelamente às fibras da madeira e ao fato da barra de aço não ser paralela a estas, origina-se uma excentricidade em relação ao eixo da barra. Este fato provoca um esforço de flexo-tração. Quanto maior for  $\theta$ , maior será essa excentricidade e, devido ao fato do momento de inércia da barra ser constante, a resistência mecânica da ligação diminui.

#### 4.3.5 Influência dos defeitos da madeira

Conforme apresentado, a Citriodora apresenta maior variedade e quantidade de defeitos (nó), uma vez que a madeira foi extraída aos oito anos de idade. De um modo geral, madeira de Citriodora utilizada nesta pesquisa apresentou nós firmes de pequenos diâmetros (média de 1,2 cm) em todo o comprimento do seu tronco.

Quanto à Maçaranduba, não foram constatados defeitos de crescimento (nós, bolsas de resina e presença de medula), no entanto, foram detectados dois CPs com defeitos de secagem (rachadura) com espessuras inferiores a 1 mm.

O Quadro 8 apresenta o resumo dos defeitos de crescimento e de secagem da madeira e o modo de ruptura dos CPs de Citriodora e Maçaranduba das séries que apresentam cisalhamento da madeira. Conforme é possível verificar nos Quadros A – 1 a A - 10, nas demais séries constatou-se CPs com defeitos de secagem e crescimento, no entanto apresentaram escoamento das barras.

Quadro 8. Rupturas e defeitos da madeira nos CPs (E1-x, M1-x e M2-x).

CP	Modo de ruptura	Nós	Rachaduras	Medula	Bolsa de resina
E1-1	madeira	-	-	-	-
E1-2	madeira	-	Sim	-	-
E1-3	madeira	-	-	-	-
E1-5	madeira	-	-	-	-
E1-6	madeira	-	-	-	-
M1-3	barra	-	-	-	-
M1-4	barra	-	-	-	-
M1-5	madeira	-	Sim	-	-
M2-1	barra	-	-	-	-
M2-2	barra	-	-	-	-
M2-3	madeira	-	Sim	-	-
M2-4	barra	-	-	-	-
M2-5	barra	-	-	-	-
M2-6	barra	-	-	-	-

Fonte: O autor

No Quadro 8 é possível constatar a existência de um CP da série E1-x ( $L = 5,0d$ ) com presença de rachadura e modo de ruptura por cisalhamento da



madeira. Na série E2-x ( $L = 7,5d$ ) é possível verificar que E2-1 apresenta defeitos de crescimento da madeira (nós e bolsa de resina) e ruptura por escoamento da barra. Em relação à Maçaranduba, as séries M1-x ( $L = 5,0d$ ) e M2-x ( $L = 7,5d$ ) apresentaram um CP (M1-5 e M2-3), com modo de ruptura por cisalhamento da madeira e com rachaduras, enquanto que nos demais casos ocorreu o escoamento das barras e não foram detectados defeitos de crescimento e secagem das madeiras.

Os defeitos de secagem e de crescimento da madeira não influenciaram os modos de ruptura dos CPs de Citriodora. Este fato é devido à ausência de modos de ruptura diferentes entre CPs com e sem defeitos. No entanto, no caso da Maçaranduba, é possível afirmar que as rachaduras influenciaram o modo de ruptura da ligação nos CPs M1-5 e M2-3, uma vez que, para os demais casos não foram constatados modos de ruptura iguais.

Realizando uma análise dos defeitos dos blocos de madeira dos CPs existentes antes do ensaio (Figura 62), é possível constatar que a espessura da rachadura do CP M1-5 aumentou. O mesmo fato também foi observado para o CP M2-3.

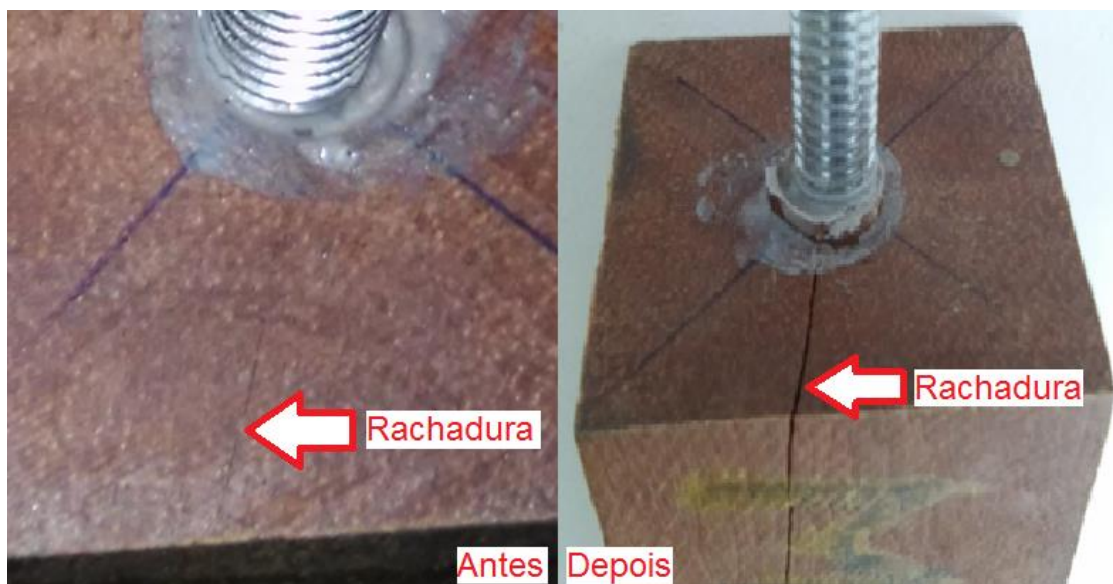


Figura 62. Variação da rachadura do CP M1-5 (Fonte: O autor).

As rachaduras poderão ter originado concentrações de tensões que reduziram a resistência mecânica das madeiras em relação ao esforço de

cisalhamento. Além disso, o fato da espessura da rachadura ter aumentado, sugere que a ruptura da ligação se iniciou através desta.

Para a Citriodora, observa-se que os defeitos de crescimento e de secagem da madeira não influenciaram o seu modo de ruptura, uma vez que não existem séries que apresentam dois modos de ruptura diferentes. Na Maçaranduba, constata-se que os defeitos de secagem influenciaram o modo de ruptura de dois CPs, ocorrendo o rompimento da madeira.

#### 4.3.6 Influência da densidade da madeira

Conforme já referido, a Maçaranduba possui valores de  $\rho_{ap}$  e de  $\rho_{bás}$  superiores aos da Citriodora. O Gráfico 16 apresenta a comparação entre os valores de  $F_{rupt,média}$  para cada série de CPs de Citriodora e de Maçaranduba.

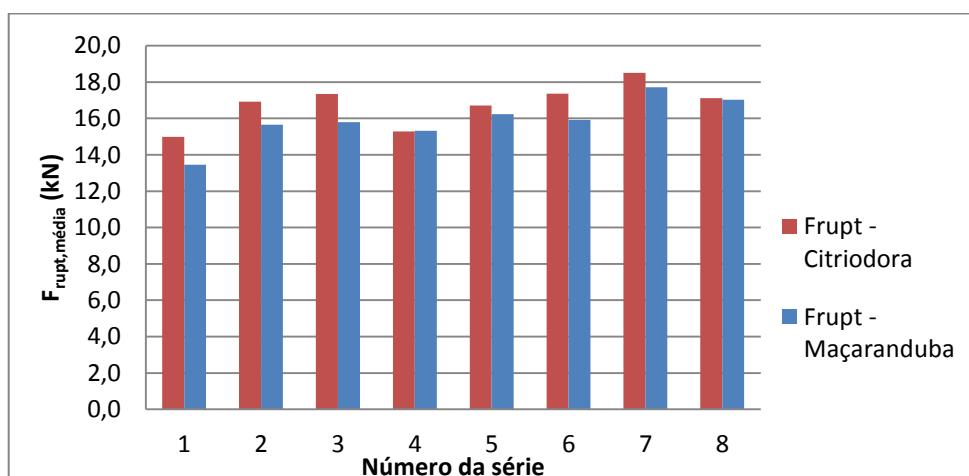


Gráfico 16.  $F_{rupt,média}$  de Citriodora e de Maçaranduba (Fonte: O autor).

O Gráfico 16 apresenta valores de  $F_{rupt,média}$  para a Citriodora 5% superiores em relação à Maçaranduba. Isto pode ser explicado pelo fato da Maçaranduba apresentar maiores valores de  $\theta$  do que a Citriodora. Outro aspecto que também poderá explicar a menor resistência mecânica das ligações com Maçaranduba é a exposição de TLUSTOCHOWICZ, SERRANO e STEIGER (2011), na qual é referido que existe menor impregnação de adesivos em madeiras com maior densidade, o que reduz a resistência mecânica.

#### 4.3.7 Influência do teor de umidade da madeira

Para determinar a influência do teor de umidade da madeira na resistência mecânica das ligações, considerou-se a relação entre  $F_{rupt}$  e  $U_{estufa}$ . O Gráfico 17 apresenta a relação entre  $F_{rupt}$  e  $U_{estufa}$  de todos os CPs de Citriodora e de Maçaranduba. O Quadro 9 apresenta os coeficientes de Pearson para caracterizar o tipo de correlação linear entre  $F_{rupt}$  e  $U_{estufa}$ .

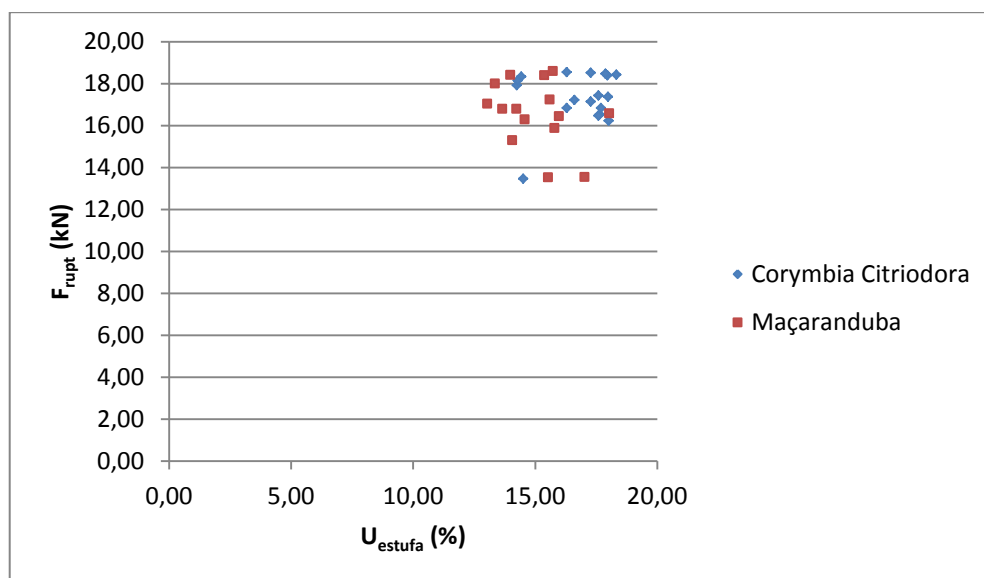


Gráfico 17.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  (Fonte: O autor).

Quadro 9. Coef. de Pearson entre  $U_{estufa}$  e  $F_{rupt}$ .

	$U_{estufa}$	$F_{rupt}$
$U_{estufa}$	-	-0,062
$F_{rupt}$	-0,062	-

Fonte: O autor

Analisando o Gráfico 17, é possível verificar que, apesar da maioria dos CPs de Maçaranduba apresentar menores valores de  $U_{estufa}$ , as resistências mecânicas das duas espécies são semelhantes. Observando o Quadro 9, é possível constatar que o coeficiente de Pearson é baixo, o que significa que a correlação linear entre  $F_{rupt}$  e  $U_{estufa}$  é fraca.

Por conseguinte, é possível afirmar que não ocorreu a influência dos teores de umidade das madeiras nas resistências mecânicas das ligações. Este fato é justificado pela baixa variação do teor de umidade das madeiras e por este ser próximo ao valor de equilíbrio para a cidade de Salvador.

## 5 CONCLUSÕES

Através das análises e discussões apresentadas, é possível concluir:

a) A Citriodora apresentou maiores teores de umidade do que a Maçaranduba, no entanto as suas resistências mecânicas à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras foram inferiores;

b) Se a furação das madeiras for realizada com furadeiras que possuam excentricidade no mandril, a tendência para haver desvios nas furações é mais acentuada em madeiras com densidades mais elevadas e em comprimentos de furação maiores;

c) O aumento do comprimento de ancoragem produziu aumentos da resistência das ligações não lineares até comprimentos de ancoragem de 20,0 vezes o diâmetro das barras;

d) Existe uma tendência para a diminuição da resistência mecânica da ligação com o aumento da inclinação do ângulo entre a barra de aço e as fibras da madeira, decorrente da furação com furadeiras com excentricidade no mandril;

e) O método de colagem das barras influenciou o aparecimento de bolhas de ar na linha de colagem em 50% dos corpos de prova, no entanto não foram detectadas interrupções nas interfaces madeira-adesivo e barra adesivo, não provocando decréscimos da resistência das ligações;

f) Os pontos de combustão da madeira, distribuídos aleatoriamente ao longo da interface com o adesivo, não interferiram na redução da resistência mecânica das ligações;

g) As ligações com barras de aço coladas em madeira podem ser executas *in situ* desde que sujeitas a um controle de qualidade, considerando teores de umidade entre 12% a 18%, ângulos de furação até 6º em relação às fibras da madeira e comprimentos de ancoragem que não ultrapassem vinte vezes o diâmetro da barra.

h) As rachaduras contribuem para a definição do modo de ruptura dos corpos de prova;

i) Ligações com barras coladas em madeira de Maçaranduba apresentaram menor resistência mecânica que as conexões com madeira de Citriodora.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Durante esta pesquisa, foram identificadas várias lacunas de conhecimento relevantes para a determinação das influências na resistência mecânica das ligações com barras de aço coladas em madeira de alta densidade:

- a) Determinação da influência da localização dos defeitos de crescimento e secagem da madeira na resistência mecânica das ligações;
- b) Determinação da qualidade da adesão em madeiras de alta densidade e epóxi;
- c) Determinação da resistência mecânica de ligações com barras de aço rosqueado com diâmetros superiores a 6,3 mm coladas em madeiras da classe C60.

## REFERÊNCIAS

AICHER, S.; GUSTAFSSON, P. J.; WOLF, M. Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. In: Proceedings of the international RILEM symposium on timber engineering, 1999, Stockholm. *Proceedings of the international RILEM symposium on timber engineering*. Stockholm, 1999.

AICHER, S.; HERR, J. Bonded glulam-steel rod connections with long anchorage length. *Otto-Graf-Journal*, v. 8: p. 232-254, 1997.

AICHER, S.; HÖFFLIN, L.; WOLF, M. Influence of specimen geometry on stress distributions in pull-out tests of glued-in steel rods in wood. *Otto-Graf-Journal*, v. 9: p. 205-217, 1998.

ALUMINIUM ASSOCIATION. Aluminium design manual. Washington DC, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM D-1761**: Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood. In: Annual Book of ASTM Standards, 1988.

AMOA, M.; KWARTEN, F.; DADZIE, P. Bending properties and joint efficiency of some tropical hardwoods finger-jointed in green and dry states. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 11: p. 57-64, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-1**: Blocos cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15961-1**: Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7000**: Alumínio e suas ligas – Produtos extrudados – Propriedades mecânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7007**: Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BAINBRIDGE, R. et al. Bonded-in rod connections for timber structures – development of design methods and test observations. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 22, p. 47-59, 2002.

BASIC CARPENTRY TECHNIQUES, Woodwork Joints. Disponível em: <<http://www.basiccarpentrytechniques.com/Woodwork%20Joints/Woodwork%20Joints%207.html>>. Acesso em: 03 out 2015.

BENGTSSON, C.; KEMMSIES, M.; JOHANSSON, C. J. Production control methods for glued-in rods for timber structures. In: 6th World Conference on Timber Engineering, 2000, Whistler. *Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering*. Whistler, 2000.

BERNASCONI, A. Axially loaded glued-in rods for high capacity joints – behaviour and resistance. In: International RILEM symposium on joints in timber structures, Stuttgart, 2001. *Proceedings of the international RILEM symposium on joints in timber structures*. Stuttgart, 2001.

BLASS, H.; LASKEWITZ, B. Effect of spacing and edge distance on the axial strength of glued-in rods. In: 37th Conference of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 1999, Graz. *Proceedings of the 32th Conference of CIB-W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Graz, 1999.

BROUGHTON, J.; HUTCHINSON, A. LICONS – Low intrusion conservation systems for timber structures – Craf-1999-71216. Task 2.2: Review of relevant materials and their requirements for timber repair and restoration. Oxford: Oxford Brookes University, 2003.

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Adhesive systems for structural connections in timber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 21, p. 177-186, 2001c.

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

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber. *Materials and Structures*, v. 34, p. 100-109, 2001b.

BUCHANAN, A. Fire resistance of epoxied steel rods in glulam timber. In: Pacific Timber Engineering Conference. *Proceedings of th Pacific Timber Engineering Conference*. Gold Coast, 1994.

BUCHANAN, A. H.; BARBER, D. J. Fire resistance of epoxied steel rods in glulam timber. *NZ Timber Design Journal*, v. 5, p. 12– 18, 1996.

BUCHANAN, A.; DENG, X. Strength of steel rods in glulam timber. In: International Wood Engineering Conference. *Proceedings of the International Wood Conference*. New Orleans, 1996.

BUCHANAN, A.; MOSS, P. Design of epoxied steel rods in glulam timber. In: Pacific Timber Engineering Conference. *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference*. Rotorua, 1999.

BUCHANAN, A.; MOSS, P.; WONG, N. Ductile moment-resisting connections in glulam beams. In: NZSEE Conference, 2001, Taupo. *Proceedings of the NZSEE Conference*. Taupo, 2001.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF), Woodwork Joints. Disponível em: <[http://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx#categoria\\_738](http://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx#categoria_738)>. Acesso em: 03 out 2015.

BOYLE, M. A.; MARTIN, C. J.; NEUNER, J. D. Epoxy resins. In: MIRACLE, D. B.; DONALDSON, S. L. *ASM Handbook Volume 21: Composites*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001. p. 76 a 89.

BUENO, E.; BITTENCOURT, T. Introdução aos Conceitos Básicos da Mecânica da Fratura Elasto-plástica. Disponível em: <[http://www.lmc.ep.usp.br/people/tbitten/gmec/Boletins\\_Tecnicos/BT\\_PEF\\_9805.pdf](http://www.lmc.ep.usp.br/people/tbitten/gmec/Boletins_Tecnicos/BT_PEF_9805.pdf)>. Acesso em 05 jun 2015.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª ed. Edições LTC, Rio de Janeiro, 2008.

CARLING, O. Dimensionering av träkonstruktioner. AB Svensk Byggtjänst och Träteknik, Stockholm, 1992.

CARRASCO, E. V. M.; CALDAS, R. B.; A. L. C.; FAKURY, R. H. Análise numérica da transferência de calor em madeiras brasileiras em situação de incêndio. *CERNE (UFLA)*, v. 16, p. 58-65, 2010.

CARVALHO, R. F. et al. Estrutura de madeira projetada em substituição a uma metálica que colapsou. In: XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2014, Natal - RN. *Caderno de Resumos XIV Ebramem*. Natal - RN: Moura Ramos Gráfica Editora, v. 1, p.50, 2014.

CAVALLI, A. et al. Mechanical performance of full scale steel-timber epoxy joints after exposure to extreme environmental conditions. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 54, p. 86-92, 2014.

CECCOTI, A. Timber-concrete composite structure. In: Timber Engineering – STEP 1. Almere, 1995.

CHANS, D. O. et al. Influence of timber density on the axial strength of joints made with glued-in steel rods: An experimental approach. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 30, p. 380-385, 2010.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Glued in joints in hardwood timber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 28, p. 457-463, 2008.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber. *Materials and Design*, v. 30, p. 1325-1332, 2009.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Orientation of bars glued on glued laminated products: Parallel vs perpendicular. *Composites: Part B*, v. 62, p. 97-103, 2014.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Withdrawal strength of threaded steel rods glued with epoxy in wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 44, p. 115-121, 2013.

CIMADEVILA, J. E. et al. New anchoring system with adhesive bulbs for steel rod joints in wood. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 583-589, 2012.

CIMADEVILA, J. E.; CHANS, D. O.; GUTIÉRREZ, E. M. Adhesive multi-bulbs: A novel anchoring system using threaded steel rods glued into wood. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 131-136, 2013.

CIMADEVILA, J. E.; RODRÍGUEZ, J. A. V.; CHANS, M. D. O. Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 27, p. 136-144, 2007.

CRAWFORD, R. J. *Plastics engineering*. 3ª edição. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

CRUZ, H., et al. Execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de madeira com colas epoxídicas e FRPs *In: 1º Congresso Ibérico sobre A Madeira na Construção – CIMAD'04*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

CRUZ, H.; MOURA, J.; MACHADO, J. The use of FRP in the strengthening of timber-reinforced masonry load-bearing walls. *In: LOURENÇO, P. B. Historical Constructions*. Guimarães: P. Roca, 2001. p. 847 a 856.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, n. 29, p. 173– 185, 2009.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. Rehabilitation of timber structures – Preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives. *Construction and Building Materials*, n. 25, p. 3570-3582, 2011.

DEL SENNO, M.; PIAZZA, M.; TOMASI, R. Axial glued-in steel timber joints – experimental and numerical analysis. *Holz Roh Werkst*, v. 62, p. 137-146, 2004.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **Norm DIN 1052:2004 – 08:** Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Berlin, 2004.

DIAS, J. M. S. et al. Inclinação da furação em ligações coladas entre barras de aço e madeira de *Corymbia Citriodora* e Maçaranduba. *In: XV Encontro Latino Americano de Pós Graduação*, São José dos Campos, SP. *Anais do XV Encontro Latino Americano de Pós Graduação*. São José dos Campos: UNIVAP, 2015.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia Florestalis*, v. 65, p. 102-113, 2004.

EHLBECK, J.; BELCHIOR-GASPARD, P.; GEROLD, M. Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweisen von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von grossen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern. Teil 2: Einfluss von Klimaeinwirkung und Langzeitbelastung. Research report, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 408**: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2011.

EHLBECK, J.; SIEBERT, W. Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweisen von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von grossen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern. Teil 1: Einleimmethoden, Messverfahren, Haftspannungsverlauf. Research report, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe, 1987.

EPÓXI. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2015. Disponível em:  
<<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ep%C3%B3xi&oldid=43688759>>. Acesso em: 9 out 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Eurocode 5**: Design of timber structures – Part 2: Bridges. Brussels, 1997.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Eurocode 9**: Design of aluminium structures – Part 1-1: General structural rules. Brussels, 1999.

EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY (COST). Disponível em:  
<[http://www.cost.eu/COST\\_Actions/fps/Actions/FP1402?parties](http://www.cost.eu/COST_Actions/fps/Actions/FP1402?parties)>. Acesso em: 20 mai 2015.

FALK, R. H. Wood as a Sustainable Building Material. In: ROSS, R. et al. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service – Forest Products Laboratory, 2010. p. 1-1 a 1-6.

FAYE, C. et al. French data concerning glued-in rods. In: 37th Conference of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2004, Edinburgh. *Proceedings of the 37th Conference of CIB-W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Edinburgh, 2004.

FECHT, S. et al. Adhesively bonded hardwood joints under room temperature and elevated temperatures. *The Journal of Adhesion*, v. 90, p. 401-419, 2014.

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

FIBERLINE. Fiberline Design Manual. Fiberline. Kolding, Denmark, 2003.

FUEYO, J. G. et al. Reduction of perpendicular-to-grain stresses in the apex zone of curved beams using glued-in rods. *Materials and Structures*, v. 43, p. 463-474, 2009.

GARDELLE, V.; MORLIER, P. Geometric parameters which affect the short term resistance of an axially loaded glued-in rod. *Materials and Structures Journal*, v. 40: p.127-138, 2007.

GEROLD, M. Verbund von Holz und Gewindestangen aus Stahl. *Bautechnik*, v. 69: p. 167-178, 1992.

GEROLD, M. Anwendung von in Holz eingebrachten, in Schaftrichtung beanspruchten Gewindestangen aus Stahl. *Bautechnik*, v. 70: p. 603-613, 1993.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: ROSS, R. et al. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service – Forest Products Laboratory, 2010. p. 4-1 a 4-19.

GRUNWALD, C. et al. Adhesively bonded timber joints – Do defects matter? *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 55: p. 12-17, 2014.

GUSTAFSSON, P.; SERRANO, E. Glued-in rods for timber structures – development of a calculation model. Report TVSM – 3056. Lund: Lund University, 2001.

HARRIS, S. Fire Resistance of Epoxy-grouted steel rod connections in laminated veneer lumber (LVL). 2004. 136p. Dissertação (Mestrado) – Christchurch, University of Canterbury, Christchurch. 2004.

HARVEY, K. et al Bounded-in pultrusions for moment resisting timber connections. In: 33rd Conference of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2000, Delft. *Proceedings of the 33rd of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Delft, 2000.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). *Telopea*, v. 6: p. 185-504, 1995.

HOOD DISTRIBUTION. Engineered wood products. Disponível em: <[http://www.hooddistribution.com/products/mcquesten/engineered\\_wood\\_products.html](http://www.hooddistribution.com/products/mcquesten/engineered_wood_products.html)>. Acesso em 16 junho 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Temperatura EMA (Highstock) – Precipitação. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/projetos/grafico/emc\\_html\\_pg.php](http://www.inmet.gov.br/projetos/grafico/emc_html_pg.php)>. Acesso em: 08 setembro 2015a.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Desvio de chuva acumulada total mensal (mm). Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/chuva\\_desv\\_men/mostra\\_mapa.php](http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/chuva_desv_men/mostra_mapa.php)>. Acesso em: 08 setembro 2015b.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Anomalias de precipitação – Método dos quantis. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/quantis2>>. Acesso em: 08 setembro 2015c.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Temperatura EMA (Highstock) – Umidade. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/projetos/grafico/emc\\_html\\_pg.php](http://www.inmet.gov.br/projetos/grafico/emc_html_pg.php)>. Acesso em: 08 setembro 2015d.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Eucalipto citriodora. São Paulo: IPT, 2013. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/12.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/12.htm)>. Acesso em: 22 julho 2015a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras - Maçaranduba. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/4.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/4.htm)> Acesso em: 22 julho 2015b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira:** uso sustentável na construção civil. 2ª Ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo: Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, 2009.

INTEGRATED PUBLISHING. Laminated Lumber. Disponível em: <<http://www.tpub.com/engbas/6-4.htm>>. Acesso em 16 junho 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 898-1**: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. Bolts, screws and studs with specified property classes. Coarse thread and fine pitch thread. London: ISO, 2013.

ISAKSSON, T.; THELANDERSSON, S. Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications. *Building and Environment*, v. 59, p. 239-249, 2013.

JENSEN, J. L.; GUSTAFSSON, P. J. Shear Strength of beam splice joints with glued-in rods. *Journal of Wood Science*, v. 50, p. 123-129, 2004.

JOHANSSON, C – J: Glued-in bolts. In: *Timber Engineering, STEP 1 basis of design, material properties, structural components and joints*. Centrum Hout, Almere, 1995.

JOHANSSON JÄNKÄNPÄÄ, L.; Limmade förband i stora träkonstruktioner. 2008. 53p. Dissertação (Mestrado) – Lulea University of Technology, Lulea. 2008.

JUNIOR, C. C.; LAHR, F. A. R. DIAS, A. A. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira. Manole, Barueri, SP, 2003.

KORIN, U.; BUCHANAN, A.; MOSS, P. Effect of bar arrangement on the tensile strength of epoxied end bolts in glulam. In: Pacific Timber Engineering Conference, 1999, Rotorua. *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference*. Rotorua, 1999.

LARTIGAU, J. et al. Effect of temperature on the mechanical performance of glued-in rods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 57, p. 79-84, 2015.

LING, Z. et al. Pull-out strength and bond behavior of axially loaded rebar glued-in glulam. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 440-449, 2014.

MADHOUSHI, M.; ANSELL, M. P. Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 24, p. 319-325, 2004.

MADSEN, B. Timber connections with strength and reliability of steel. In: International Wood Conference. *Proceedings of the International Wood Conference*. Toronto, 1996.

MARTÍN, E.; ESTÉVEZ, J.; OTERO, D. Influence of geometric and mechanical parameters on stress states caused by threaded rods glued in wood. *European Journal of Wood Production*, v. 71, p. 259-266, 2013.



MELO, J. E. **Disciplina de Sistemas Estruturais em Madeira**. Brasília, 2013. (Apostila).

MIOTTO, J. L. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 2009. 357p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

MUSSA, O. *et al.* Time-temperature dependence of thermomechanical recovery of cold curing structural adhesives. *Adhesion and Adhesives* v. 35, p. 94-101, 2013.

MÖLLER, K.; HEMMER, K. Eingeleimte Gewindestandgen. *Bauen mit Holz*, v. 83, p. 296-298, 1981.

PARIDA, G.; JOHNSON, H.; FRAGIACOMO, M. Provisions for ductile behavior of timber-to-steel connections with multiple glued-in rods. *Journal of Structural Engineering*, v. 139, p. 1468-1477, 2013.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Madeira. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

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

PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. Avaliação da resistência de ancoragem de barras de aço coladas à 45°, em vigas roliças naturais de eucaliptus citriodora, tratadas com CCA. In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. *Anais do X Ebramem*. São Pedro – SP, 2006c.

PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. Avaliação da resistência de ancoragem de barras de aço coladas, com resina epóxi, considerando a variação dos diâmetros das barras, em vigas de pinus oocarpa shied. In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. *Anais do X Ebramem*. São Pedro – SP, 2006d.

PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. Comparações das resistências de ancoragens de barras de aço, coladas com resina epóxi, submetidas a diferentes tratamentos superficiais e variações de umidades após as colagens, em vigas de eucalipto citriodora. In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. *Anais do X Ebramem*. São Pedro – SP, 2006a.

PIGOZZO, J. C.; LAHR, F. A. R. O comportamento das barras de aço ancoradas na madeira. Resinas estruturais, formas de ruptura e elementos de projeto. In: X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006, São Pedro - SP. Anais do X Ebramem. São Pedro – SP, 2006b.

PINTO, E. M. ; Carlito Calil Jr. . O comportamento da madeira exposta ao fogo. In: XII EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 2010, Lavras-MG. *Anais do XII Ebramem*. Lavras-MG, 2010

PINTO, E. M.; Carlito Calil Jr. . A madeira: Um material Construtivo Resistente ao Fogo. *Revista Eletrônica de Ciências*, USP-São Carlos, v. 1, p. 1-2, 2004.

PINTO, E. M. ; Carlito Calil Jr. . Determinação da taxa de carbonização de vigas estruturais de *E. citriodora* e *E. grandis*. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Passo Fundo - RS, v. 5, p. 1-15, 2005.

PIZZO, B. et al. Comparison of thermal expansion of wood and epoxy adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 60: p. 285-290, 2002.

PORTELLA, M. O. G. et al. Atmospheric corrosion rates of copper, galvanized steel, carbon steel and aluminum in the metropolitan region of Salvador, BA, Northeast Brazil. *Procedia Engineering*, 42, p. 171-185, 2012.

RAMMER, D. R. Fastenings. In: ROSS, R. et al. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service – Forest Products Laboratory, 2010. p. 8-1 a 8-28.

REVENIDO. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Revenido>>. Acesso em: 17 junho 2015b.

RIBERHOLT, H. Glued bolts in glulam. In: 19th conference of CIB-W18, 1986, Florence. *Proceedings of the 19th conference of CIB-W18*. Florence, 1986.

RIBERHOLT, H. Glued bolts in glulam – proposals for CIB code. In: 19th conference of CIB-W18, 1988, Parksville. *Proceedings of the 21st conference of CIB-W18*. Parksville, 1988.

RITTER, M. A. Timber Bridges. Madison, Forest Products Laboratory – Forest Service, 1990.

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

ROYMECH, Glass. Disponível em: <[http://www.roymech.co.uk/Useful\\_Tables/Matter/Glass.html](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Matter/Glass.html)>. Acesso em: 15 abr 2015.

SAINT GOBAIN. Introduction to glass. Disponível em: <<http://www.saint-gobain-sekurit.com/glazingcatalogue/glass-properties>>. Acesso em 15 abr 2015.

SERRANO, E. A numerical study of the shear-strength-predicting capabilities of test specimens for wood-adhesive bonds. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 24, p. 23-35, 2004.

SERRANO, E. Glued-in rods for timber structures – a 3D model and finite element parameter studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, n. 21, p. 115-127, 2001a.

SERRANO, E. Glued-in rods for timber structures – An experimental study of softening behaviour. *Materials and Structures*, n. 34, p. 228-234, 2001b.

SERRANO, E.; GUSTAFSSON, P. J. Fracture mechanics in timber engineering – Strength analyses of components and joints. *Materials and Structures*, n. 40, p. 87–96, 2006.

SIDERURGIA BRASIL. Tratamentos térmicos: têmpera e revenimento. Disponível em: <<http://www.siderurgiabrasil.com.br/novosb/component/content/article/106-materias22/684-tempera-revenimento>>. Acesso em: 17 junho 2015.

SOUZA, L. G. Estudo avalia custos de diferentes sistemas de edificação de casas. *Revista da Madeira*, n. 137, 2013.

STARK, N.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-based composite materials panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: ROSS, R. et al. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service – Forest Products Laboratory, 2010. p. 11-1 a 1-27.

STEIGER, R.; GHERI, E.; WIDMANN, R. Glued-in rods: a design approach for axially loaded single rods set parallel to the grain. In: 37th Conference of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2004, Edinburgh. *Proceedings of the 37th Conference of CIB-W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Edinburgh, 2004.

STEIGER, R.; GEHRI, E.; WIDMANN, R. Pull-out strength of axially steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Materials and Structures*, v. 40: p. 69-78, 2007.

STEPINAC, M. et al. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards. In: Meeting 46 of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2013, Vancouver. *Proceedings of the Meeting 46 of the Working Commission W18 – Timber Structures of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Vancouver, 2013.

TÊMPERA. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Têmpera>>. Acesso em: 17 junho 2015a.

THE TIMBER RESEARCH AND DEVELOPMENT ASSOCIATION (TRADA). Adhesively-bonded timber connections. Disponível em: <<http://www.trada.co.uk/images/onlinebooks/B6EB545F-B4D8-4AF2-AB64-2065F11877D1/>>. Acesso em: 16 ABR 2015.

TLUSTOCHOWICZ, G.; SERRANO, E.; STEIGER, R. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures*, n. 44, p. 997–1020, 2011.

UNGUREANU, V. Lecture 3 – Laminated glass and interlayers. Disponível em: <[http://www.ct.upt.ro/suscos/files/2013-2015/1E05/2E5\\_Glass\\_structures\\_L3\\_2014\\_VU.pdf](http://www.ct.upt.ro/suscos/files/2013-2015/1E05/2E5_Glass_structures_L3_2014_VU.pdf)>. Acesso em 05 outubro 2015.

US GLULAM. Products – LVL Beams and Headers. Disponível em: <<http://usglulam.com/products/lvlbeams/>>. Acesso em 16 junho 2015.

VEDACIT. Compound adesivo. Disponível em: <<http://www.vedacit.com.br/neu/produtos.php?33>>. Acesso em 05 outubro 2015.

WAHRHAFTIG, A. et al. Replacement of steel structure for wooden structure in environment exposed to marine aggressiveness. In: World Conference on Timber Engineering, 2014, Quebec City. *Proceedings of the 2014 World Conference on Timber Engineering*. Quebec City: Edited by Alexander Salenikovich, 2014.

WALKER, J.; XIAO, R. Experimental testing of a portal frame connection using glued-in steel rods. In: AICHER, S.; REINHARDT, H. W.; GARRECHT, H. *Materials and Joints in Timber Structures*. London: Springer Netherlands, 2014. p. 555-566.

WHEELER, A.; HUTCHINSON, A. Resin repairs to timber structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 18: p. 1-13, 1998.

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

XU, B. H.; BOUCHAÏR, A.; RACHER, P. Analytical study and finite element modelling of timber connections with glued-in rods in bending. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 337-345, 2012.

## ANEXOS – GRÁFICOS

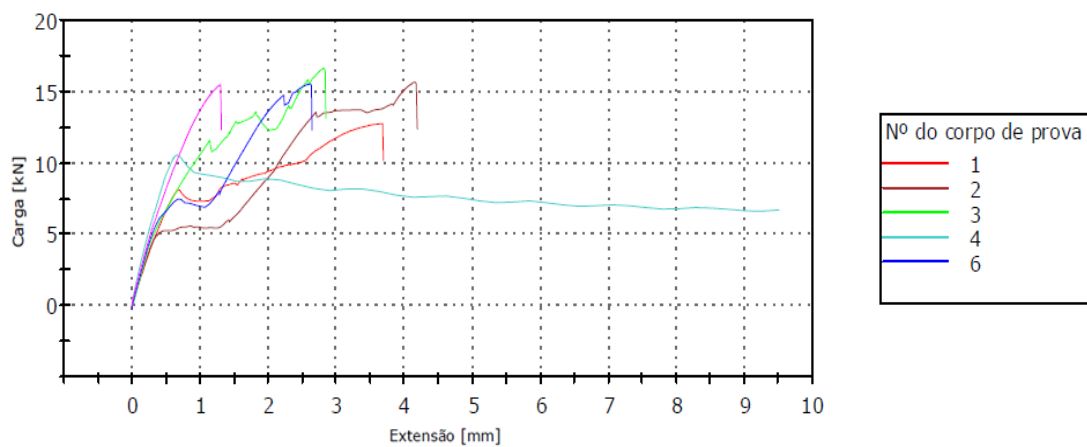


Gráfico A - 1. Carga x extensão da série E1-x. (Fonte: O autor).

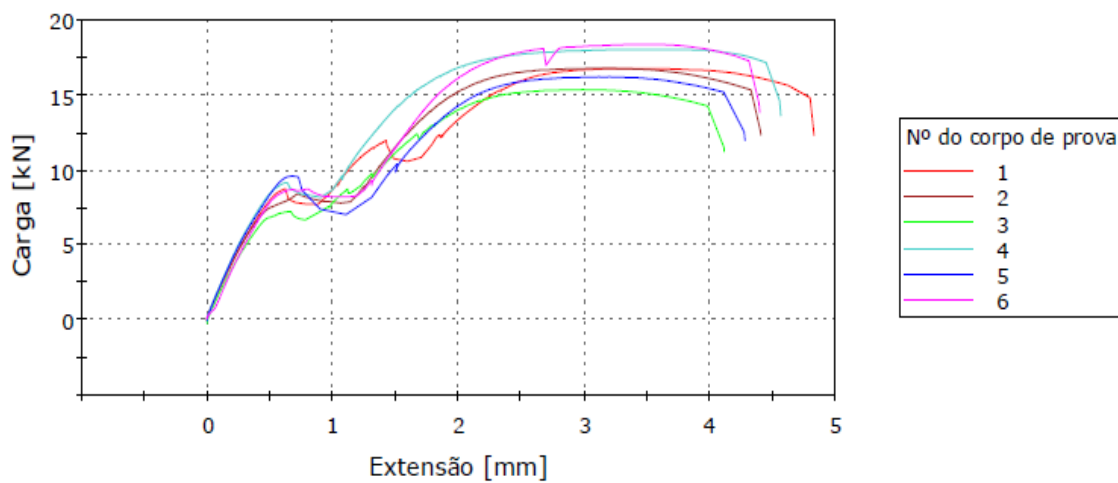


Gráfico A - 2. Carga x extensão da série E2-x. (Fonte: O autor).

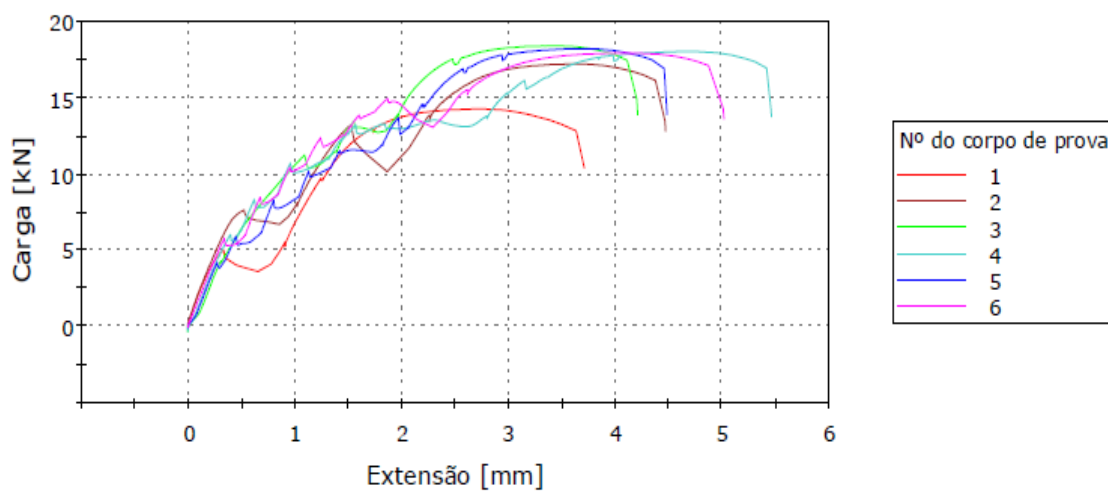


Gráfico A - 3. Carga x extensão da série E3-x. (Fonte: O autor).

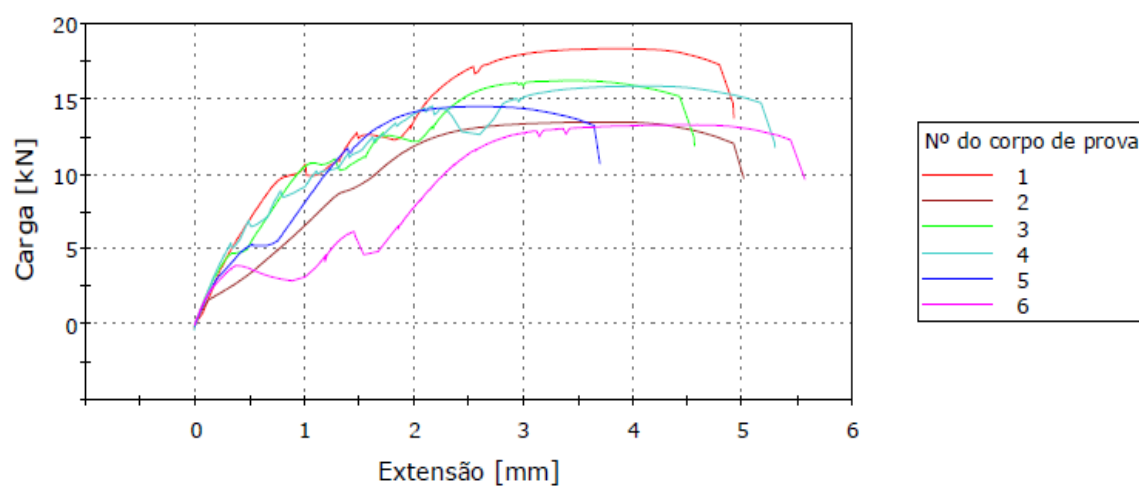


Gráfico A - 4. Carga x extensão da série E4-x. (Fonte: O autor).

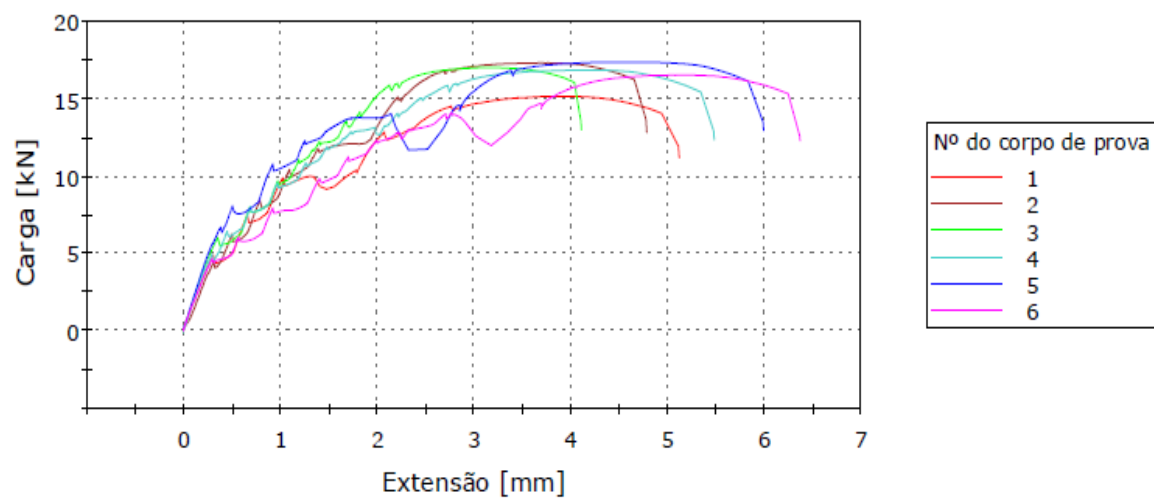


Gráfico A - 5. Carga x extensão da série E5-x. (Fonte: O autor).

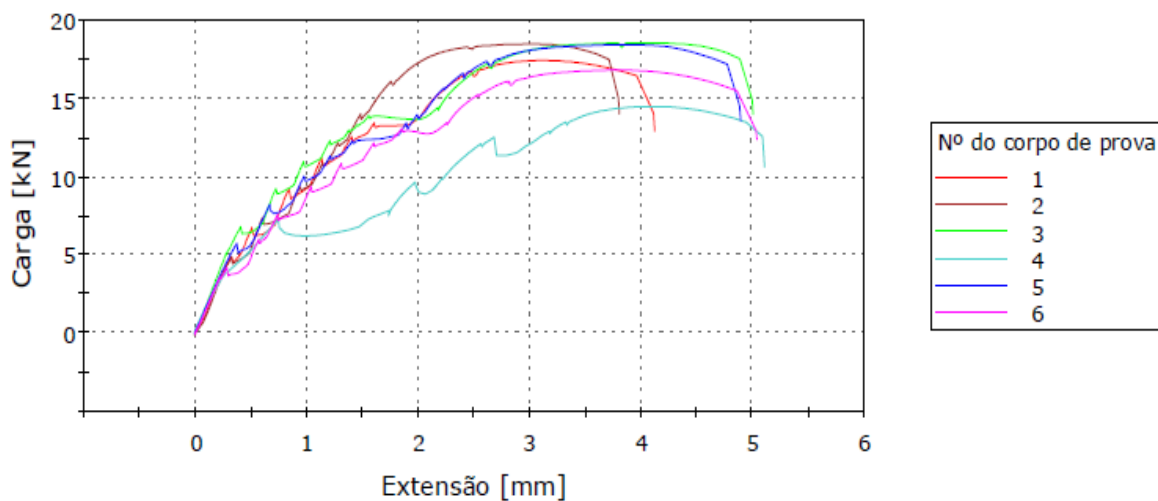


Gráfico A - 6. Carga x extensão da série E6-x. (Fonte: O autor).

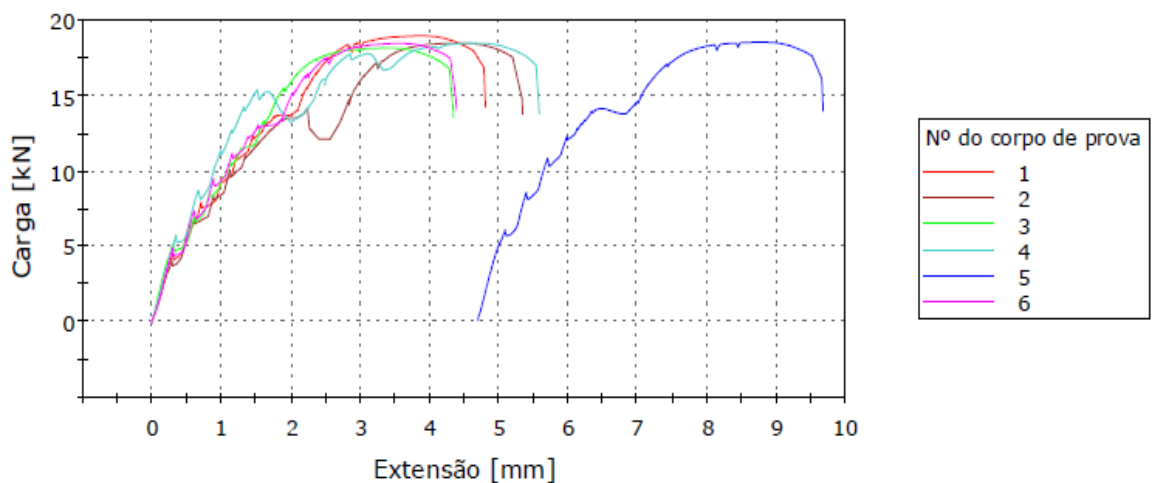


Gráfico A - 7. Carga x extensão da série E7-x. (Fonte: O autor).

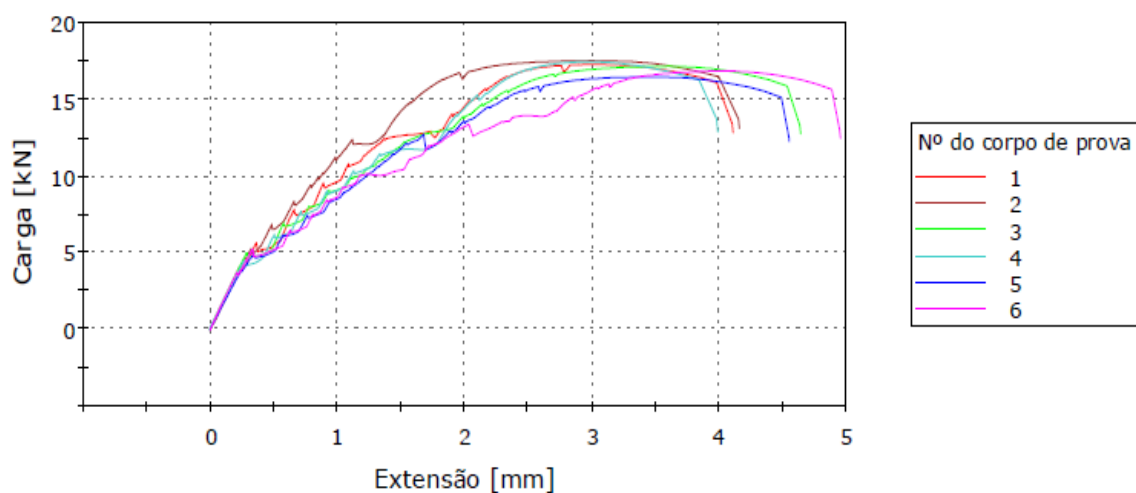


Gráfico A - 8. Carga x extensão da série E8-x. (Fonte: O autor).



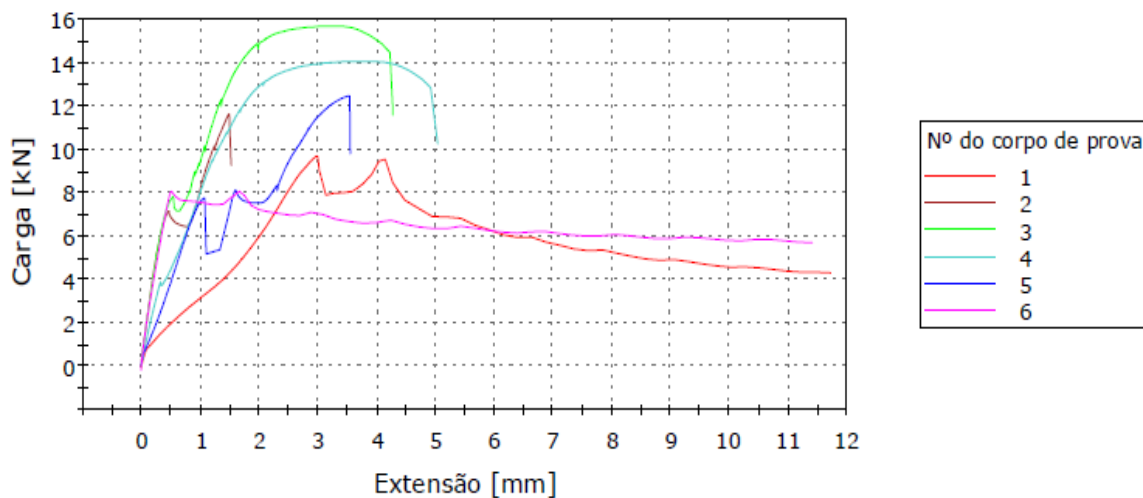


Gráfico A - 9. Carga x extensão da série M1-x. (Fonte: O autor).

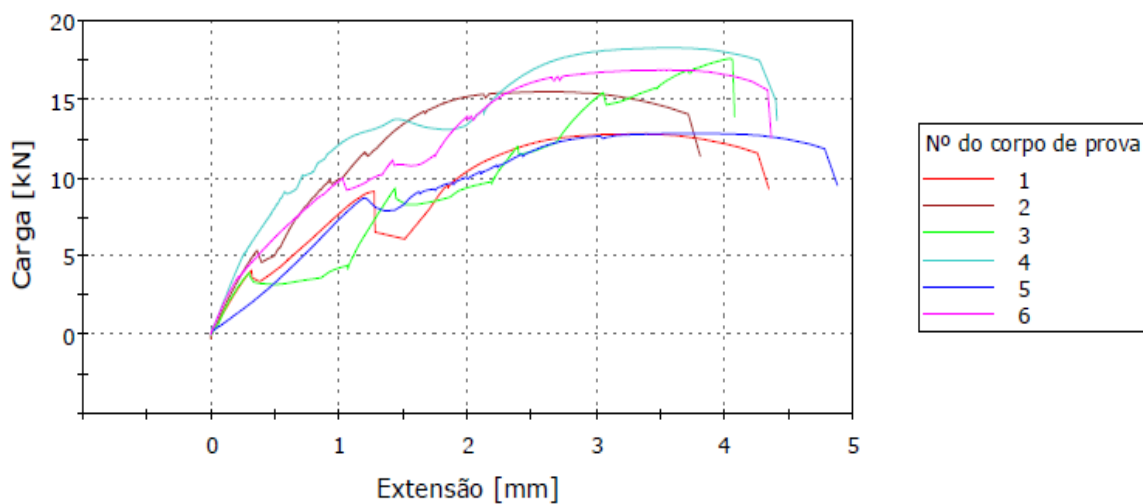


Gráfico A - 10. Carga x extensão da série M2-x. (Fonte: O autor).

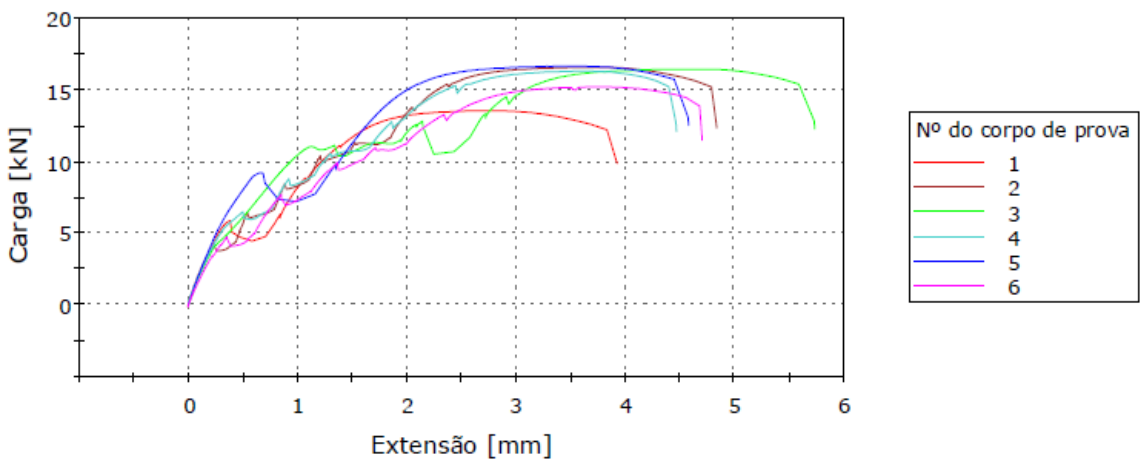


Gráfico A - 11. Carga x extensão da série M3-x. (Fonte: O autor).

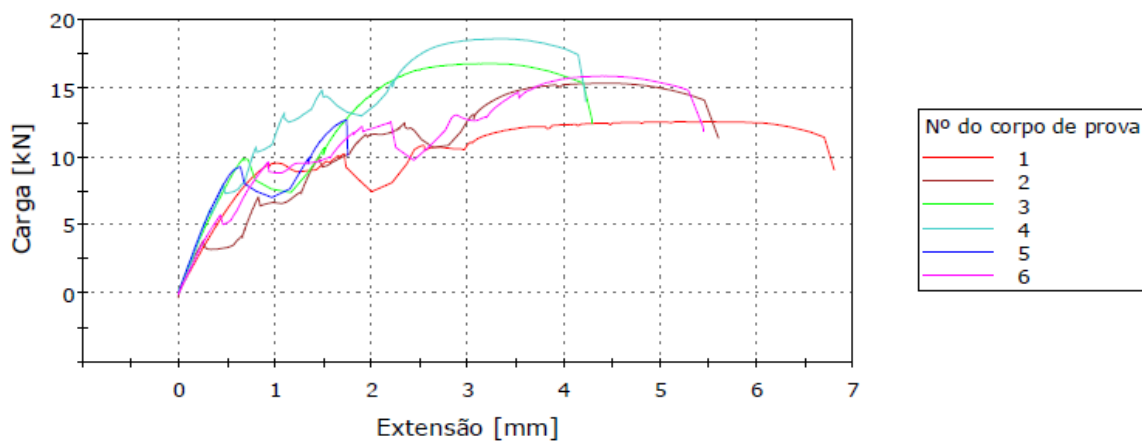


Gráfico A - 12. Carga x extensão da série M4-x. (Fonte: O autor).

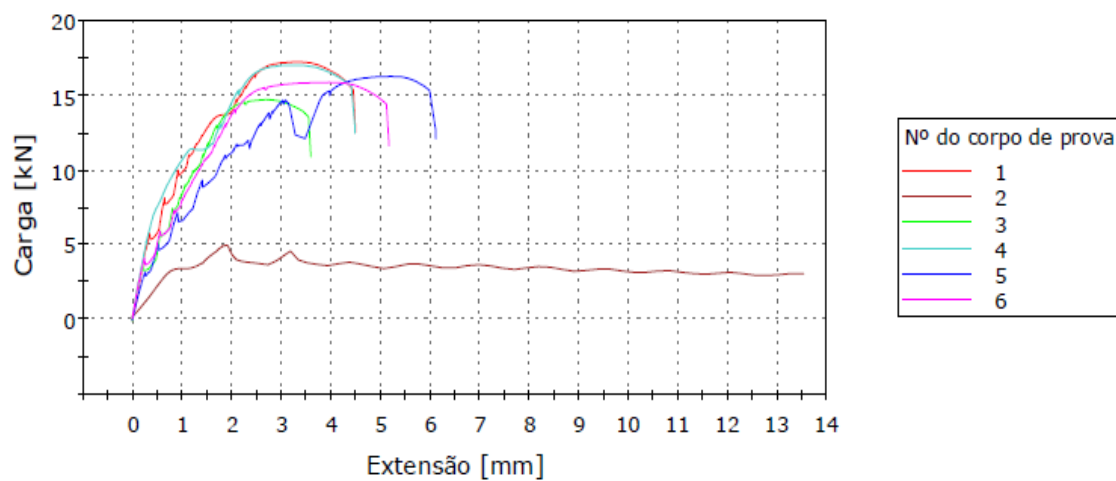


Gráfico A - 13. Carga x extensão da série M5-x. (Fonte: O autor).

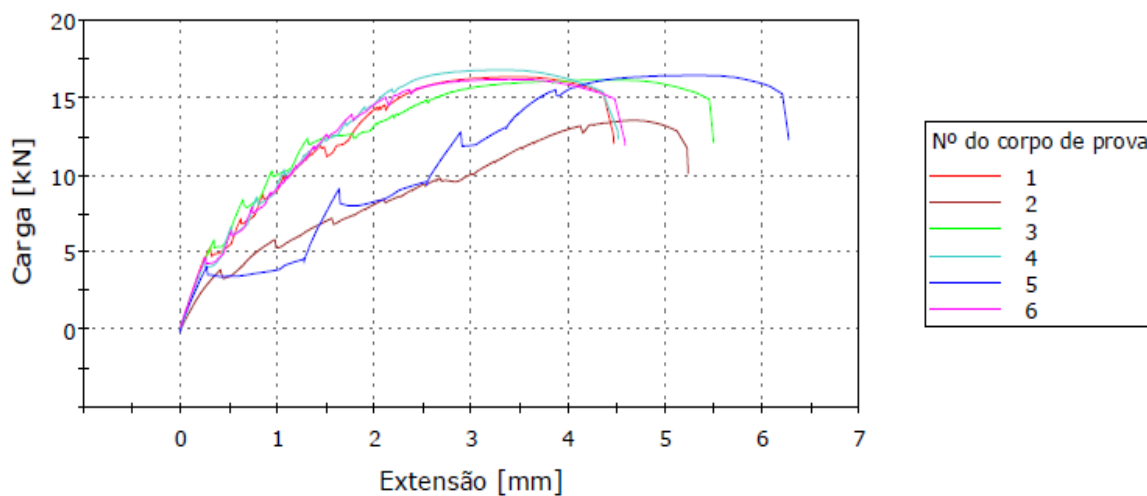


Gráfico A - 14. Carga x extensão da série M6-x. (Fonte: O autor).

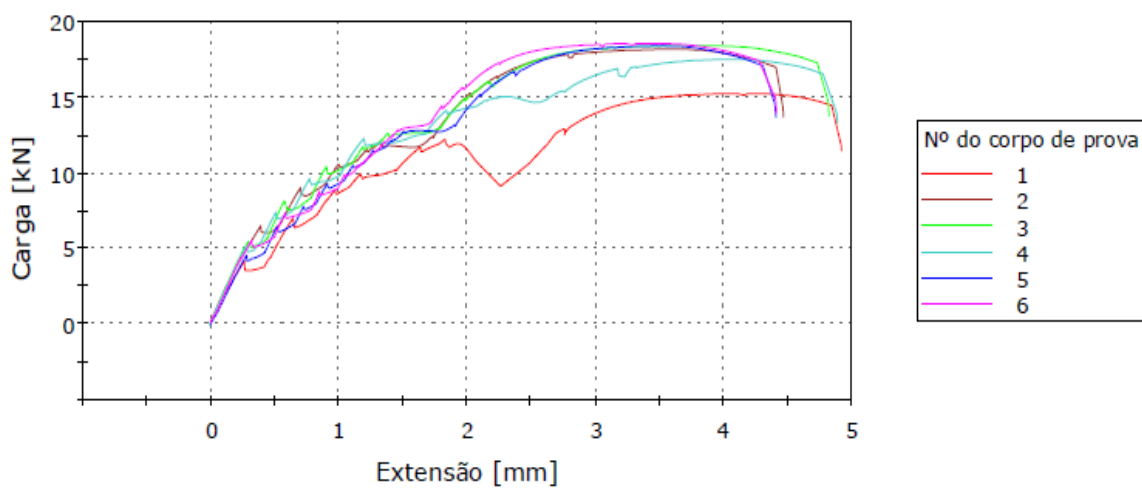


Gráfico A - 15. Carga x extensão da série M7-x. (Fonte: O autor).

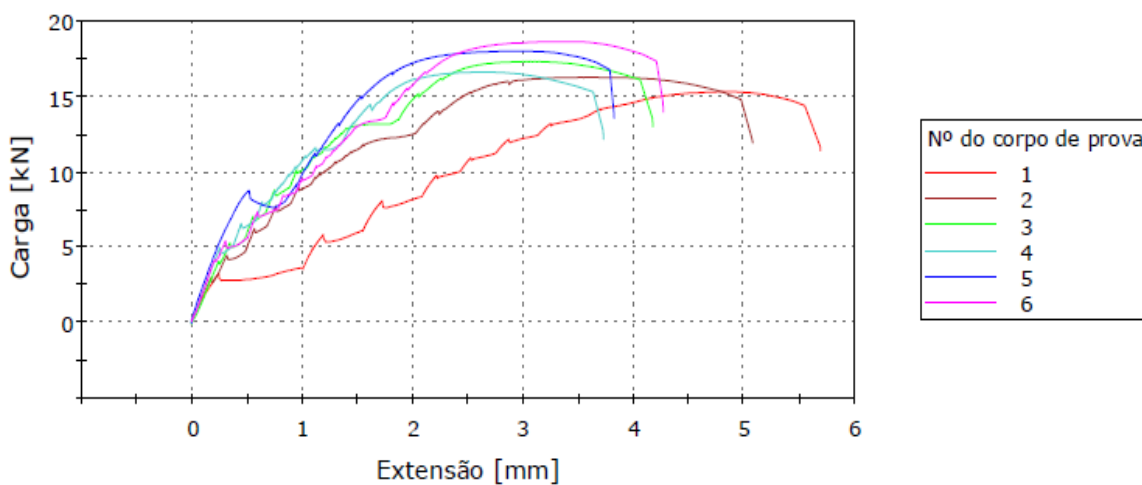


Gráfico A - 16. Carga x extensão da série M8-x. (Fonte: O autor).

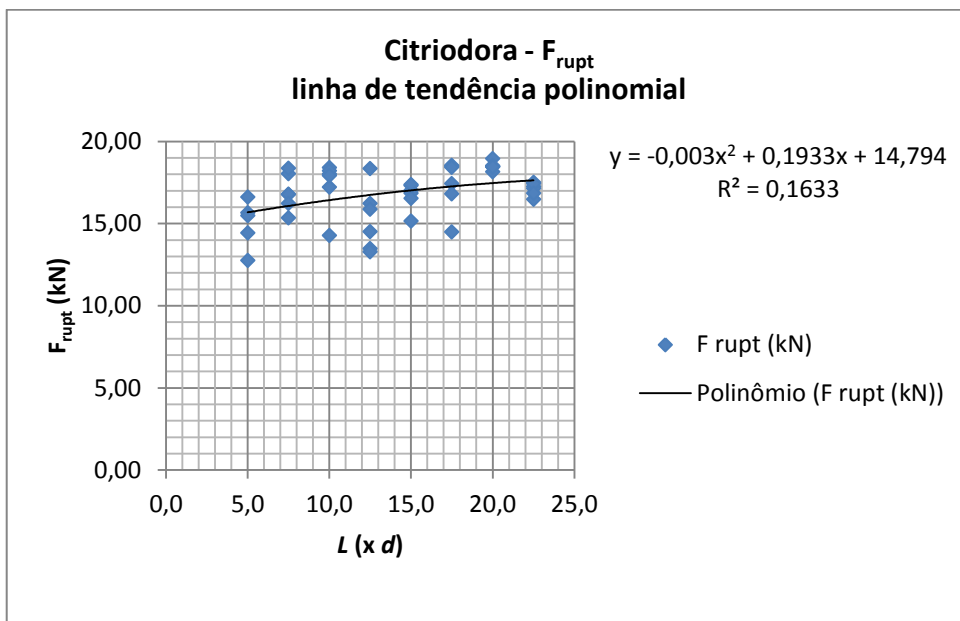


Gráfico A - 17. L. de tendência polinomial – Citriodora (Fonte: O autor).

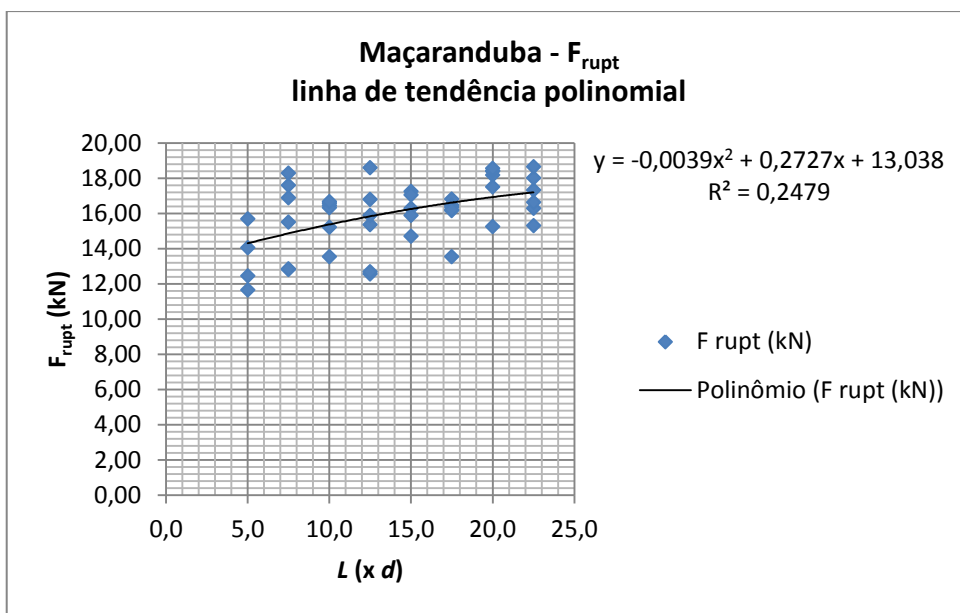


Gráfico A - 18. L. de tendência polinomial – Maçaranduba (Fonte: O autor).

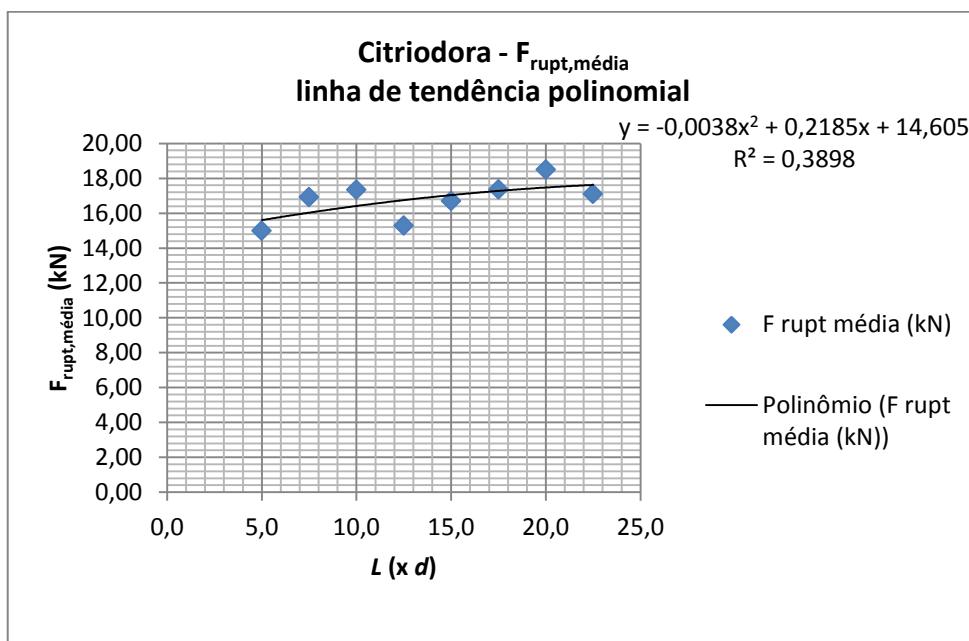


Gráfico A - 19. L. de tendência polinomial – Citriodora (Fonte: O autor).

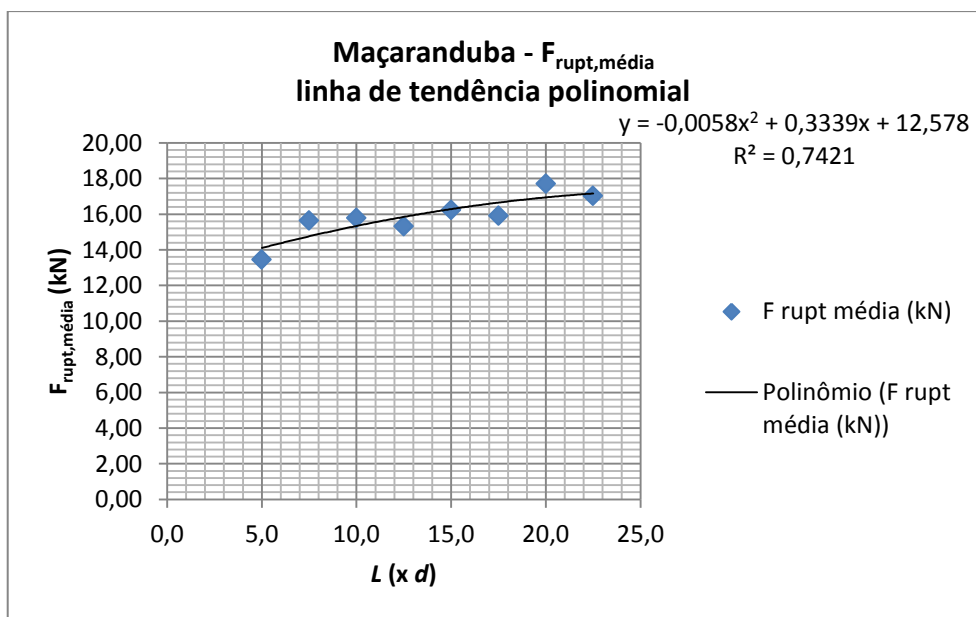


Gráfico A - 20. L. de tendência polinomial – Maçaranduba (Fonte: O autor).

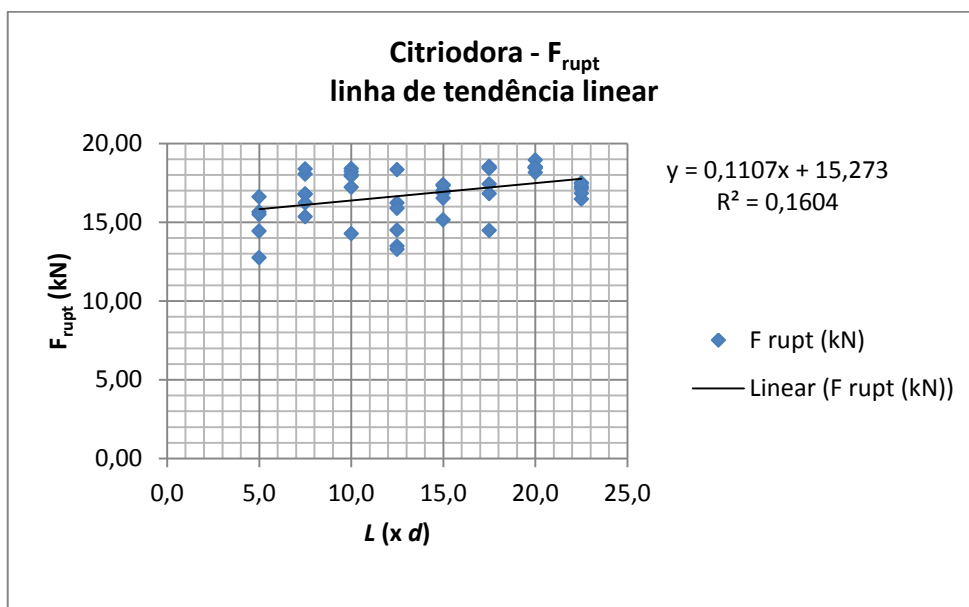


Gráfico A - 21. Linha de tendência linear – Citriodora (Fonte: O autor).

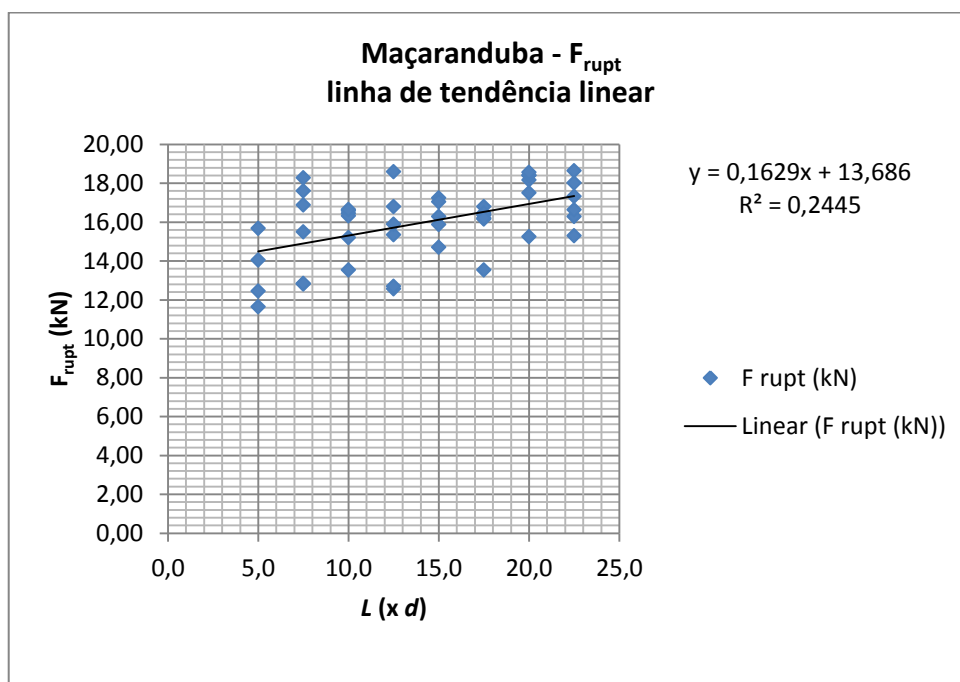


Gráfico A - 22. Linha de tendência linear – Maçaranduba (Fonte: O autor).

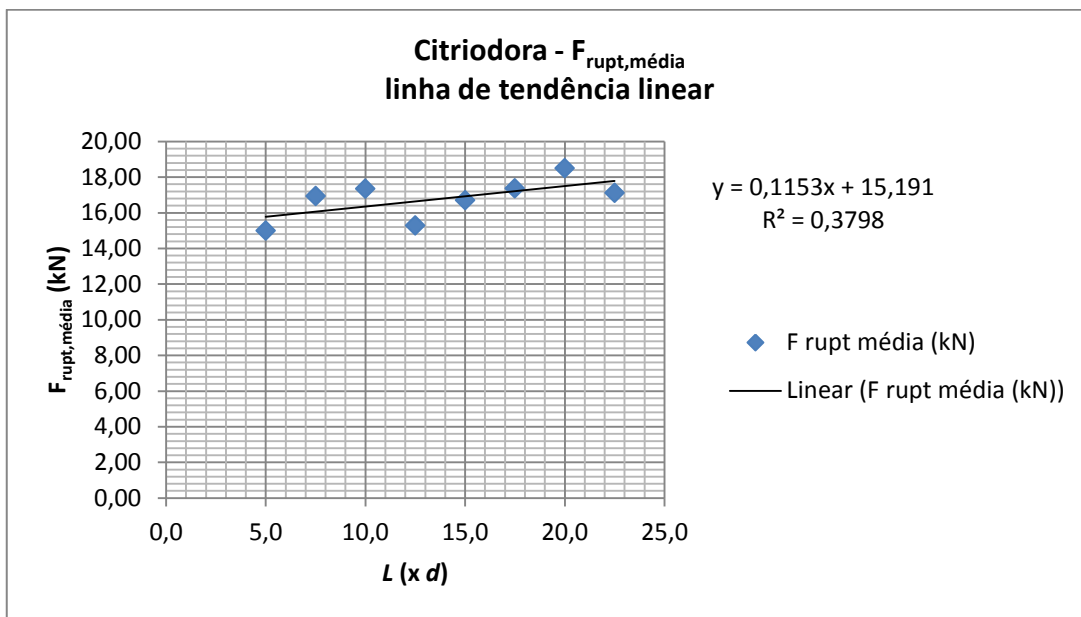


Gráfico A - 23. Linha de tendência linear – Citriodora (Fonte: O autor).

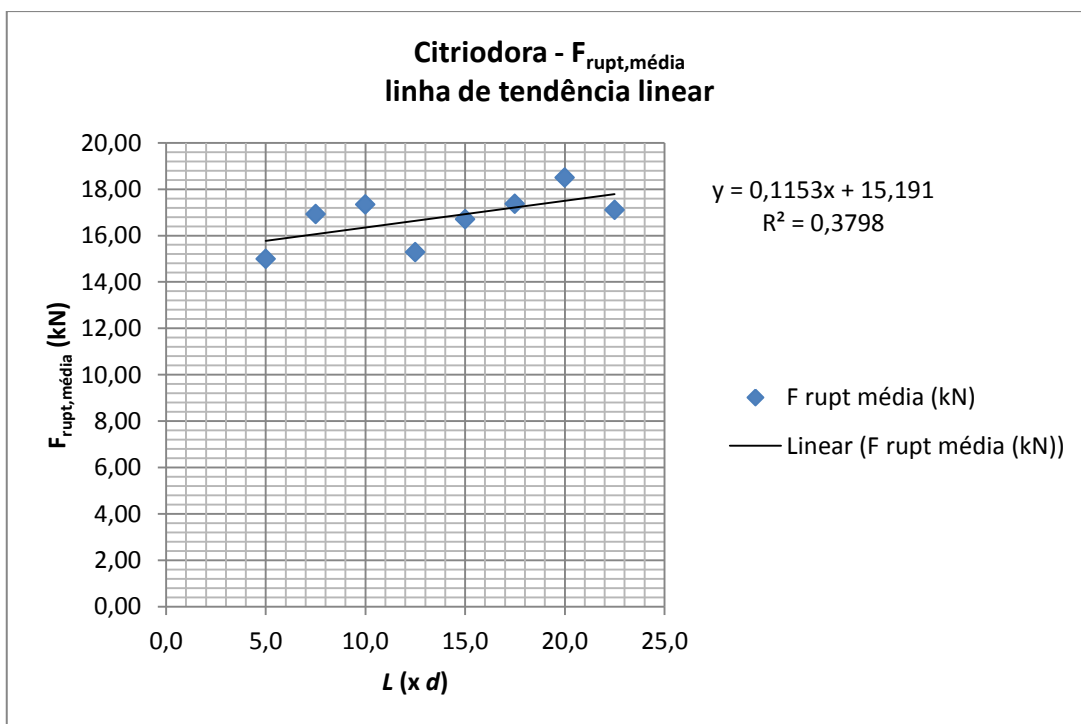


Gráfico A - 24. Linha de tendência linear – Maçaranduba (Fonte: O autor).

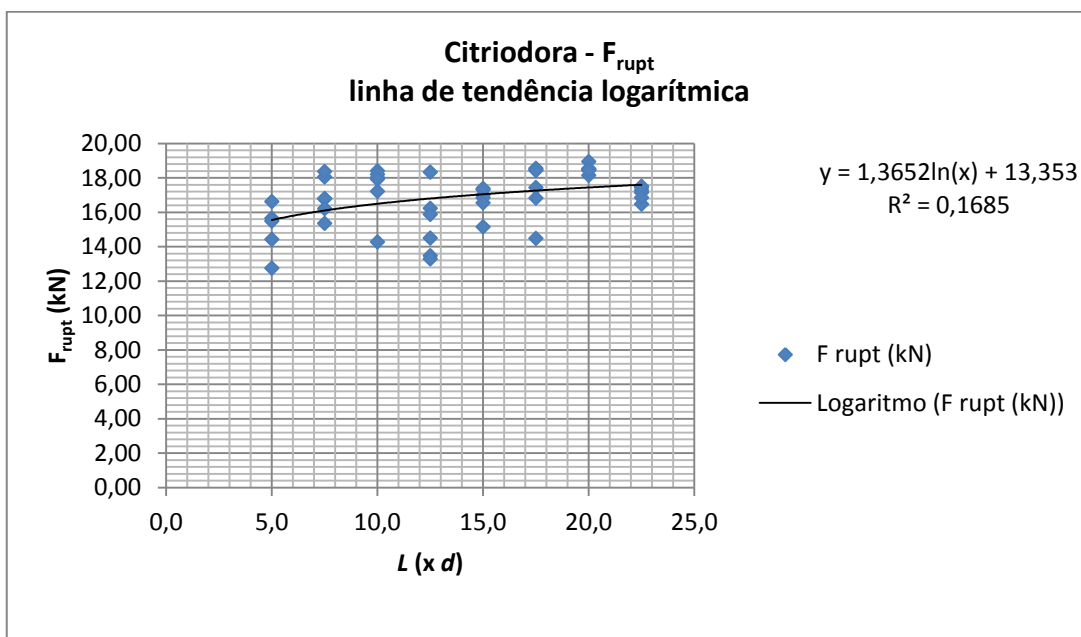


Gráfico A - 25. L. de tendência logarítmica – Citriodora (Fonte: O autor).

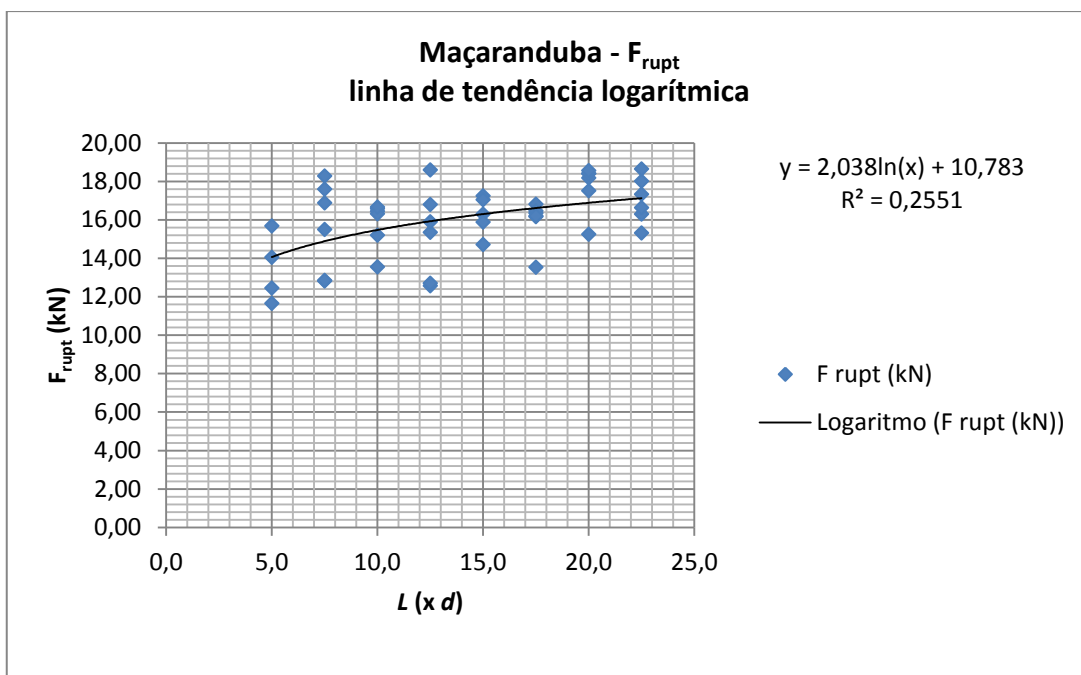


Gráfico A - 26. L. de tendência logarítmica – Maçaranduba (Fonte: O autor).



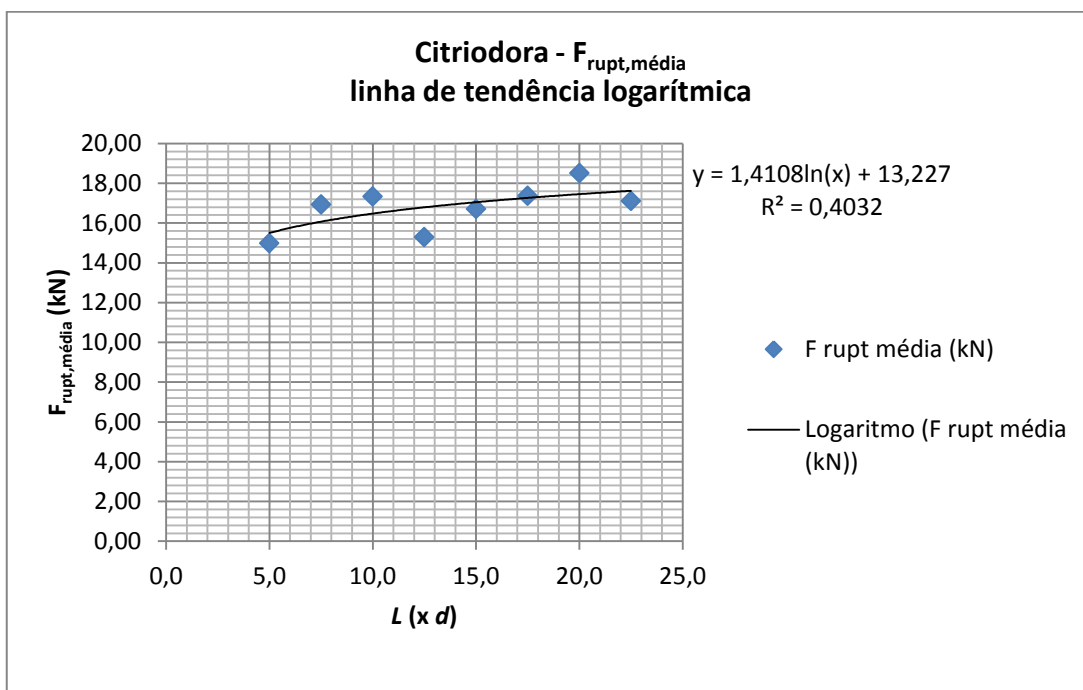


Gráfico A - 27. L. de tendência logarítmica – Citriodora (Fonte: O autor).

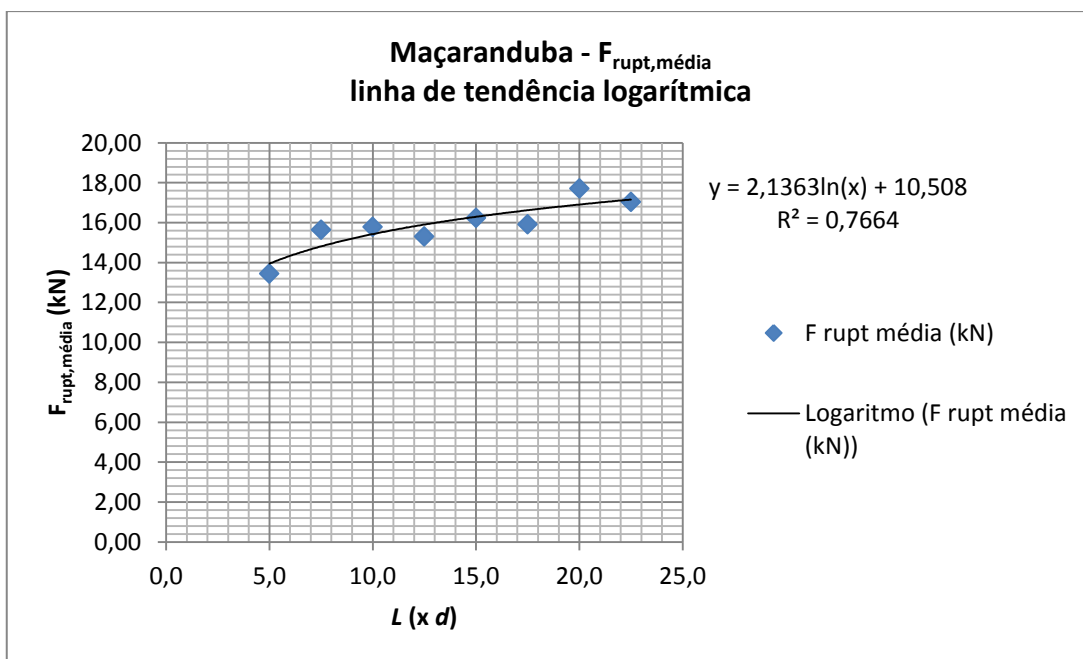


Gráfico A - 28 L. de tendência logarítmica – Maçaranduba (Fonte: O autor).

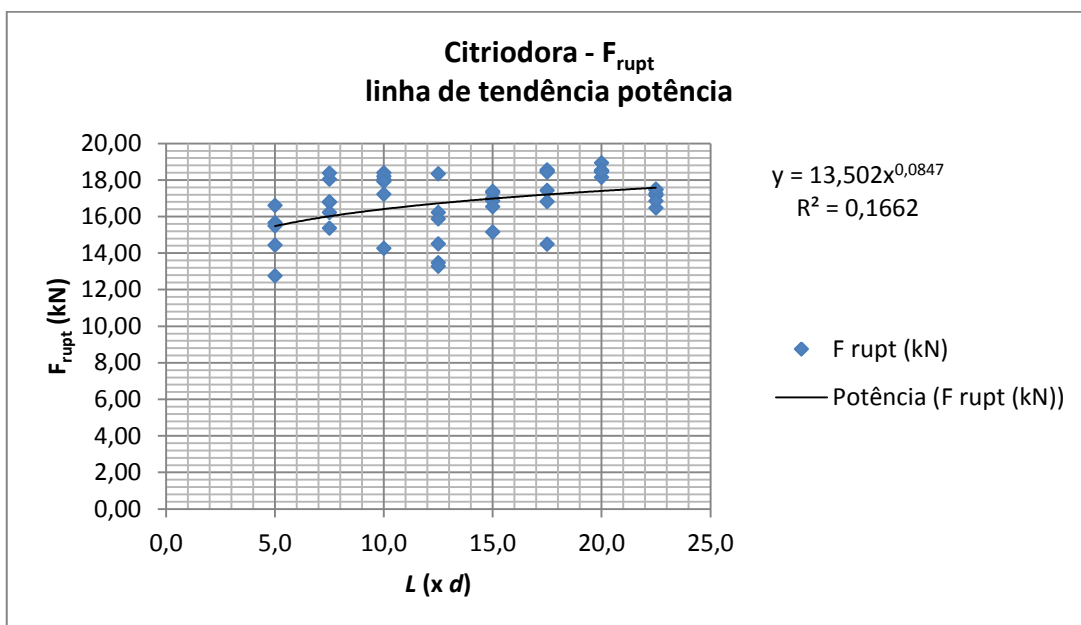


Gráfico A - 29. L. de tendência potência – Citriodora (Fonte: O autor).

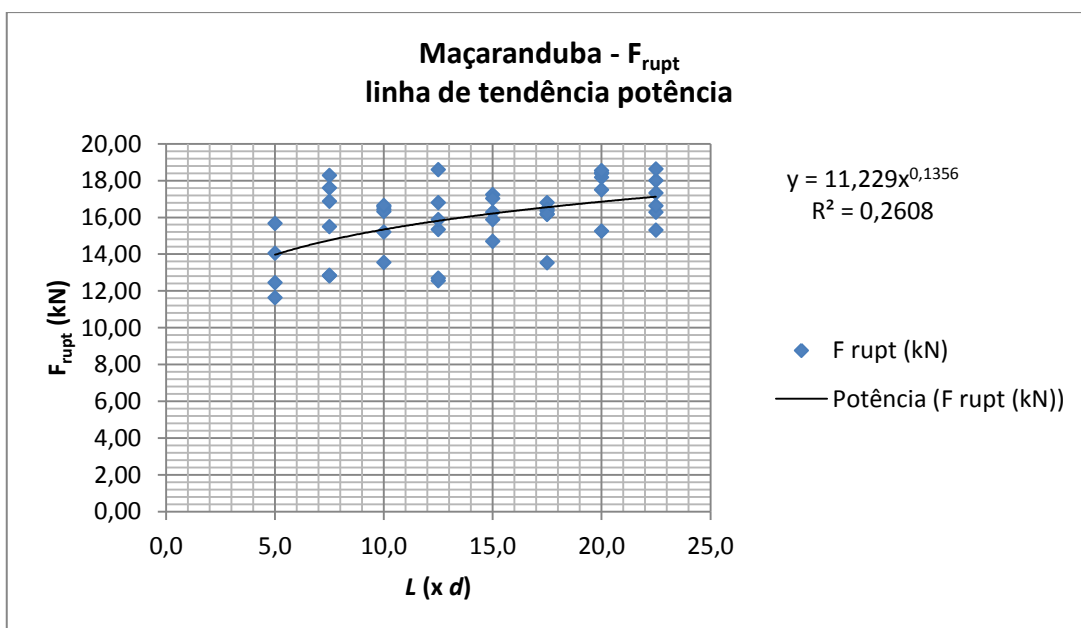


Gráfico A - 30. L. de tendência potência – Maçaranduba (Fonte: O autor).

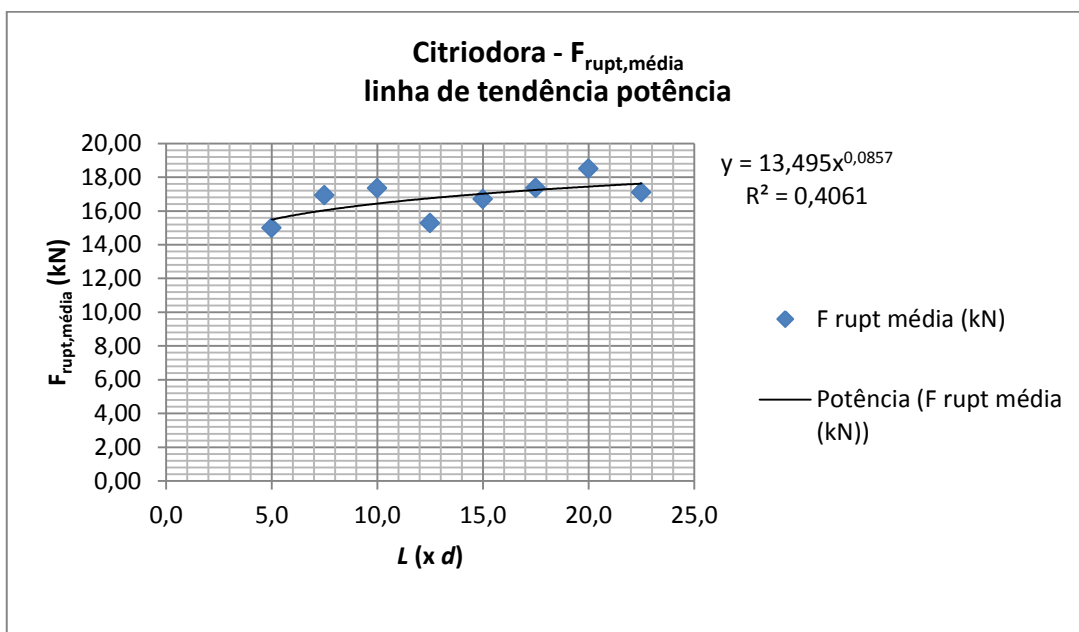


Gráfico A - 31. Linha de tendência potência – Citriodora (Fonte: O autor).

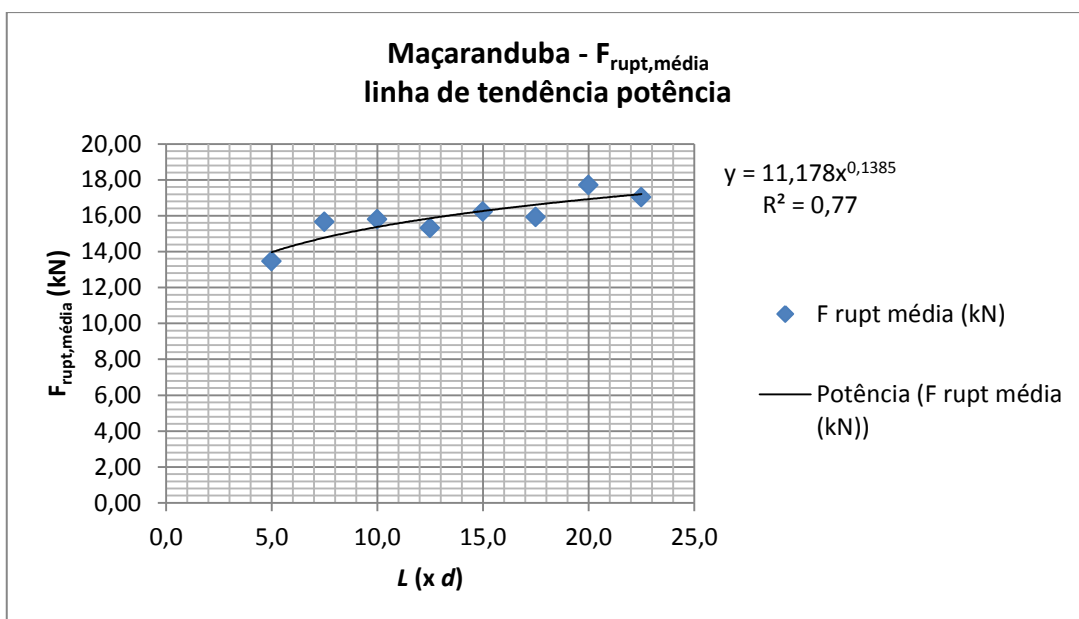


Gráfico A - 32. L. de tendência potência – Maçaranduba (Fonte: O autor).

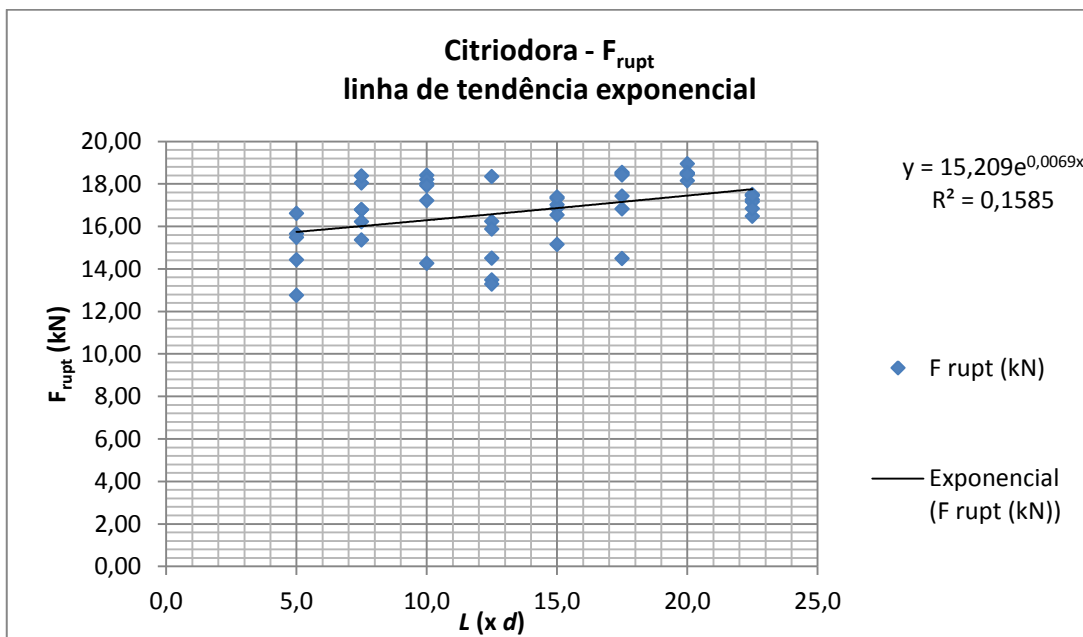


Gráfico A - 33. L. de tendência exponencial – Citriodora (Fonte: O autor).

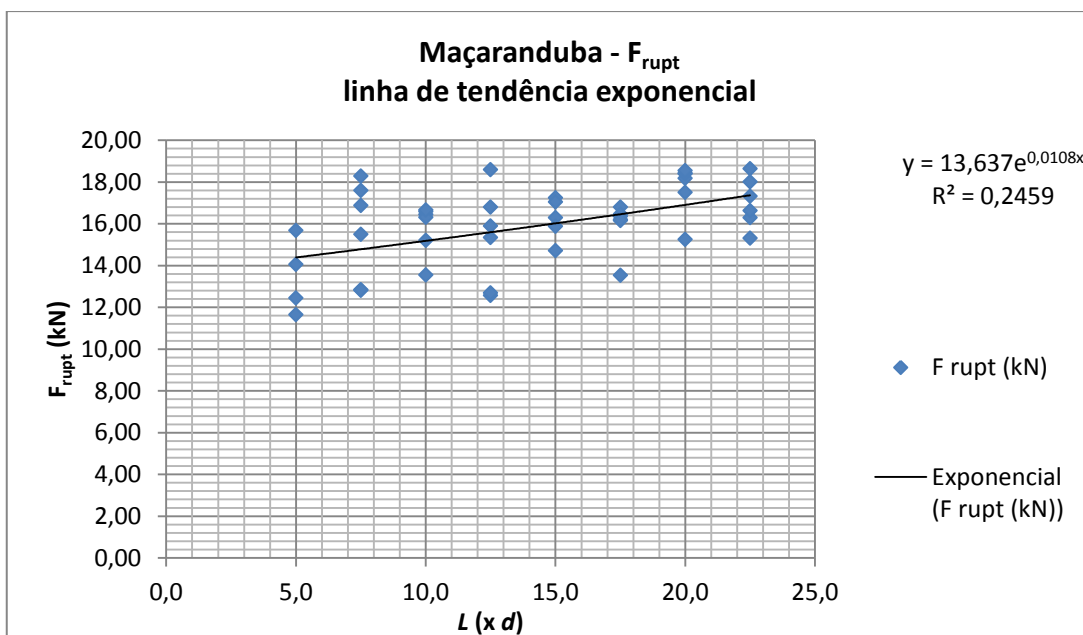


Gráfico A - 34. L. tendência exponencial – Maçaranduba (Fonte: O autor).

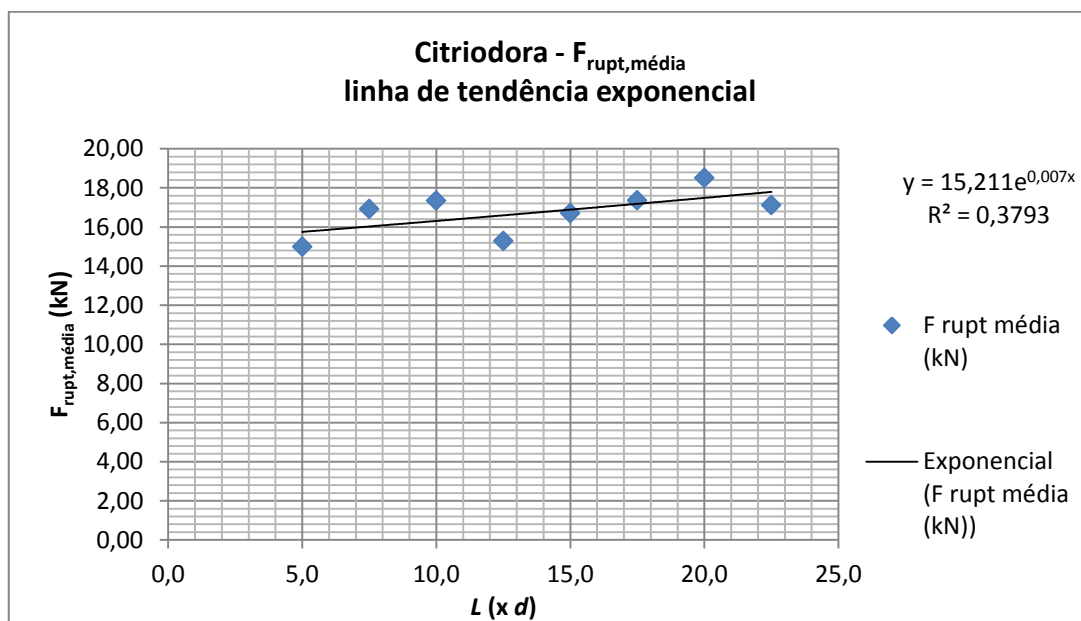


Gráfico A - 35. L. de tendência exponencial – Citriodora (Fonte: O autor).

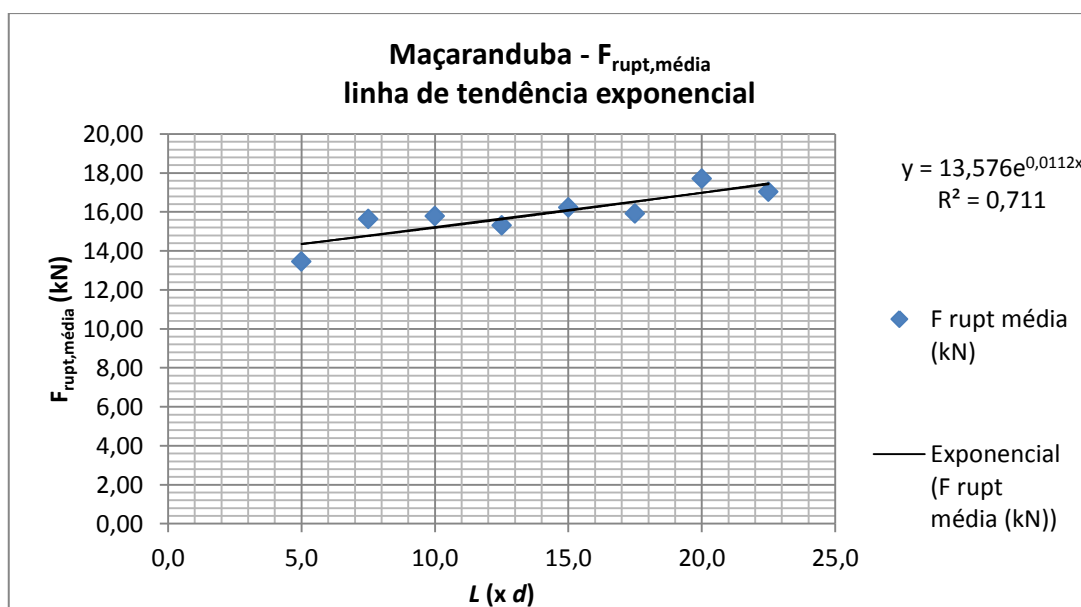


Gráfico A - 36. L. tendência exponencial – Maçaranduba (Fonte: O autor).

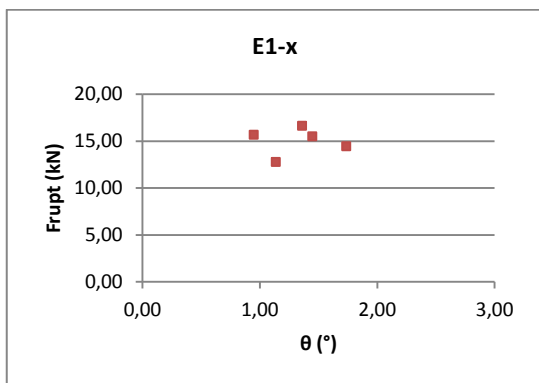


Gráfico A - 37.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E1-x  
(Fonte: O autor).

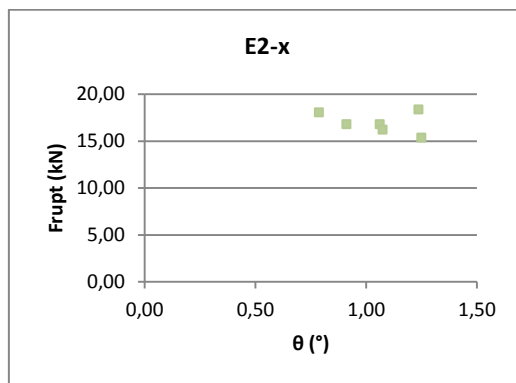


Gráfico A - 38.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E2-x  
(Fonte: O autor).

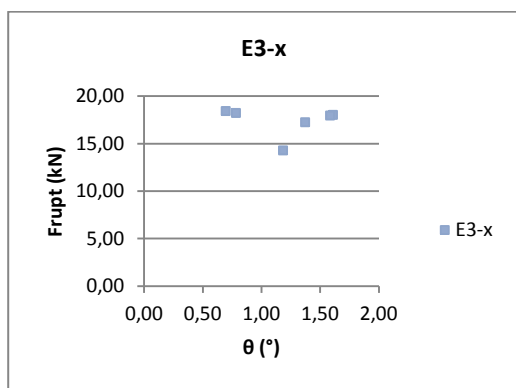


Gráfico A - 39.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E3-x  
(Fonte: O autor).

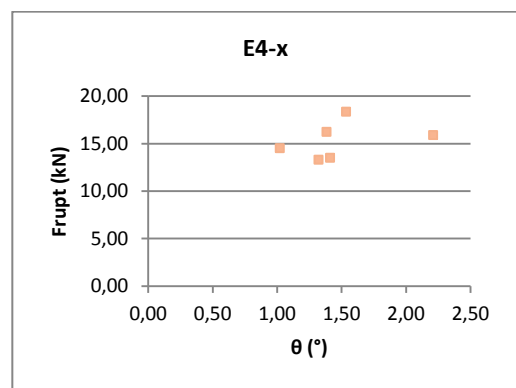


Gráfico A - 40.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E4-x  
(Fonte: O autor).

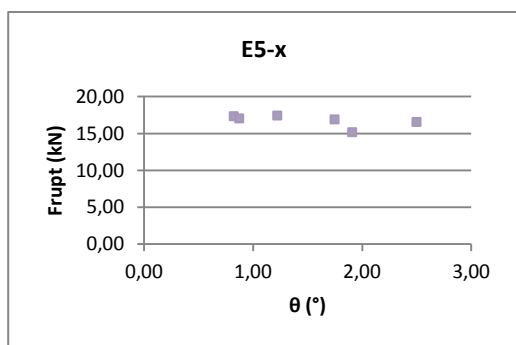


Gráfico A - 41.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E5-x  
(Fonte: O autor).

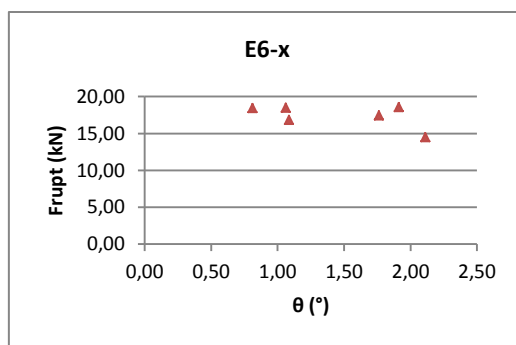


Gráfico A - 42.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E6-x  
(Fonte: O autor).

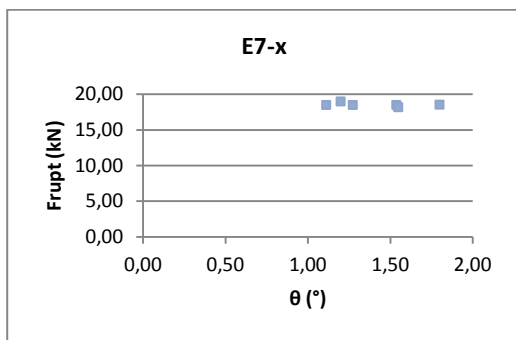


Gráfico A - 43.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E7-x  
(Fonte: O autor).

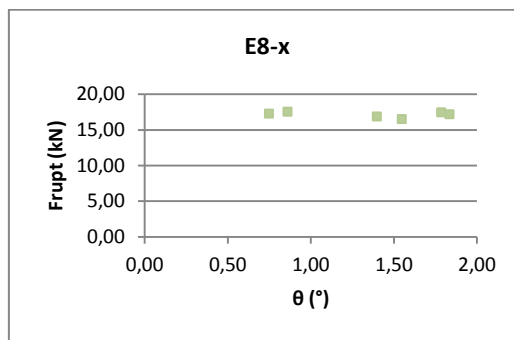


Gráfico A - 44.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série E8-x  
(Fonte: O autor).

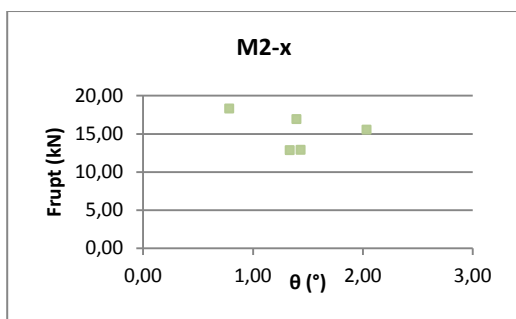


Gráfico A - 45.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M2-x  
(Fonte: O autor).

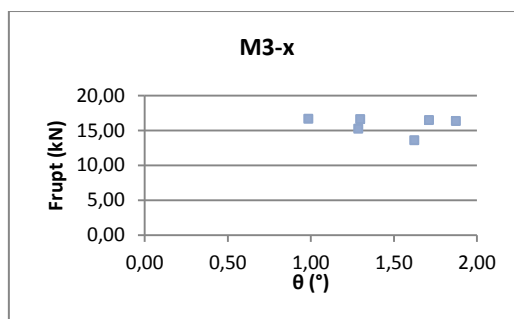


Gráfico A - 46.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M3-x  
(Fonte: O autor).

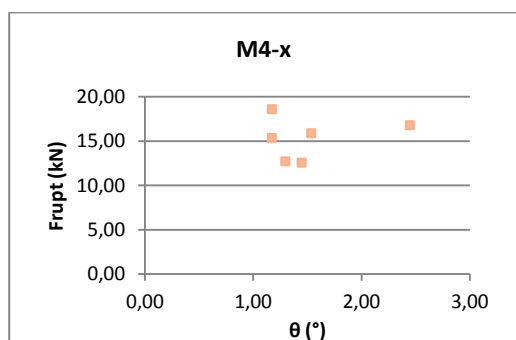


Gráfico A - 47.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M4-x  
(Fonte: O autor).

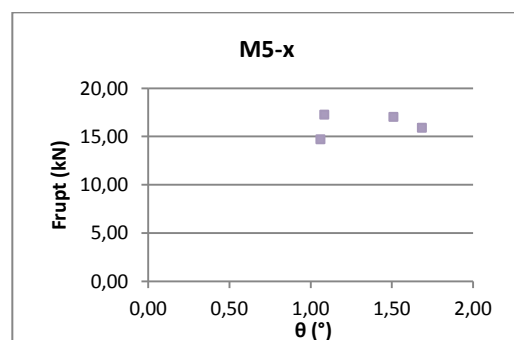


Gráfico A - 48.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M5-x  
(Fonte: O autor).

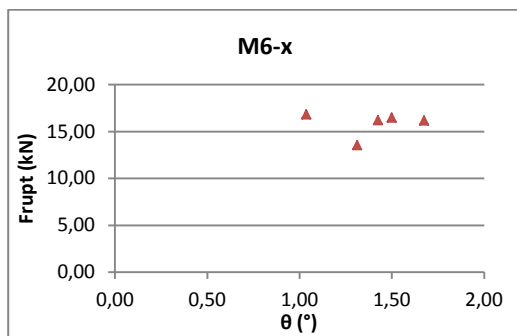


Gráfico A - 49.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M6-x  
(Fonte: O autor).

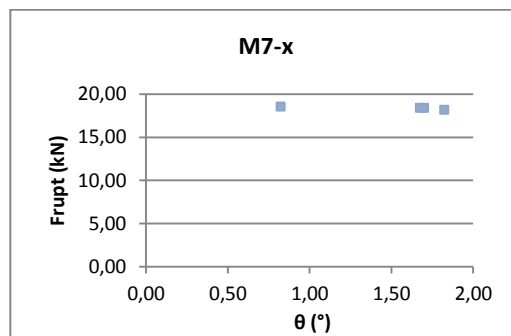


Gráfico A - 50.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M7-x  
(Fonte: O autor).

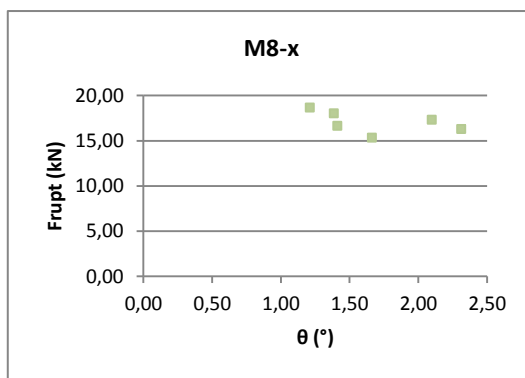


Gráfico A - 51.  $F_{rupt}$  x  $\theta$  da série M8-x (Fonte: O autor).



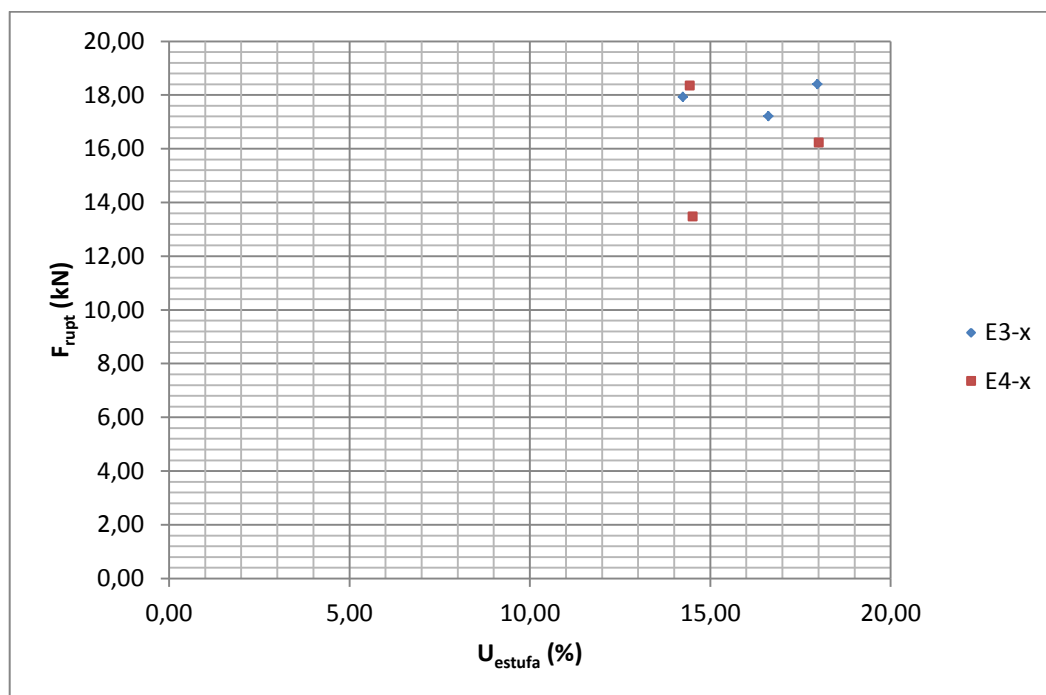


Gráfico A - 52.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de E3-x e E4-x (Fonte: O autor).

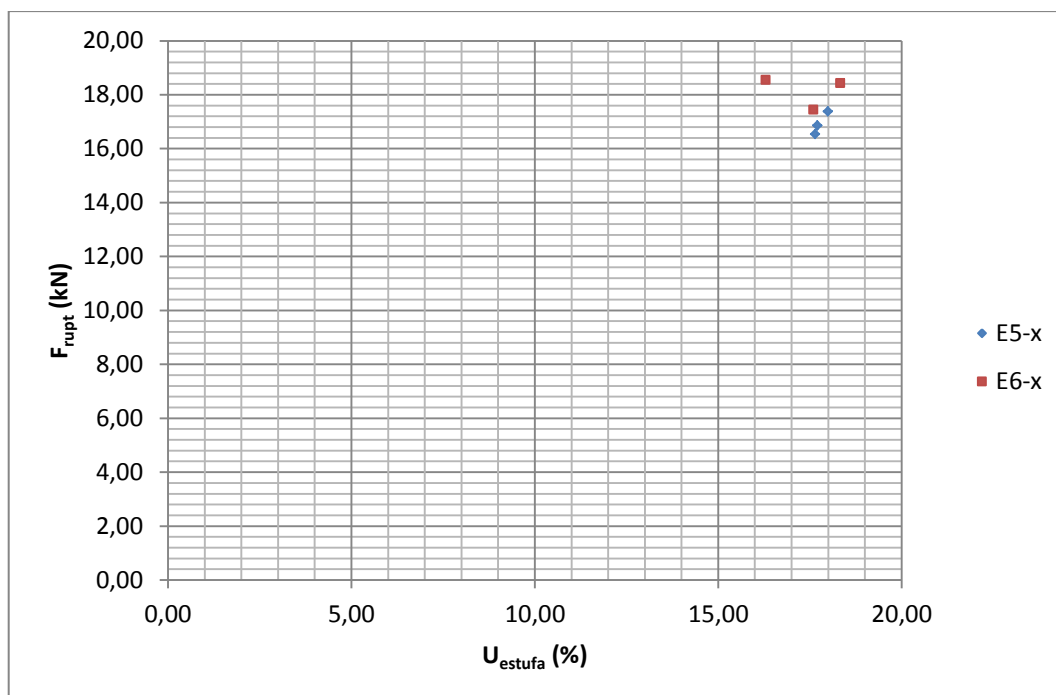


Gráfico A - 53.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de E5-x e E6-x (Fonte: O autor).

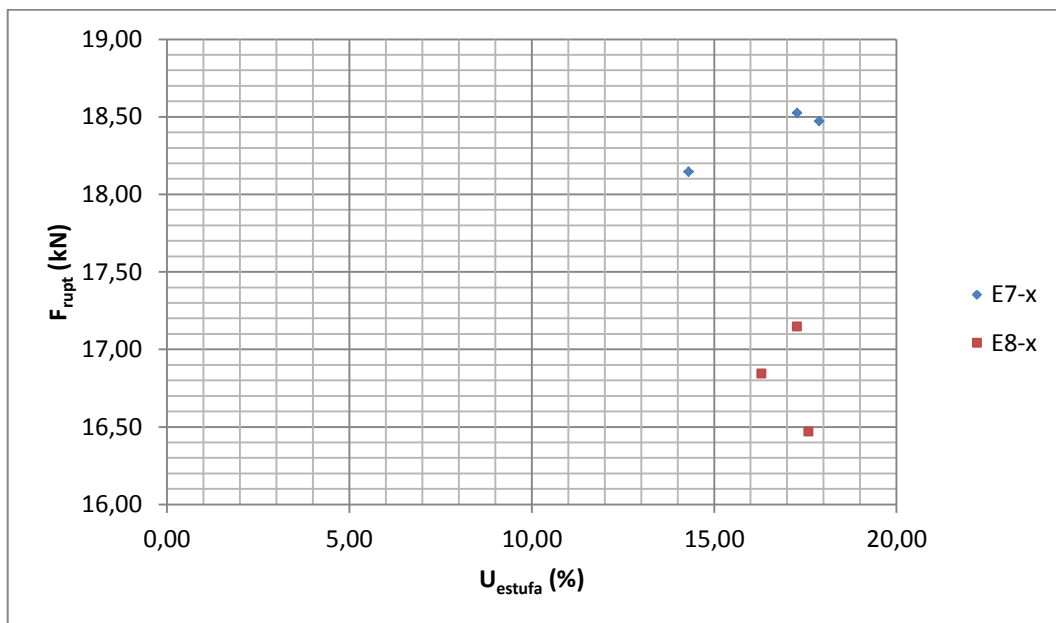


Gráfico A - 54.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de E7-x e E8-x (Fonte: O autor).

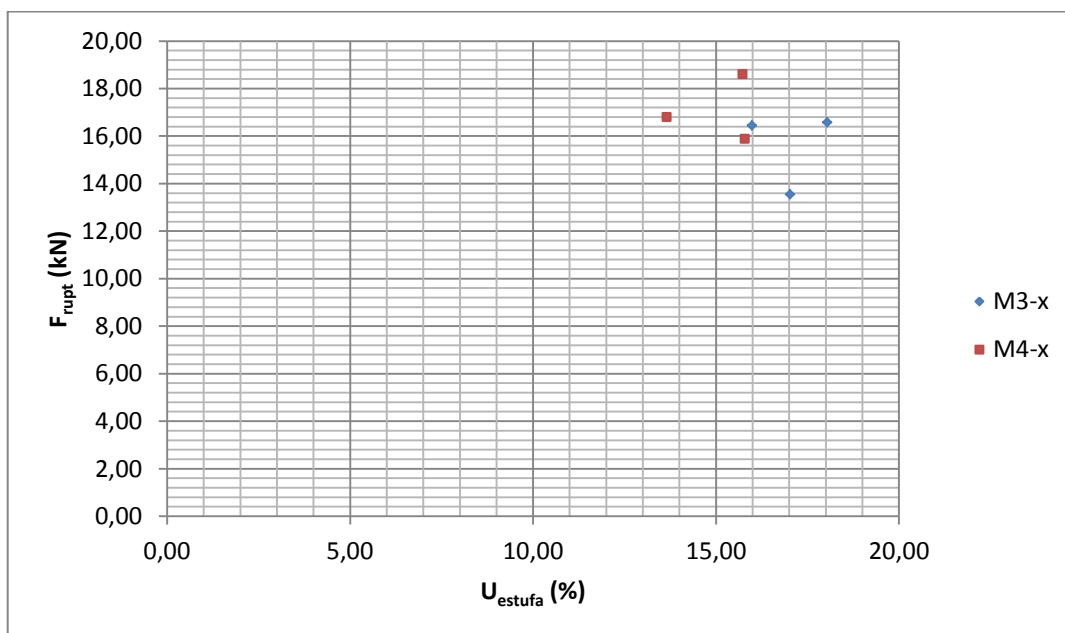


Gráfico A - 55.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de M3-x e M4-x (Fonte: O autor).

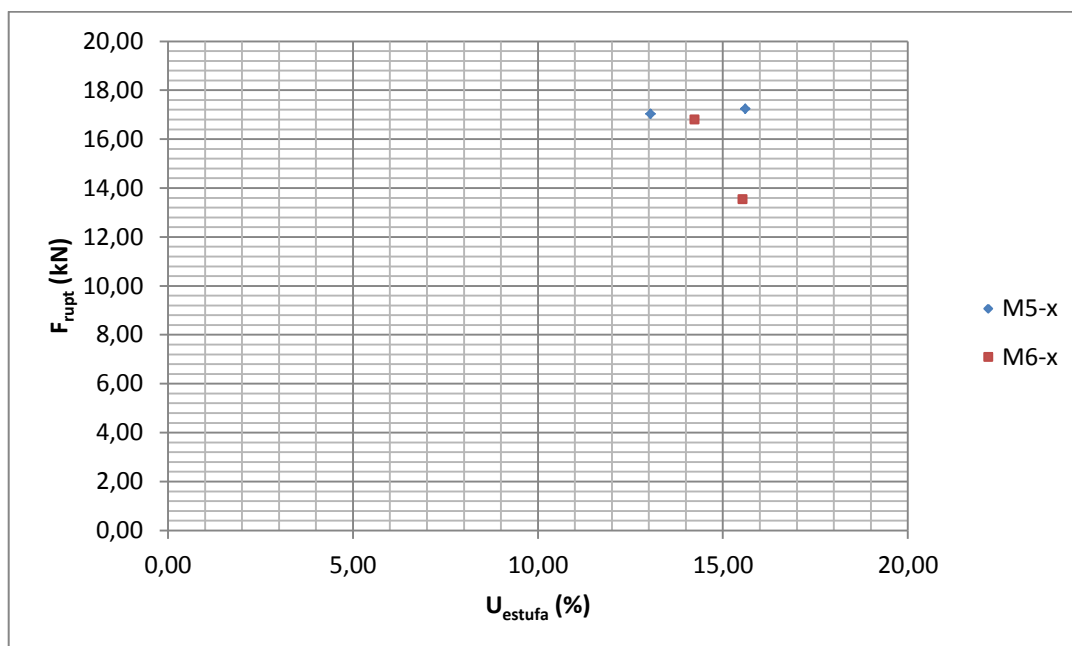


Gráfico A - 56.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de M5-x e M6-x (Fonte: O autor).

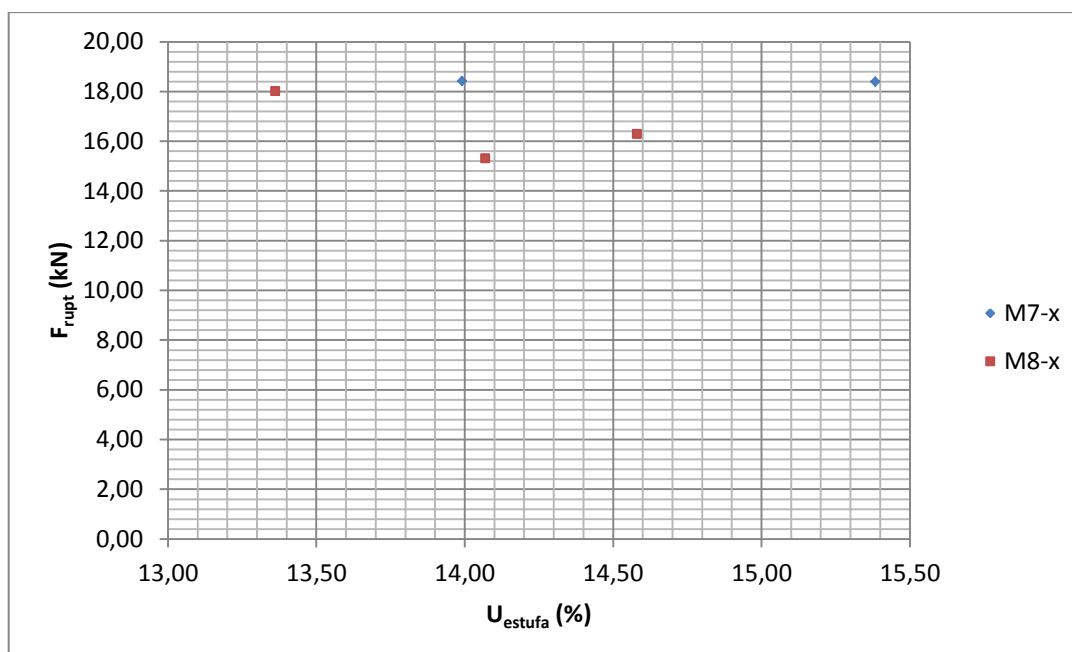


Gráfico A - 57.  $F_{rupt}$  x  $U_{estufa}$  de M7-x e M8-x (Fonte: O autor).

## ANEXOS – QUADROS

Quadro A - 1. Nós dos CPs.

CP	Nós		Diâmetro máximo (mm)
	Local		
	Posição longitudinal	Face(s)	
E1-1			
E1-2			
E1-3			
E1-4			
E1-5			
E1-6			
E2-1	Extremidade A	Todas	9,63
E2-2			
E2-3			
E2-4			
E2-5			
E2-6			
E3-1			
E3-2	Extremidade A	1	2,43
E3-3			
E3-4	Extremidade B	1	28,83
E3-5			
E3-6		1	4,29
E4-1	Entre barras	4	3,72
	Entre barras	4	5,78
E4-2	Extremidade B	4	9,07
E4-3			
E4-4			
E4-5			
E4-6	Entre barras	1	7,1
E5-1			
E5-2	Extremidade B	1	7,07
	Extremidade B	2	13,91
	Extremidade B	4	7,05
	Entre barras	2	10,78
	Entre barras	4	9,72
	Extremidade A	3	7,05
E5-3			
E5-4	Extremidade B	2	17,63
	Extremidade B	4	6,19
	Extremidade A	4	7,45
E5-5	Entre barras	1	21,88
	Entre barras	4	4,86
E5-6	Extremidade B	1	20
	Extremidade B	2	33,75
	Entre barras	1	21,89
	Entre barras	4	10,11

Fonte: O autor

Quadro A - 2. Nós dos CPs (continuação).

CP	Nós		Diâmetro máximo (mm)
	Local		
	Posição longitudinal	Face(s)	
E6-1	Extremidade B	1	25,95
	Extremidade A	2	24,5
	Extremidade A	3	25,44
E6-2		2	3,65
E6-3			
E6-4	Extremidade A	1	16,05
	Extremidade B	2	6,92
	Extremidade B	2	16,46
	Extremidade B	3	17,3
E6-5	Extremidade B	2	5,53
	Extremidade B	4	4,07
	Entre barras	2	9,13
	Entre barras	3	5,38
	Extremidade A	2	8,58
	Extremidade A	3	8,08
	Extremidade A	4	5,02
E6-6	Extremidade B	2	7,4
	Extremidade B	Todas	3,36
	Entre barras	1	6,15
	Entre barras	4	6,07
	Extremidade A	2	8,13
	Extremidade A	1	4,92
E7-1	Extremidade B	4	12,13
E7-2	Extremidade B	1	10,62
	Extremidade B	2	9,66
	Extremidade A	1	12,28
E7-3	Extremidade B	1	16,9
E7-4			
E7-5	Extremidade A	4	3,97
E7-6	Extremidade B	1	8,2
	Extremidade B	3	14,2

Fonte: O autor

Quadro A - 3. Nós dos CPs (continuação).

CP	Nós		
	Local		Diâmetro máximo (mm)
	Posição longitudinal	Face(s)	
E8-1	Entre barras	2	20,57
E8-2	Extremidade B	1	11,48
	Extremidade A	1	11,48
E8-3	Extremidade B	1	17,09
	Extremidade B	3	10,36
	Extremidade A	3	10,27
	Extremidade A	4	13,68
E8-4	Extremidade B	3	22,68
	Extremidade B	2	5,98
	Entre barras	1	7,00
	Entre barras	1	6,64
	Extremidade A	3	9,53
	Extremidade A	3	4,93
E8-5	Entre barras	1	29,95
	Entre barras	2	14,9
	Entre barras	2	30,45
	Extremidade A	3	9,9
E8-6	Extremidade B	2	9,46
	Extremidade B	4	5,43
	Extremidade B	4	8,95
	Extremidade A	1	13,71
	Extremidade A	2	7,32
	Extremidade A	4	4
M1-1			
M1-2			
M1-3			
M1-4			
M1-5			
M1-6			
M2-1			
M2-2			
M2-3			
M2-4			
M2-5			
M2-6			

Fonte: O autor

Quadro A - 4. Nós dos CPs (continuação).

CP	Nós		Diâmetro máximo (mm)
	Local		
	Posição longitudinal	Face(s)	
M3-1			
M3-2			
M3-3			
M3-4			
M3-5			
M3-6			
M4-1			
M4-2			
M4-3			
M4-4			
M4-5			
M4-6			
M5-1			
M5-2			
M5-3			
M5-4			
M5-5			
M5-6			
M6-1			
M6-2			
M6-3			
M6-4			
M6-5			
M6-6			
M7-1			
M7-2			
M7-3			
M7-4			
M7-5			
M7-6			
M8-1			
M8-2			
M8-3			
M8-4			
M8-5			
M8-6			

Fonte: O autor

Quadro A - 5. Rachaduras dos CPs.

CP	Rachaduras - Comprimento (mm)			
	Local		Direção	Comprimento (mm)
	Posição longitudinal	Face(s)		
E1-1				
E1-2	Extremidade A	1	radial	11,75
			longitudinal	22,8
E1-3				
E1-4				
E1-5				
E1-6				
E2-1				
E2-2				
E2-3				
E2-4				
E2-5				
E2-6				
E3-1				
E3-2				
E3-3				
E3-4				
E3-5				
E3-6	Todas	3	longitudinal	86,1
E4-1				
E4-2				
E4-3				
E4-4				
E4-5				
E4-6				
E5-1				
E5-2				
E5-3				
E5-4				
E5-5				
E5-6				
E6-1				
E6-2				
E6-3				
E6-4	Extremidade B	Aresta	Tangencial	5,4
E6-5				
E6-6				
E7-1				
E7-2				
E7-3	Extremidade A	2	Radial	2,97
			Longitudinal	10,40
E7-4				
E7-5				
E7-6				

Fonte: O autor



Quadro A - 6. Rachaduras dos CPs (continuação).

CP	Rachaduras - Comprimento (mm)			
	Local		Direção	Comprimento (mm)
	Posição longitudinal	Face(s)		
E8-1				
E8-2				
E8-3				
E8-4				
E8-5	Todas	2	Longitudinal	350,5
E8-6				
M1-1				
M1-2				
M1-3				
M1-4				
M1-5	Extremidade A	2	Radial	35
M1-6	Extremidade A	-	Tangencial	35,5
M2-1				
M2-2				
M2-3	Extremidade A	-	Radial	17,5
M2-4				
M2-5				
M2-6				
M3-1				
M3-2				
M3-3				
M3-4				
M3-5				
M3-6				
M4-1				
M4-2				
M4-3				
M4-4				
M4-5				
M4-6				
M5-1				
M5-2				
M5-3				
M5-4				
M5-5				
M5-6				
M6-1				
M6-2				
M6-3				
M6-4				
M6-5				
M6-6				

Fonte: O autor

Quadro A - 7. Rachaduras dos CPs (continuação).

CP	Rachaduras - Comprimento (mm)			
	Local		Direção	Comprimento (mm)
	Posição longitudinal	Face(s)		
M7-1				
M7-2				
M7-3				
M7-4				
M7-5				
M7-6				
M8-1				
M8-2				
M8-3				
M8-4				
M8-5				
M8-6				

Fonte: O autor

Quadro A - 8. Medula e bolsas de resina dos CPs.

CP	MEDULA	BOLSA DE RESINA	
		Local	
		Posição longitudinal	Face (s)
E1-1			
E1-2			
E1-3			
E1-4			
E1-5			
E1-6			
E2-1			4
E2-2			
E2-3			
E2-4			
E2-5			
E2-6			
E3-1			
E3-2			
E3-3			
E3-4			
E3-5			
E3-6			
E4-1			
E4-2			
E4-3			
E4-4			
E4-5			
E4-6	Longitudinal		
E5-1	Longitudinal		
E5-2			
E5-3			
E5-4	Longitudinal, entre as faces 1 e 2		
E5-5			
E5-6			
E6-1	Extremidade A		
E6-2			
E6-3			
E6-4		Entre barras e extremidade B	2
E6-5	Longitudinal		
E6-6	Face 4 da Extremidade B		
E7-1			
E7-2	Longitudinal		
E7-3			
E7-4			
E7-5	Entre barras, longitudinal		
E7-6			

Fonte: O autor

Quadro A - 9. Medula e bolsas de resina dos CPs (continuação).

CP	MEDULA	BOLSA DE RESINA	
		Local	
		Posição longitudinal	Face (s)
E8-1			
E8-2			
E8-3	Longitudinal		
E8-4	Longitudinal		
E8-5	Longitudinal		
E8-6			
M1-1			
M1-2			
M1-3			
M1-4			
M1-5			
M1-6			
M2-1			
M2-2			
M2-3			
M2-4			
M2-5			
M2-6			
M3-1			
M3-2			
M3-3			
M3-4			
M3-5			
M3-6			
M4-1			
M4-2			
M4-3			
M4-4			
M4-5			
M4-6			
M5-1			
M5-2			
M5-3			
M5-4			
M5-5			
M5-6			
M6-1			
M6-2			
M6-3			
M6-4			
M6-5			
M6-6			

Fonte: O autor

Quadro A - 10. Medula e bolsas de resina dos CPs (continuação).

CP	MEDULA	BOLSA DE RESINA	
		Local	
		Posição longitudinal	Face (s)
M7-1			
M7-2			
M7-3			
M7-4			
M7-5			
M7-6			
M8-1			
M8-2			
M8-3			
M8-4			
M8-5			
M8-6			

Fonte: O autor

Quadro A - 11. Erros de colagem e vestígios de madeira queimada.

CP	Defeito de colagem?	Madeira queimada?	CP	Defeito de colagem?	Madeira queimada?
E1-1	SIM		M1-1	SIM	
E1-2			M1-2	SIM	
E1-3			M1-3		
E1-4			M1-4		
E1-5			M1-5		
E1-6			M1-6		
E2-1			M2-1	SIM	
E2-2	SIM		M2-2	SIM	
E2-3	SIM		M2-3		SIM
E2-4	SIM		M2-4		SIM
E2-5	SIM		M2-5	SIM	
E2-6			M2-6		
E3-1			M3-1	SIM	
E3-2	SIM		M3-2	SIM	
E3-3	SIM		M3-3	SIM	
E3-4	SIM		M3-4		
E3-5	SIM		M3-5	SIM	
E3-6	SIM		M3-6	SIM	
E4-1	SIM		M4-1		
E4-2			M4-2		
E4-3			M4-3		
E4-4			M4-4	SIM	
E4-5	SIM		M4-5	SIM	
E4-6	SIM		M4-6	SIM	
E5-1			M5-1		SIM
E5-2			M5-2	SIM	
E5-3	SIM		M5-3	SIM	
E5-4			M5-4	SIM	
E5-5			M5-5	SIM	
E5-6			M5-6		
E6-1	SIM		M6-1	SIM	SIM
E6-2			M6-2		
E6-3			M6-3	SIM	SIM
E6-4			M6-4		
E6-5	SIM		M6-5	SIM	
E6-6			M6-6	SIM	
E7-1			M7-1		
E7-2			M7-2		
E7-3			M7-3	SIM	
E7-4			M7-4	SIM	
E7-5			M7-5		
E7-6			M7-6	SIM	
E8-1	SIM		M8-1	SIM	SIM
E8-2	SIM		M8-2	SIM	SIM
E8-3			M8-3	SIM	
E8-4			M8-4	SIM	
E8-5			M8-5	SIM	
E8-6	SIM		M8-6	SIM	SIM

Fonte: O autor

## ANEXOS – TABELAS

Tabela A - 1. Valores das medições de  $U_{colagem}^{contato}$ 

CP	$U_{colagem}^{contato}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E1-1	16,6	20,0	16,5	18,9	17,26
E1-2	16,6	20,0	16,5	18,9	
E1-3	17,4	16,2	18,8	17,1	
E1-4	17,4	16,2	18,8	17,1	
E1-5	17,0	16,5	16,9	15,2	
E1-6	17,0	16,5	16,9	15,2	
E2-1	15,6	17,1	16,9	15,2	16,66
E2-2	15,6	17,1	16,9	15,2	
E2-3	17,4	16,2	18,8	17,1	
E2-4	17,4	16,2	18,8	17,1	
E2-5	17,0	16,5	16,9	15,2	
E2-6	17,0	16,5	16,9	15,2	
E3-1	24,2	22,4	25,2	22,0	18,4
E3-2	24,2	22,4	25,2	22,0	
E3-3	14,5	16,9	16,8	14,9	
E3-4	14,5	16,9	16,8	14,9	
E3-5	16,4	15,2	16,9	15,4	
E3-6	16,4	15,2	16,9	15,4	
E4-1	15,8	16,2	15,3	15,8	17,4
E4-2	15,8	16,2	15,3	15,8	
E4-3	18,0	22,4	19,3	21,0	
E4-4	18,0	22,4	19,3	21,0	
E4-5	16,3	15,7	16,7	16,8	
E4-6	16,3	15,7	16,7	16,8	
E5-1	18,6	16,4	18,8	17,0	17,8
E5-2	18,6	16,4	18,8	17,0	
E5-3	16,0	16,0	18,5	18,2	
E5-4	16,0	16,0	18,5	18,2	
E5-5	19,7	19,0	16,3	18,6	
E5-6	19,7	19,0	16,3	18,6	
E6-1	16,0	15,8	15,5	16,0	16,0
E6-2	16,0	15,8	15,5	16,0	
E6-3	15,3	17,0	18,0	17,7	
E6-4	15,3	17,0	18,0	17,7	
E6-5	15,3	12,9	14,6	17,3	
E6-6	15,3	12,9	14,6	17,3	

Fonte: O autor

Tabela A - 2. Valores das medições de  $U_{colagem}^{contato}$  (continuação).

CP	$U_{colagem}^{contato}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E7-1	16,5	15,8	13,9	14,7	16,5
E7-2	16,5	15,8	13,9	14,7	
E7-3	14,9	14,9	15,2	15,9	
E7-4	14,9	14,9	15,2	15,9	
E7-5	18,8	21,8	17,0	18,9	
E7-6	18,8	21,8	17,0	18,9	
E8-1	16,7	16,8	18,3	19,3	17,6
E8-2	17,8	19,0	18,4	17,0	
E8-3	16,3	16,8	17,8	17,2	
E8-4	16,3	16,8	17,8	17,2	
E8-5	17,8	19,0	18,4	17,0	
E8-6	16,7	16,8	18,3	19,3	
M1-1	20,3	18,8	19,0	20,8	19,5
M1-2	20,3	18,8	19,0	20,8	
M1-3	16,6	16,8	17,7	18,4	
M1-4	16,6	16,8	17,7	18,4	
M1-5	20,9	21,3	21,3	22,5	
M1-6	20,9	21,3	21,3	22,5	
M2-1	20,9	19,7	22,1	20,1	22,3
M2-2	20,9	19,7	22,1	20,1	
M2-3	19,8	24,4	22,1	19,6	
M2-4	19,8	24,4	22,1	19,6	
M2-5	24,9	24,1	23,5	26,9	
M2-6	24,9	24,1	23,5	26,9	
M3-1	26,4	28,6	28,8	25,6	24,6
M3-2	26,4	28,6	28,8	25,6	
M3-3	22,5	25,6	25,3	26,0	
M3-4	22,5	25,3	25,3	26,0	
M3-5	23,4	19,4	21,3	23,1	
M3-6	23,4	19,4	19,3	23,1	
M4-1	21,5	18,4	20,7	20,0	19,4
M4-2	21,5	18,4	20,7	20,0	
M4-3	18,0	19,5	17,2	19,0	
M4-4	18,0	19,5	17,2	19,0	
M4-5	18,1	17,9	21,1	21,7	
M4-6	18,1	17,9	21,1	21,7	

Fonte: O autor



Tabela A - 3. Valores das medições de  $U_{colagem}^{contato}$  (continuação).

CP	$U_{colagem}^{contato}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
M5-1	22,9	19,0	18,3	19,3	19,4
M5-2	22,9	19,0	18,3	19,3	
M5-3	16,9	18,5	19,9	19,9	
M5-4	16,9	18,5	19,9	19,9	
M5-5	21,3	19,2	18,6	19,1	
M5-6	21,3	19,2	18,6	19,1	
M6-1	19,3	18,0	22,6	22,3	20,1
M6-2	19,3	18,0	22,6	22,3	
M6-3	16,8	20,3	19,9	21,0	
M6-4	16,8	20,3	19,9	21,0	
M6-5	21,4	17,6	22,8	19,6	
M6-6	21,4	17,6	22,8	19,6	
M7-1	22,3	23,3	19,3	24,3	22,3
M7-2	22,3	23,3	19,3	24,3	
M7-3	19,0	22,0	23,2	21,1	
M7-4	19,0	22,0	23,2	21,1	
M7-5	24,0	23,5	23,3	22,5	
M7-6	24,0	23,5	23,3	22,5	
M8-1	19,2	20,6	20,3	16,2	17,5
M8-2	19,2	20,6	20,3	16,2	
M8-3	17,2	15,2	16,6	16,0	
M8-4	17,2	15,2	16,6	16,0	
M8-5	17,2	18,0	15,6	17,4	
M8-6	17,2	18,0	15,6	17,4	

Fonte: O autor

Tabela A - 4. Valores das medições de  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ .

CP	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E1-1	20,0	18,2	19,7	19,6	18,07
E1-2	20,0	18,2	19,7	19,6	
E1-3	17,0	16,9	18,5	17,5	
E1-4	17,0	16,9	18,5	17,5	
E1-5	16,9	16,9	18,0	17,2	
E1-6	16,9	16,9	18,0	17,2	
E2-1	16,7	16,3	14,8	15,9	17,18
E2-2	16,7	16,3	14,8	15,9	
E2-3	18,3	19,3	15,9	17,5	
E2-4	18,3	19,3	15,9	17,5	
E2-5	17,1	17,3	18,3	18,1	
E2-6	17,1	17,3	18,3	18,1	
E3-1	23,2	22,6	19,9	22,2	17,9
E3-2	23,2	22,6	19,9	22,2	
E3-3	16,9	17,3	15,6	16,0	
E3-4	16,9	17,3	15,6	16,0	
E3-5	15,2	16,1	14,2	15,6	
E3-6	15,2	16,1	14,2	15,6	
E4-1	16,8	15,3	15,6	16,3	18,0
E4-2	16,8	15,3	15,6	16,3	
E4-3	21,5	18,5	23,3	20,9	
E4-4	21,5	18,5	23,3	20,9	
E4-5	17,1	14,8	18,0	16,7	
E4-6	17,1	14,8	18,0	16,7	
E5-1	17,3	15,5	17,1	17,2	18,3
E5-2	17,3	15,5	17,1	17,2	
E5-3	18,8	17,6	17,8	18,4	
E5-4	18,8	17,6	17,8	18,4	
E5-5	20,7	19,8	18,5	19,4	
E5-6	20,7	19,8	18,5	19,4	
E6-1	14,9	16,0	15,2	15,4	16,3
E6-2	14,9	16,0	15,2	15,4	
E6-3	19,2	18,2	19,5	18,2	
E6-4	19,2	18,2	19,5	18,2	
E6-5	15,8	14,2	16,3	15,4	
E6-6	15,8	14,2	16,3	15,4	

Fonte: O autor

Tabela A - 5. Valores das medições de  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  (continuação).

CP	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E7-1	16,0	16,3	15,4	15,7	17,6
E7-2	16,0	16,3	15,4	15,7	
E7-3	20,6	18,1	21,2	20,4	
E7-4	20,6	18,1	21,2	20,4	
E7-5	16,8	15,0	17,4	16,7	
E7-6	16,8	15,0	17,4	16,7	
E8-1	16,5	14,9	15,5	15,8	17,5
E8-2	16,5	14,9	15,5	15,8	
E8-3	18,8	16,3	17,8	17,5	
E8-4	18,8	16,3	17,8	17,5	
E8-5	19,1	17,5	21,1	19,4	
E8-6	19,1	17,5	21,1	19,4	
M1-1	19,6	19,3	18,0	19,2	19,1
M1-2	19,6	19,3	18,0	19,2	
M1-3	17,5	16,0	18,7	17,9	
M1-4	17,5	16,0	18,7	17,9	
M1-5	19,5	19,0	20,1	20,1	
M1-6	19,5	19,0	20,1	20,1	
M2-1	19,2	20,1	20,3	20,3	21,1
M2-2	19,2	20,1	20,3	20,3	
M2-3	20,0	20,5	21,2	19,8	
M2-4	20,0	20,5	21,2	19,8	
M2-5	25,2	21,0	22,1	23,2	
M2-6	25,2	21,0	22,1	23,2	
M3-1	25,6	22,7	25,1	25,1	23,6
M3-2	25,6	22,7	25,1	25,1	
M3-3	20,3	25,2	27,8	24,2	
M3-4	20,3	25,2	27,8	24,2	
M3-5	19,9	23,5	24,3	21,7	
M3-6	19,9	23,5	24,3	21,7	
M4-1	18,6	19,2	16,2	18,7	19,1
M4-2	18,6	19,2	16,2	18,7	
M4-3	19,0	18,2	19,4	19,1	
M4-4	19,0	18,2	19,4	19,1	
M4-5	21,2	18,8	18,8	19,5	
M4-6	21,2	18,8	18,8	19,5	

Fonte: O autor

Tabela A - 6. Valores das medições de  $U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$  (continuação).

CP	$U_{\text{ensaio}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
M5-1	19,0	19,2	20,7	19,8	19,4
M5-2	19,0	19,2	20,7	19,8	
M5-3	20,5	19,7	17,5	19,3	
M5-4	20,5	19,7	17,5	19,3	
M5-5	19,0	19,7	18,0	19,3	
M5-6	19,0	19,7	18,0	19,3	
M6-1	19,9	19,7	16,8	19,3	19,5
M6-2	19,9	19,7	16,8	19,3	
M6-3	18,4	21,5	16,5	19,3	
M6-4	18,4	21,5	16,5	19,3	
M6-5	19,4	21,5	19,4	19,8	
M6-6	19,4	21,5	19,4	19,8	
M7-1	24,3	21,1	25,2	22,6	22,0
M7-2	24,3	21,1	25,2	22,6	
M7-3	18,4	21,8	20,9	20,6	
M7-4	18,4	21,8	20,9	20,6	
M7-5	21,1	22,6	22,7	22,8	
M7-6	21,1	22,6	22,7	22,8	
M8-1	19,2	18,6	16,9	18,0	17,1
M8-2	19,2	18,6	16,9	18,0	
M8-3	16,1	15,9	16,4	16,6	
M8-4	16,1	15,9	16,4	16,6	
M8-5	15,6	16,5	17,6	16,7	
M8-6	15,6	16,5	17,6	16,65	

Fonte: O autor

Tabela A - 7. Valores das medições de  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ 

CP	$U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E1-1	21,2	20,2	20,2	17,9	17,9
E1-2	21,2	20,2	20,2	17,9	
E1-3	18,2	18,2	15,8	17,3	
E1-4	18,2	18,2	15,8	17,3	
E1-5	15,2	17,1	16,3	17,1	
E1-6	15,2	17,1	16,3	17,1	
E2-1	16,9	17,5	18,0	17,3	18,2
E2-2	16,9	17,5	18,0	17,3	
E2-3	17,2	16,5	20,3	18,8	
E2-4	17,2	16,5	20,3	18,8	
E2-5	19,3	19,8	17,9	19,1	
E2-6	19,3	19,8	17,9	19,1	
E3-1	20,7	19,3	20,3	20,5	16,9
E3-2	20,7	19,3	20,3	20,5	
E3-3	20,7	19,3	20,3	20,5	
E3-4	13,9	13,5	13,0	13,9	
E3-5	13,9	13,5	13,0	13,9	
E3-6	13,9	13,5	13,0	13,9	
E4-1	19,0	19,4	18,4	18,9	17,6
E4-2	19,0	19,4	18,4	18,9	
E4-3	19,0	19,4	18,4	18,9	
E4-4	16,8	15,3	15,7	17,1	
E4-5	16,8	15,3	15,7	17,1	
E4-6	16,8	15,3	15,7	17,1	
E5-1	15,8	16,4	15,5	15,9	17,0
E5-2	15,8	16,4	15,5	15,9	
E5-3	15,8	16,4	15,5	15,9	
E5-4	18,5	15,8	18,8	19,3	
E5-5	18,5	15,8	18,8	19,3	
E5-6	18,5	15,8	18,8	19,3	
E6-1	15,8	14,4	15,8	15,3	16,0
E6-2	15,8	14,4	15,8	15,3	
E6-3	17,5	18,1	19,8	16,8	
E6-4	17,5	18,1	19,8	16,8	
E6-5	14,4	15,0	13,3	15,2	
E6-6	14,4	15,0	13,3	15,2	

Fonte: O autor

Tabela A - 8. Valores das medições de  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  (continuação).

CP	$U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
E7-1	17,2	14,8	13,7	16,1	16,4
E7-2	17,2	14,8	13,7	16,1	
E7-3	19,2	19,2	16,3	16,6	
E7-4	19,2	19,2	16,3	16,6	
E7-5	14,9	15,5	16,7	16,0	
E7-6	14,9	15,5	16,7	16,0	
E8-1	16,6	16,8	15,8	16,2	17,9
E8-2	16,6	16,8	15,8	16,2	
E8-3	17,2	18,2	16,3	18,5	
E8-4	17,2	18,2	16,3	18,5	
E8-5	18,5	20,2	20,6	19,7	
E8-6	18,5	20,2	20,6	19,7	
M1-1	18,3	19,2	19,0	20,0	18,8
M1-2	18,3	19,2	19,0	20,0	
M1-3	18,8	16,4	15,8	17,1	
M1-4	18,8	16,4	15,8	17,1	
M1-5	20,5	20,0	19,2	21,5	
M1-6	20,5	20,0	19,2	21,5	
M2-1	20,1	19,4	20,2	19,7	20,9
M2-2	20,1	19,4	20,2	19,7	
M2-3	20,9	20,8	22,2	18,2	
M2-4	20,9	20,8	22,2	18,2	
M2-5	24,2	24,2	20,5	20,6	
M2-6	24,2	24,2	20,5	20,6	
M3-1	20,9	19,9	21,3	22,7	20,0
M3-2	20,9	19,9	21,3	22,7	
M3-3	20,9	19,9	21,3	22,7	
M3-4	18,2	19,5	18,5	19,2	
M3-5	18,2	19,5	18,5	19,2	
M3-6	18,2	19,5	18,5	19,2	
M4-1	16,1	17,0	18,4	19,6	17,9
M4-2	16,1	17,0	18,4	19,6	
M4-3	16,1	17,0	18,4	19,6	
M4-4	15,6	18,4	18,0	19,7	
M4-5	15,6	18,4	18,0	19,7	
M4-6	15,6	18,4	18,0	19,7	

Fonte: O autor

Tabela A - 9. Valores das medições de  $U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$  (continuação).

CP	$U_{\text{pré-estufa}}^{\text{contato}}$ (%)				Média
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
M5-1	18,8	19,3	17,0	18,3	18,2
M5-2	18,8	19,3	17,0	18,3	
M5-3	18,8	19,3	17,0	18,3	
M5-4	18,2	16,9	18,8	18,3	
M5-5	18,2	16,9	18,8	18,3	
M5-6	18,2	16,9	18,8	18,3	
M6-1	19,7	18,9	14,4	20,4	18,8
M6-2	19,7	18,9	14,4	20,4	
M6-3	21,0	17,7	17,4	19,4	
M6-4	21,0	17,7	17,4	19,4	
M6-5	17,2	19,0	20,4	20,0	
M6-6	17,2	19,0	20,7	20,0	
M7-1	21,9	21,7	19,3	21,1	20,6
M7-2	21,9	21,7	19,3	21,1	
M7-3	21,0	20,1	20,3	19,7	
M7-4	21,0	20,1	20,3	19,7	
M7-5	21,3	19,6	20,0	21,1	
M7-6	21,3	19,6	20,0	21,1	
M8-1	18,3	18,5	18,6	18,8	17,5
M8-2	18,3	18,5	18,6	18,8	
M8-3	16,5	18,2	17,6	15,6	
M8-4	16,5	18,2	17,6	15,6	
M8-5	17,8	17,4	16,1	17,0	
M8-6	17,8	17,4	16,1	17,0	

Fonte: O autor

Tabela A - 10. Valores de  $\rho_{\text{bás}}$ .

<b>CP</b>	<b><math>\rho_{\text{bás}}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (kg/m<sup>3</sup>)</b>
E3-2	774,38	708,32
E3-3	614,01	
E3-6	736,58	
E4-1	749,54	749,15
E4-2	728,25	
E4-3	769,66	
E5-4	747,71	734,24
E5-5	724,73	
E5-6	730,28	
E6-1	608,24	630,78
E6-3	749,58	
E6-5	534,53	
E7-3	842,85	701,30
E7-4	583,34	
E7-5	677,70	
E8-3	717,89	687,00
E8-5	655,95	
E8-6	687,17	
M3-1	1015,20	979,97
M3-2	937,88	
M3-3	986,83	
M4-3	985,88	965,54
M4-4	966,33	
M4-6	944,42	
M5-1	947,24	956,02
M5-2	927,47	
M5-4	993,36	
M6-1	995,99	1001,69
M6-2	991,05	
M6-4	1018,03	
M7-1	820,46	929,12
M7-3	998,60	
M7-5	968,31	
M8-1	950,18	942,88
M8-2	929,00	
M8-5	949,45	

Fonte: O autor



Tabela A - 11.  $\rho_{ap}$  segundo a equação (4).

CP	$U_{estufa}$ (%)	Massa (g)	$V_{inicial}$ (m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Média de $\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
E3-2	16,611	59,74	6,231E-05	958,822	856,768
E3-3	17,966	46,75	6,224E-05	751,177	
E3-6	14,247	55,49	6,227E-05	891,136	
E4-1	14,434	54,94	6,190E-05	887,524	
E4-2	14,516	53,17	6,083E-05	874,090	
E4-3	18,016	56,86	6,107E-05	931,136	
E5-4	17,703	55,85	6,070E-05	920,051	
E5-5	17,987	54,97	6,237E-05	881,309	
E5-6	17,645	55,74	6,292E-05	885,949	
E6-1	17,599	47,51	6,184E-05	768,218	
E6-3	16,298	57,23	6,287E-05	910,349	
E6-5	18,334	42,34	6,202E-05	682,688	
E7-3	14,296	62,04	6,214E-05	998,328	
E7-4	17,879	46,02	6,385E-05	720,718	
E7-5	17,276	52,00	6,342E-05	819,984	
E8-3	17,275	53,97	6,118E-05	882,216	
E8-5	17,590	50,54	6,272E-05	805,839	
E8-6	16,297	52,95	6,213E-05	852,280	
M3-1	17,031	72,77	6,299E-05	1155,185	1112,165
M3-2	18,046	66,59	6,190E-05	1075,724	
M3-3	15,984	71,91	6,174E-05	1164,815	
M4-3	13,662	69,80	6,292E-05	1109,257	
M4-4	15,731	70,48	6,324E-05	1114,466	
M4-6	15,796	67,37	6,250E-05	1077,918	
M5-1	15,608	66,59	6,179E-05	1077,746	
M5-2	15,814	66,35	6,174E-05	1074,646	
M5-4	13,046	70,19	6,256E-05	1122,026	
M6-1	16,462	69,40	5,994E-05	1157,876	
M6-2	15,540	69,37	6,134E-05	1130,946	
M6-4	14,235	70,46	6,143E-05	1146,966	
M7-1	17,292	62,88	5,901E-05	1065,644	
M7-3	13,990	70,56	6,056E-05	1165,203	
M7-5	15,383	65,93	5,958E-05	1106,605	
M8-1	14,069	63,97	6,152E-05	1039,893	
M8-2	14,581	67,03	6,060E-05	1106,136	
M8-5	13,362	68,21	6,048E-05	1127,901	

Fonte: O autor

Tabela A - 12.  $\rho_{ap}$  segundo a equação (5).

CP	$U_{estufa}$ (%)	$V_{inicial}$ (m <sup>3</sup> )	$V_{final}$ (m <sup>3</sup> )	$\rho_{bás}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Média de $\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
E3-2	16,611	6,231E-05	6,616E-05	774,382	903,018	818,938
E3-3	17,966	6,224E-05	6,454E-05	614,010	724,324	
E3-6	14,247	6,227E-05	6,594E-05	736,579	841,523	
E4-1	14,434	6,190E-05	6,405E-05	749,539	857,731	
E4-2	14,516	6,083E-05	6,376E-05	728,250	833,967	
E4-3	18,016	6,107E-05	6,260E-05	769,657	908,316	
E5-4	17,703	6,070E-05	6,346E-05	747,708	880,074	
E5-5	17,987	6,237E-05	6,429E-05	724,733	855,088	
E5-6	17,645	6,292E-05	6,488E-05	730,281	859,136	
E6-1	17,599	6,184E-05	6,642E-05	608,240	715,284	
E6-3	16,298	6,287E-05	6,565E-05	749,575	871,737	
E6-5	18,334	6,202E-05	6,694E-05	534,526	632,527	
E7-3	14,296	6,214E-05	6,440E-05	842,849	963,344	
E7-4	17,879	6,385E-05	6,692E-05	583,340	687,636	
E7-5	17,276	6,342E-05	6,543E-05	677,699	794,776	
E8-3	17,275	6,118E-05	6,410E-05	717,895	841,912	
E8-5	17,590	6,272E-05	6,552E-05	655,951	771,330	
E8-6	16,297	6,213E-05	6,626E-05	687,167	799,154	
M3-1	17,031	6,299E-05	6,125E-05	1015,197	1188,097	1109,720
M3-2	18,046	6,190E-05	6,015E-05	937,880	1107,134	
M3-3	15,984	6,174E-05	6,283E-05	986,828	1144,561	
M4-3	13,662	6,292E-05	6,229E-05	985,876	1120,570	
M4-4	15,731	6,324E-05	6,302E-05	966,335	1118,346	
M4-6	15,796	6,250E-05	6,160E-05	944,415	1093,593	
M5-1	15,608	6,179E-05	6,081E-05	947,237	1095,079	
M5-2	15,814	6,174E-05	6,177E-05	927,466	1074,138	
M5-4	13,046	6,256E-05	6,250E-05	993,361	1122,951	
M6-1	16,462	5,994E-05	5,983E-05	995,986	1159,950	
M6-2	15,540	6,134E-05	6,058E-05	991,049	1145,055	
M6-4	14,235	6,143E-05	6,059E-05	1018,033	1162,948	
M7-1	17,292	5,901E-05	6,534E-05	820,461	962,332	
M7-3	13,990	6,056E-05	6,199E-05	998,602	1138,310	
M7-5	15,383	5,958E-05	5,901E-05	968,308	1117,265	
M8-1	14,069	6,152E-05	5,902E-05	950,178	1083,861	
M8-2	14,581	6,060E-05	6,297E-05	929,000	1064,459	
M8-5	13,362	6,048E-05	6,337E-05	949,450	1076,317	

Fonte: O autor

Tabela A - 13. Valores das medições de  $\theta$ .

Série	Medições de $\theta$ (°)								Média	Máximo
	1	2	3	4	5	6	7	8		
E1-1	1,50	1,40	0,50	1,00	2,10	0,20	0,00	2,40	1,14	2,40
E1-2	0,20	1,90	2,70	0,70	0,50	0,70	0,70	0,20	0,95	2,70
E1-3	1,10	0,60	0,20	3,00	1,50	1,20	0,10	3,20	1,36	3,20
E1-4	0,30	2,00	1,90	1,40	1,70	0,30	1,40	1,90	1,36	2,00
E1-5	0,20	4,60	2,50	2,20	0,40	1,40	0,20	0,10	1,45	4,60
E1-6	1,40	1,80	0,90	2,30	3,80	1,10	0,30	2,30	1,74	3,80
E2-1	2,10	0,30	1,00	1,10	0,70	1,00	0,10	1,00	0,91	2,10
E2-2	0,50	2,10	0,10	2,50	2,40	0,00	0,80	0,10	1,06	2,50
E2-3	0,20	0,40	0,60	3,20	0,90	1,60	2,70	0,40	1,25	3,20
E2-4	0,60	2,20	0,20	1,40	0,30	0,20	0,60	0,80	0,79	2,20
E2-5	0,60	0,90	0,00	0,20	2,60	0,90	0,50	2,90	1,08	2,90
E2-6	0,60	0,60	0,20	0,80	2,50	0,50	3,60	1,10	1,24	3,60
E3-1	0,00	1,20	2,00	3,60	1,10	1,40	0,00	0,20	1,19	3,60
E3-2	0,20	2,70	1,30	2,20	1,30	1,20	0,50	1,60	1,38	2,70
E3-3	0,10	1,30	1,10	0,20	0,80	0,80	0,90	0,40	0,70	1,30
E3-4	1,00	2,00	2,20	2,20	1,60	2,70	0,90	0,30	1,61	2,70
E3-5	1,70	0,40	0,60	0,60	0,70	1,10	0,40	0,80	0,79	1,70
E3-6	0,70	1,30	1,50	0,60	1,50	2,30	0,10	4,70	1,59	4,70
E4-1	0,50	0,90	2,00	2,60	2,00	2,60	0,30	1,40	1,54	2,60
E4-2	0,60	1,40	1,70	1,00	0,80	1,70	2,80	1,30	1,41	2,80
E4-3	1,30	0,20	2,60	1,30	0,00	1,90	0,80	3,00	1,39	3,00
E4-4	0,30	3,90	1,40	2,90	1,50	3,00	2,90	1,80	2,21	3,90
E4-5	3,20	0,00	0,90	0,50	0,50	1,00	0,90	1,20	1,03	3,20
E4-6	1,80	0,70	2,30	1,10	0,90	1,50	0,80	1,50	1,33	2,30
E5-1	4,70	0,80	1,40	0,90	2,20	1,60	3,00	0,70	1,91	4,70
E5-2	1,10	0,60	0,10	1,30	1,20	0,90	1,40	0,00	0,83	1,40
E5-3	1,80	1,60	0,40	1,00	0,50	0,40	0,70	0,60	0,88	1,80
E5-4	2,00	2,00	4,70	1,10	1,10	1,20	0,80	1,10	1,75	4,70
E5-5	0,80	0,60	0,80	2,10	1,00	0,00	3,30	1,20	1,23	3,30
E5-6	1,50	4,00	2,50	3,30	2,50	1,20	4,20	0,80	2,50	4,20
E6-1	2,40	2,70	3,20	1,00	0,80	0,20	1,40	2,40	1,76	3,20
E6-2	1,20	1,50	1,00	0,40	0,60	0,40	3,00	0,40	1,06	3,00
E6-3	0,70	3,20	1,40	2,40	1,60	2,90	1,70	1,40	1,91	3,20
E6-4	2,30	0,90	2,40	0,60	1,00	3,90	3,30	2,50	2,11	3,90
E6-5	0,60	0,40	1,90	0,60	0,00	0,00	1,90	1,10	0,81	1,90
E6-6	0,00	0,00	3,00	0,60	2,30	1,50	0,70	0,60	1,09	3,00

Fonte: O autor

Tabela A - 14. Valores das medições de  $\theta$  (continuação).

Série	Medições de $\theta$ (°)								Média	Máximo
	1	2	3	4	5	6	7	8		
E7-1	0,20	1,60	0,20	1,70	1,80	0,40	1,10	2,60	1,20	2,60
E7-2	0,70	1,40	1,00	3,00	0,40	1,50	2,30	2,00	1,54	3,00
E7-3	3,20	1,20	1,20	0,90	3,10	1,80	0,50	0,50	1,55	3,20
E7-4	1,10	1,70	1,80	1,10	0,20	1,30	1,70	0,00	1,11	1,80
E7-5	1,90	0,90	1,40	3,50	3,00	1,90	1,50	0,30	1,80	3,50
E7-6	1,40	1,30	1,40	0,20	2,00	0,50	0,70	2,70	1,28	2,70
E8-1	0,20	0,50	1,00	1,70	0,80	0,80	0,30	0,70	0,75	1,70
E8-2	0,60	1,90	0,30	0,20	1,10	0,50	1,60	0,40	0,83	1,90
E8-3	3,10	0,10	1,40	1,70	1,60	0,10	1,80	4,90	1,84	4,90
E8-4	1,80	1,20	1,50	1,70	2,20	3,00	2,40	0,50	1,79	3,00
E8-5	1,40	2,50	1,60	0,60	1,50	1,50	3,00	0,30	1,55	3,00
E8-6	0,30	1,20	1,20	3,90	0,00	2,00	2,50	0,10	1,40	3,90
M1-1	2,40	2,50	4,40	0,00	1,20	1,40	1,20	3,90	2,13	4,40
M1-2	1,50	1,60	0,20	3,30	1,80	2,10	2,90	1,00	1,80	3,30
M1-3	3,70	1,30	3,10	0,40	0,50	0,90	1,60	2,50	1,75	3,70
M1-4	2,40	1,60	1,90	2,30	1,10	1,10	2,00	0,00	1,55	2,40
M1-5	0,40	0,30	2,80	1,20	2,90	0,40	3,50	2,00	1,69	3,50
M1-6	0,20	1,10	0,80	2,10	2,90	0,20	1,30	0,40	1,13	2,90
M2-1	0,70	1,00	2,20	0,20	2,60	0,40	3,60	0,00	1,34	3,60
M2-2	2,20	3,20	2,90	2,00	2,80	0,30	2,50	0,40	2,04	3,20
M2-3	2,30	1,60	1,40	3,90	0,30	2,50	0,90	1,80	1,84	3,90
M2-4	0,20	0,20	0,30	0,60	0,10	3,10	0,20	1,60	0,79	3,10
M2-5	1,40	0,00	1,60	0,60	2,00	2,30	1,20	2,40	1,44	2,40
M2-6	1,10	0,80	0,90	1,60	0,10	3,10	0,80	2,80	1,40	3,10
M3-1	1,60	2,70	0,20	3,60	1,60	1,40	1,80	0,10	1,63	3,60
M3-2	0,40	1,00	3,60	1,10	1,20	1,10	2,00	0,00	1,30	3,60
M3-3	1,80	1,60	0,20	0,50	1,50	1,90	2,60	3,60	1,71	3,60
M3-4	3,10	2,30	2,00	0,60	2,00	1,00	3,00	1,00	1,88	3,10
M3-5	2,50	1,10	1,10	0,40	0,10	1,40	0,70	0,60	0,99	2,50
M3-6	2,40	2,10	0,80	0,80	1,40	0,20	1,90	0,70	1,29	2,40
M4-1	0,70	0,10	2,60	0,20	3,00	0,70	3,60	0,70	1,45	3,60
M4-2	2,20	2,70	3,00	1,20	0,00	0,10	0,10	0,10	1,18	3,00
M4-3	4,00	3,60	5,20	1,50	1,40	1,40	1,10	1,40	2,45	5,20
M4-4	2,00	1,20	1,10	1,10	0,30	1,70	1,10	0,90	1,18	2,00
M4-5	0,60	3,30	1,50	2,30	0,90	1,00	0,30	0,50	1,30	3,30
M4-6	0,90	0,00	0,70	1,40	1,10	2,50	3,00	2,70	1,54	3,00

Fonte: O autor

Tabela A - 15. Valores das medições de  $\theta$  (continuação).

Série	Medições de $\theta$ (°)								Média	Máximo
	1	2	3	4	5	6	7	8		
M5-1	0,10	0,20	1,50	1,20	0,90	1,40	1,80	1,60	1,09	1,80
M5-2	1,30	3,90	1,20	4,70	1,20	3,00	0,80	2,00	2,26	4,70
M5-3	1,00	1,60	1,40	0,60	0,60	1,90	0,80	0,60	1,06	1,90
M5-4	2,00	0,60	0,70	1,90	2,30	1,90	0,70	2,00	1,51	2,30
M5-5	4,10	0,80	1,90	1,00	5,30	0,70	5,50	0,60	2,49	5,50
M5-6	1,90	1,50	1,60	2,30	0,60	0,50	1,80	3,30	1,69	3,30
M6-1	2,20	2,20	1,00	2,90	4,30	0,60	6,00	1,10	2,54	6,00
M6-2	0,20	0,20	2,60	2,50	2,20	1,10	1,50	0,20	1,31	2,60
M6-3	0,00	0,80	3,20	1,80	2,70	2,40	2,40	0,10	1,68	3,20
M6-4	3,60	0,40	0,20	0,80	0,70	1,30	0,80	0,50	1,04	3,60
M6-5	1,30	3,10	0,20	1,00	1,60	1,60	3,20	0,00	1,50	3,20
M6-6	1,00	0,70	1,60	1,00	2,90	0,10	4,00	0,10	1,43	4,00
M7-1	1,60	4,00	3,40	4,50	3,20	2,90	1,00	3,80	3,05	4,50
M7-2	2,00	4,20	0,20	1,60	1,20	1,10	2,30	2,00	1,83	4,20
M7-3	0,20	1,90	2,50	2,30	2,60	1,80	1,00	1,10	1,68	2,60
M7-4	0,80	2,90	1,40	2,70	3,50	0,20	5,00	1,30	2,23	5,00
M7-5	2,50	0,70	4,20	2,30	1,80	1,00	0,40	0,70	1,70	4,20
M7-6	0,00	0,80	1,00	1,80	0,50	0,20	0,80	1,50	0,83	1,80
M8-1	1,80	1,10	1,90	1,50	3,10	0,10	3,20	0,60	1,66	3,20
M8-2	4,90	2,10	3,00	1,90	1,10	1,80	1,70	2,00	2,31	4,90
M8-3	2,80	1,00	1,90	2,80	0,20	3,30	1,50	3,30	2,10	3,30
M8-4	1,40	0,60	1,50	1,30	0,20	4,60	0,20	1,50	1,41	4,60
M8-5	0,80	2,40	1,70	0,00	1,60	2,70	1,80	0,10	1,39	2,70
M8-6	1,50	1,10	0,00	1,10	2,00	2,10	0,80	1,10	1,21	2,10

Fonte: O autor

Tabela A - 16.  $F_{rupt}$  das ligações coladas com barras de aço.

<b>CP</b>	<b><math>F_{rupt}</math> (kN)</b>	<b>Média</b>
E1-1	12,76	14,99
E1-2	15,65	
E1-3	16,61	
E1-4	Não rompeu	
E1-5	15,49	
E1-6	14,43	
E2-1	16,78	16,93
E2-2	16,79	
E2-3	15,36	
E2-4	18,04	
E2-5	16,22	
E2-6	18,37	
E3-1	14,27	17,34
E3-2	17,22	
E3-3	18,40	
E3-4	18,02	
E3-5	18,21	
E3-6	17,92	
E4-1	18,34	15,28
E4-2	13,47	
E4-3	16,23	
E4-4	15,88	
E4-5	14,51	
E4-6	13,28	
E5-1	15,15	16,71
E5-2	17,31	
E5-3	17,01	
E5-4	16,85	
E5-5	17,38	
E5-6	16,54	
E6-1	17,43	17,36
E6-2	18,48	
E6-3	18,54	
E6-4	14,49	
E6-5	18,43	
E6-6	16,82	

Fonte: O autor

Tabela A - 17.  $F_{rupt}$  das ligações coladas com barras de aço (continuação).

<b>CP</b>	<b><math>F_{rupt}</math> (kN)</b>	<b>Média</b>
E7-1	18,94	18,50
E7-2	18,46	
E7-3	18,15	
E7-4	18,47	
E7-5	18,53	
E7-6	18,44	
E8-1	17,26	17,11
E8-2	17,51	
E8-3	17,15	
E8-4	17,44	
E8-5	16,47	
E8-6	16,84	
M1-1	Não rompeu	13,45
M1-2	11,64	
M1-3	15,67	
M1-4	14,04	
M1-5	12,45	
M1-6	Não rompeu	
M2-1	12,81	15,65
M2-2	15,49	
M2-3	17,59	
M2-4	18,28	
M2-5	12,84	
M2-6	16,87	
M3-1	13,54	15,79
M3-2	16,58	
M3-3	16,44	
M3-4	16,31	
M3-5	16,65	
M3-6	15,20	
M4-1	12,56	15,31
M4-2	15,34	
M4-3	16,79	
M4-4	18,59	
M4-5	12,69	
M4-6	15,88	

Fonte: O autor

Tabela A - 18.  $F_{rupt}$  das ligações coladas com barras de aço (continuação).

<b>CP</b>	<b><math>F_{rupt}</math> (kN)</b>	<b>Média</b>	
M5-1	17,24		
M5-2	Não rompeu		
M5-3	14,70	16,23	
M5-4	17,03		
M5-5	16,28		
M5-6	15,88		
M6-1	16,34		
M6-2	13,53		
M6-3	16,15	15,91	
M6-4	16,80		
M6-5	16,46		
M6-6	16,20		
M7-1	15,24		
M7-2	18,17		
M7-3	18,41	17,71	
M7-4	17,50		
M7-5	18,39		
M7-6	18,55		
M8-1	15,30		
M8-2	16,28		
M8-3	17,32	17,03	
M8-4	16,63		
M8-5	18,00		
M8-6	18,64		

Fonte: O autor



Tabela A - 19. Linhas de tendência dos gráficos  $F_{rupt} - \theta$ .

CP	Exponencial		Linear		Logarítmica		Polinomial		Potência	
	Fórmula	R <sup>2</sup>	Fórmula	R <sup>2</sup>	Fórmula	R <sup>2</sup>	Fórmula	R <sup>2</sup>	Fórmula	R <sup>2</sup>
E1-x	$y = 14,589e^{0,0173x}$	0,00270	$y = 0,1702x + 14,762$	0,00120	$y = 0,2701\ln(x) + 14,917$	0,00180	$y = -3,049x^2 + 8,3505x + 9,4972$	0,02650	$y = 14,832x^{0,0247}$	0,00320
E2-x	$y = 19,32e^{-0,127x}$	0,11910	$y = -2,0515x + 19,089$	0,10850	$y = -2,221\ln(x) + 17,015$	0,12440	$y = 14,999x^2 - 32,931x + 34,563$	0,22160	$y = 16,987x^{-0,137}$	0,13460
E3-x	$y = 17,817e^{-0,026x}$	0,01080	$y = -0,4723x + 17,909$	0,01420	$y = -0,4723x + 17,909$	0,01420	$y = 14,961x^2 - 35,06x + 35,938$	0,72910	$y = 17,394x^{-0,05}$	0,03390
E4-x	$y = 12,882e^{0,1109x}$	0,12640	$y = 1,6696x + 12,807$	0,11840	$y = 2,8299\ln(x) + 14,245$	0,13580	$y = -3,055x^2 + 11,849x + 4,8292$	0,17930	$y = 14,186x^{0,1854}$	0,14100
E5-x	$y = 17,837e^{-0,044x}$	0,32150	$y = -0,7251x + 17,804$	0,33370	$y = -1,105\ln(x) + 17,075$	0,36050	$y = 0,722x^2 - 3,0525x + 19,414$	0,41310	$y = 17,066x^{-0,067}$	0,34920
E6-x	$y = 19,911e^{-0,096x}$	0,29350	$y = -1,5651x + 19,646$	0,28510	$y = -2,055\ln(x) + 18,014$	0,25740	$y = -3,8303x^2 + 9,6581x + 12,343$	0,41190	$y = 18,005x^{-0,126}$	0,26300
E7-x	$y = 19,007e^{-0,019x}$	0,13190	$y = -0,3578x + 19,005$	0,13240	$y = -0,535\ln(x) + 18,677$	0,14620	$y = 1,691x^2 - 5,2525x + 22,449$	0,24490	$y = 18,675x^{-0,029}$	0,14580
E8-x	$y = 17,448e^{-0,014x}$	0,08320	$y = -0,2464x + 17,447$	0,08380	$y = -0,358\ln(x) + 17,202$	0,12030	$y = 2,2058x^2 - 5,9134x + 20,68$	0,53620	$y = 17,199x^{-0,021}$	0,11970
M2-x	$y = 17,926e^{-0,122x}$	0,11480	$y = -2,0797x + 18,169$	0,14420	$y = -3,442\ln(x) + 16,264$	0,23330	$y = 7,046x^2 - 22,069x + 31,235$	0,52480	$y = 16,052x^{-0,208}$	0,19660
M3-x	$y = 16,978e^{-0,052x}$	0,04380	$y = -0,7787x + 16,926$	0,04400	$y = -1,293\ln(x) + 16,25$	0,06260	$y = 6,9124x^2 - 20,642x + 30,566$	0,27310	$y = 16,234x^{0,085}$	0,06200
M4-x	$y = 13,761e^{0,0638x}$	0,03870	$y = 0,8781x + 13,98$	0,03210	$y = 1,0592\ln(x) + 14,907$	0,01530	$y = 8,2087x^2 - 29,17x + 39,077$	0,30060	$y = 14,701x^{0,0804}$	0,02010
M5-x	$y = 15,253e^{0,0442x}$	0,03510	$y = 0,6346x + 15,365$	0,02840	$y = 0,9683\ln(x) + 15,952$	0,03710	$y = -18,93x^2 + 52,04x - 18,147$	0,36600	$y = 15,893x^{0,0665}$	0,04450
M6-x	$y = 15,583e^{0,0091x}$	0,00060	$y = 0,0464x + 15,763$	0,00007	$y = -0,268\ln(x) + 15,913$	0,00140	$y = 13,722x^2 - 36,895x + 39,983$	0,28520	$y = 15,831x^{-0,01}$	0,00040
M7-x	$y = 18,8e^{-0,015x}$	0,64110	$y = -0,2761x + 18,796$	0,64430	$y = -0,329\ln(x) + 18,5$	0,60290	$y = -1,5287x^2 + 3,6717x + 16,559$	0,99780	$y = 18,499x^{-0,018}$	0,59960
M8-x	$y = 19,278e^{-0,075x}$	0,21030	$y = -1,3118x + 19,235$	0,22410	$y = -2,484\ln(x) + 18,252$	0,27060	$y = 5,9399x^2 - 22,39x + 36,94$	0,54400	$y = 18,228x^{-0,142}$	0,25540
	Média	0,14490	Média	0,14630	Média	0,15892	Média	0,40361	Média	0,15793

Fonte: O autor

