

Eduardo Schneid

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO ÂNGULO DA GRÃ
NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da U-
niversidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Poliana Dias de
Moraes

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schneid, Eduardo
Influência da temperatura e do ângulo da grã na
resistência ao embutimento da madeira / Eduardo
Schneid ; orientadora, Poliana Dias de Moraes, 2017.
149 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. embutimento. 3. fatores
de modificação. 4. temperatura. 5. inclinação da grã.
I. Dias de Moraes, Poliana. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

Eduardo Schneid

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO ÂNGULO DA GRÃ
NA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de “Doutor em Engenharia Civil”, e aprovado em sua forma final pelo Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 30 de agosto de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Prof.^a Poliana Dias de Moraes, Dr.^a Orientadora

Banca Examinadora:

Prof. Francisco Antonio Rocco Lahr, Dr. (videoconferência) - USP
EESC

Prof. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, Dr. - UFMG PosEES

Prof. Altevir Castro dos Santos, Dr. - Unioeste

Prof.^a Ângela do Valle, Dr.^a - UFSC Pós-arq

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Dr. - UFSC PPGEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas bênçãos recebidas e por me dar forças para não desistir deste trabalho.

Aos meus pais, Paulo e Carmem, às minhas irmãs Geovana e Tatiana que, mesmo com a distância, estiveram sempre muito próximos e dando apoio para continuar e concluir essa etapa na minha formação.

À Prof.^a Poliana Dias de Moraes, por ser uma excelente orientadora, além da amizade, paciência e disponibilidade em todas as etapas do trabalho.

À Prof.^a Ângela do Valle, pela amizade, ajuda e agradável convivência no GIEM.

À minha namorada Amanda, pelo apoio e compreensão em muitos momentos difíceis durante a realização do trabalho.

À minha amiga e colega de Pós-Graduação, Carolina Coelho da Rosa, pela amizade, ajuda valiosa e mútua no desenvolvimento de pesquisas, disponibilidade e colaboração na realização deste trabalho.

A Ivan Ribas, técnico do LEE, pela dedicação e solícita ajuda nas tarefas diárias no laboratório e, sobretudo, pela amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica: Marcelo, Lucas, Paulo, Maria Carolina e aos demais bolsistas pela cooperação, amizade e convivência durante muitos anos no GIEM.

Ao Prof. Jackson Roberto Eleotério e à FURB, por contribuir para a realização do trabalho durante a etapa de secagem das peças de madeira.

Ao meu tio Elizeu (*in memoriam*), que sempre apoiou a minha trajetória acadêmica.

À Capes e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudos e pelo financiamento dos equipamentos para esta pesquisa.

RESUMO

A resistência ao embutimento da madeira é um dos parâmetros usados para avaliar a capacidade de carga das ligações em estruturas de madeira. Em condições normais e nas direções paralela e perpendicular à grã, a determinação experimental dessa propriedade é realizada a 20 °C e 12% de teor de umidade. Contudo, a resistência ao embutimento sofre modificação quando submetida a temperaturas elevadas, umidade e diferentes ângulos de inclinação entre o esforço e a grã da madeira. Dessa forma, os objetivos desta pesquisa são: avaliar o efeito da temperatura e do ângulo da grã na resistência e o coeficiente inicial de rigidez ao embutimento da madeira; propor uma metodologia de testes de embutimento a temperaturas elevadas e um modelo matemático para representar a modificação da resistência ao embutimento como uma função contínua da temperatura e do ângulo da grã, para que possa ser usada na modelagem de ligações de madeira. Os testes de embutimento foram realizados com uma amostra de 1400 corpos de prova, de duas espécies de madeira (*Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*), divididos em 10 níveis de temperatura entre 25 e 180 °C e 7 ângulos de inclinação da grã entre 0 e 90°. Foi realizada uma avaliação das metodologias de determinação da força de embutimento descritas nas normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 e definiu-se a metodologia para determinar a resistência ao embutimento. Esses resultados permitiram analisar a influência da temperatura e do ângulo da grã no embutimento da madeira, além de determinar os fatores de modificação da resistência ao embutimento característica. Os resultados mostram que a temperatura e o ângulo de inclinação da grã influenciaram os tipos de falhas, as resistências e o coeficiente inicial de rigidez de embutimento. Por meio da análise de regressão, foram definidas equações contínuas para expressar os fatores de modificação em função da temperatura e do ângulo da grã. Os resultados foram satisfatórios para as duas espécies estudadas e essas equações podem ser utilizadas em modelos numéricos para prever a capacidade de cargas das ligações em madeira.

Palavras-chave: embutimento; fatores de modificação; ligações em madeira, temperatura, inclinação da grã.

ABSTRACT

The wood embedding strength is a parameter used to assess the load-bearing capacity for design of bolted connections. In normal conditions, the experimental procedure of this property is determined at 20 °C, 12% moisture content and parallel and perpendicular to the grain. However, the embedding strength is modified when subjected to different temperature, moisture content and slope angles between the stress and the grain of the wood. Therefore, the objective this research are: to evaluate the effect of the temperature and grain angle on the wood embedding strength; propose a methodology for embedding strength at high temperatures and to propose reduction factor of this property as a continuous function of the grain angle and the temperature, which can be used in modeling of timber bolted connections. The embedding tests were carried with a sample composed of 1400 test specimens, divided into 2 species (*Pinus elliottii* and *Eucalyptus saligna*), 10 temperatures in the range from 25 to 180 ° C and 7 grain angles between 0 and 90°. An evaluation was made of the method of determination of embedding force described in ASTM D5764-97a and EN 383: 2007 and the methodology to determine the embedding strength. These results allow the evaluation of the influence to the temperature and grain angle on the wood embedding, besides to determined the characteristic reduction factors. The results show that the temperature and grain angle influenced the types of failure, the embedding strength and the foundation values. By regression analysis, reduction factor equation of the values of the reduction factors were defined as a function of temperature and grain angle. The results were satisfactory for two species and the reduction factor equation can be used in numerical models to predict the load capacity of timber connections.

Keywords: embedding, reduction factor, bolted timber joints, temperature, grain angle.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO GERAL	23
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	25
2.1	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS POLÍMEROS DA MADEIRA	25
2.1.1	Celulose	26
2.1.2	Hemicelulose	27
2.1.3	Lignina.....	28
2.1.4	Conclusões parciais.....	29
2.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	29
2.3	INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DA GRÃ NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	34
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA	35
2.4.1	Espécie.....	36
2.4.2	Massa específica	37
2.4.3	Teor de umidade	37
2.4.4	Inclinação da grã.....	38
2.4.5	Temperatura.....	46
2.4.6	Diâmetro do elemento da ligação.....	50
2.4.7	Conclusões parciais.....	50
2.5	NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO COEFICIENTE DE RIGIDEZ AO EMBUTIMENTO	51
2.5.1	Velocidade de aplicação da força.....	51
2.5.2	Corpos de prova.....	54
2.5.3	Coefficiente de rigidez de embutimento.....	55
2.5.4	Determinação da força de embutimento.....	55
2.5.5	Resistência ao embutimento teórica.....	56
2.5.6	Conclusões parciais.....	57
3	MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1	MATERIAL	59
3.2	AMOSTRA E CORPOS DE PROVA PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA	60
3.3	TESTES DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	62
3.4	AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	63
3.5	DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE EMBUTIMENTO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	65

3.5.1	Critério da norma ASTM D5764-97a	65
3.5.2	Critério da norma EN 383:2007	66
3.6	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	66
3.7	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO MÉDIA	67
3.8	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA	67
3.9	FATORES DE MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA	67
3.10	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO TEÓRICA	68
3.11	COEFICIENTE DE RIGIDEZ DE EMBUTIMENTO INICIAL	68
3.12	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	69
3.13	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12% DE UMIDADE 69	
3.14	ANÁLISE ESTATÍSTICA	70
3.14.1	Análise de variância (ANOVA)	70
3.14.2	Teste Kruskal-Wallis	71
3.14.3	Teste de pairing	71
3.14.4	Regressão polinomial	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS PARA DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DOS TESTES DE EMBUTIMENTO	73
4.1.1	Tamanho da amostra	73
4.1.2	Dimensões dos corpos de prova	76
4.1.3	Tempo de aquecimento dos corpos de prova	76
4.1.4	Resistência ao embutimento média	77
4.1.5	Resistência ao embutimento característica	82
4.1.6	Deslocamento do pino	85
4.1.7	Fatores de modificação	87
4.1.8	Conclusão da avaliação da metodologia	89
4.1.9	Etapas para determinação da resistência ao embutimento da madeira submetidas às altas temperaturas e com diferentes ângulos da grã 89	
4.2	TEOR DE UMIDADE	91
4.3	CURVAS FORÇA × DESLOCAMENTO DOS TESTES DE EMBUTIMENTO	94
4.4	TIPOS DE FALHAS	97
4.5	ADERÊNCIA ENTRE AS RESISTÊNCIAS AO EMBUTIMENTO EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS	100
4.6	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS RESISTÊNCIAS AO EMBUTIMENTO 101	
4.7	MODELO DE HANKINSON PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO AJUSTADO PARA TEMPERATURAS ENTRE 25 E 180 °C	105
4.8	VALORES DAS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS AO EMBUTIMENTO ..	109

4.9	FATORES DE MODIFICAÇÃO PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E ÂNGULO DA GRÃ.....	110
4.9.1	Fatores de modificação para o <i>Pinus elliottii</i>	111
4.9.2	Fatores de modificação para o <i>Eucalyptus saligna</i>	115
4.10	COEFICIENTE DE RIGIDEZ DE EMBUTIMENTO INICIAL.....	119
5	CONCLUSÕES.....	121
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
7	APÊNDICES	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas de degradação dos polímeros da madeira. Fonte: Sundqvist, 2004.....	26
Figura 2. Temperatura de transição vítrea em função do teor de umidade: (a) hemicelulose e lignina; (b) madeira. Fonte: modificado de Irvine (1984).....	29
Figura 3. Efeito da temperatura e do teor de umidade nas propriedades mecânica: (a) resistência à compressão paralela, (b) módulo de elasticidade e (c) módulo de ruptura. Fonte: modificado de Wood Handbook (2010).	32
Figura 4. Resistência à compressão paralela à grã de madeira de balsa. Fonte: modificado de Goodrich <i>et al.</i> (2010).....	33
Figura 5. Resistência ao embutimento de madeiras de diferentes espécies. Fonte: Modificado de Sandhaas <i>et al.</i> (2010).	36
Figura 6. Relação entre resistência ao embutimento e teor de umidade. Fonte: modificado de Rammer e Winistorfer (2001).	38
Figura 7. Redução teórica da resistência do embutimento em função do ângulo de inclinação da grã. Fonte: autor.....	39
Figura 8. Resistência ao embutimento em função da grã da madeira. Fonte: autor.....	41
Figura 9. Resistência ao embutimento Fonte: modificado de Pedersen, 2002.	42
Figura 10. Curvas força × deslocamento de embutimento para diferentes ângulos entre a força e a grã da madeira. Fonte: modificado de Quenville (2010).	42
Figura 11. Formas de ruptura dos corpos de prova. Fonte: Pedersen, 2002.	44
Figura 12. Deformações em corpos de prova de ensaio de embutimento inclinado em relação às fibras da madeira. Fonte: modificado de Bleron e Duchanois, 2006.	44
Figura 13. Deformações do furo em testes de embutimento com corpos de prova de LVL. Fonte: modificado de Schweigler <i>et al.</i> , 2016.	45
Figura 14. Fatores de redução das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular para diferentes espécies e tipos de ligadores. Fonte: autor.....	47
Figura 15. Curvas força × deslocamento de testes de embutimento paralelo em função da temperatura. Fonte: modificado de Moraes, 2003.	48
Figura 16. Falhas por embutimento em função da temperatura. Fonte: modificado de Manriquez, 2012.	49
Figura 17. Falhas por fendilhamento no embutimento paralelo. Fonte: modificado de Manriquez, 2012.	49
Figura 18. Resistências ao embutimento paralelo e perpendicular à grã da madeira. Fonte: autor.....	57
Figura 19. Parafuso de rosca parcial usado nos testes de embutimento. Fonte: autor.....	59
Figura 20. Vista frontal dos corpos de prova de embutimento com indicação inclinação da grã por seta: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75°, (g)	

90°. Vista lateral do corpo de prova (h). F é a força aplicada. Dimensões são em mm.	62
Figura 21. Aparato do ensaio de embutimento: (a) suporte; (b) corpo de prova; (c) pino metálico; (d) prato de compressão.	63
Figura 22. Força de embutimento de acordo com a norma ASTM D5764-97a e o seu respectivo deslocamento. Fonte: autor.	65
Figura 23. Força de embutimento de acordo com a norma EN 383:2007 e o seu respectivo deslocamento. Fonte: autor.	66
Figura 24. Coeficiente de rigidez de embutimento inicial. Fonte: autor.	69
Figura 25. Resistências ao embutimento médias determinadas seguindo as recomendações das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o <i>Pinus elliottii</i>	78
Figura 26. Resistências ao embutimento médias determinadas seguindo as recomendações das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o <i>Eucalyptus saligna</i>	79
Figura 27. Resistências ao embutimento características para o <i>Pinus elliottii</i>	83
Figura 28. Resistências ao embutimento características para o <i>Eucalyptus saligna</i>	84
Figura 29. Deslocamento médio do pino na força de embutimento.	86
Figura 30. Fatores de modificação em função da temperatura e do ângulo da grã.	88
Figura 31. Teor de umidade dos corpos de prova de <i>Pinus elliottii</i>	93
Figura 32. Teor de umidade dos corpos de prova de <i>Eucalyptus saligna</i>	93
Figura 33. Curvas médias força × deslocamento dos testes de embutimento em cada ângulo da grã e temperatura de <i>Pinus elliottii</i>	96
Figura 34. Curvas médias força × deslocamento dos testes de embutimento em cada ângulo da grã e temperatura de <i>Eucalyptus saligna</i>	96
Figura 35. Falhas por esmagamento do <i>Pinus elliottii</i>	97
Figura 36. Falhas por fendilhamento do <i>Pinus elliottii</i>	97
Figura 37. Falhas por esmagamento do <i>Eucalyptus saligna</i>	98
Figura 38. Falhas por fendilhamento do <i>Eucalyptus saligna</i>	98
Figura 39. Resistência ao embutimento experimental e teóricas de acordo com as normas: (a) <i>Pinus elliottii</i> e (b) <i>Eucalyptus saligna</i>	101
Figura 40. Resistências ao embutimento experimental e estimada pela equação de Hankinson para o <i>Pinus elliottii</i>	107
Figura 41. Resistências ao embutimento experimental e estimada pela equação de Hankinson para o <i>Eucalyptus saligna</i>	108
Figura 42. Gráficos dos fatores de modificação característicos do <i>Pinus elliottii</i> : (a) valores experimentais e (b) valores estimados.	114
Figura 43. Gráficos dos fatores de modificação característicos do <i>Eucalyptus saligna</i> : (a) valores experimentais e (b) valores estimados.	118
Figura 44. Coeficientes de rigidez de embutimento inicial em função da temperatura: (a) <i>Pinus elliottii</i> e (b) <i>Eucalyptus saligna</i>	120

Figura 45. Coeficientes de rigidez de embutimento inicial em função do ângulo da grã: (a) <i>Pinus elliottii</i> e (b) <i>Eucalyptus saligna</i>	120
Figura 46. Instrumentação para a medição da temperatura: (a) corpo de prova; (b) termopar.	135
Figura 47. Tempo de aquecimento dos corpos de prova <i>Pinus elliottii</i>	136
Figura 48. Tempo de aquecimento dos corpos de prova <i>Eucalyptus saligna</i> . .	136
Figura 49. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento paralelo do <i>Pinus elliottii</i>	138
Figura 50. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento paralelo do <i>Eucalyptus saligna</i>	138
Figura 51. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 15° do <i>Pinus elliottii</i>	139
Figura 52. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 15° do <i>Eucalyptus saligna</i>	139
Figura 53. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 30° do <i>Pinus elliottii</i>	140
Figura 54. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 30° do <i>Eucalyptus saligna</i>	140
Figura 55. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 45° do <i>Pinus elliottii</i>	141
Figura 56. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 45° do <i>Eucalyptus saligna</i>	141
Figura 57. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 60° do <i>Pinus elliottii</i>	142
Figura 58. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 60° do <i>Eucalyptus saligna</i>	142
Figura 59. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 75° do <i>Pinus elliottii</i>	143
Figura 60. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 75° do <i>Eucalyptus saligna</i>	143
Figura 61. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento perpendicular do <i>Pinus elliottii</i>	144
Figura 62. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento perpendicular do <i>Eucalyptus saligna</i>	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Constituintes da madeira.	25
Tabela 2. Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira em diferentes condições de umidade.	31
Tabela 3. Parâmetros para estimar as propriedades mecânicas da madeira com inclinação da grã.	35
Tabela 4. Equações para estimação da resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira.	40
Tabela 5. Parâmetros das normas para determinação da resistência ao embutimento.	52
Tabela 6. Massas específicas aparentes do <i>Pinus elliottii</i> .a 12% de umidade... 60	60
Tabela 7. Massas específicas aparentes do <i>Eucalyptus saligna</i> a 12% umidade.	61
Tabela 8. Tempo de aquecimento dos corpos de prova.	64
Tabela 9. Níveis de confiança das amostras de <i>Pinus elliottii</i>	75
Tabela 10. Níveis de confiança das amostras de <i>Eucalyptus saligna</i>	75
Tabela 11. Tamanho necessário da amostra para o nível de confiança de 95%. 76	76
Tabela 12. Teste de comparação de médias das resistências ao embutimento obtidos segundo os critérios da ASTM D5764-97a e da EN 383:2007 para o <i>Pinus elliottii</i>	80
Tabela 13. Teste de comparação de médias das resistências ao embutimento obtidos pelos critérios da ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o <i>Eucalyptus saligna</i>	81
Tabela 14. Quantidade de corpos de prova fendilhados de <i>Pinus elliottii</i>	99
Tabela 15. Quantidade de corpos de prova de <i>Eucalyptus saligna</i> com falha por fendilhamento.	100
Tabela 16. Valores das resistências ao embutimento médias, desvios padrão e teste de comparação das médias.	104
Tabela 17. Temperaturas de ocorrência de resistências ao embutimento mínimas.	105
Tabela 18. Resultado do teste de <i>pairing</i> para o expoente “n” dos termos trigonométricos da equação de Hankinson para o <i>Pinus elliottii</i>	106
Tabela 19. Resultado do teste de <i>pairing</i> para o expoente “n” dos termos trigonométricos da equação de Hankinson para o <i>Eucalyptus saligna</i>	106
Tabela 20. Resistências características ao embutimento do <i>Pinus elliottii</i>	109
Tabela 21. Resistências características ao embutimento do <i>Eucalyptus saligna</i>	110
Tabela 22. ANOVA do modelo de regressão para o fator de modificação da resistência paralelo do <i>Pinus elliottii</i> em função da temperatura.	111
Tabela 23. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo do <i>Pinus elliottii</i> em função da temperatura.	112
Tabela 24. ANOVA do modelo de regressão do fator de modificação da resistência perpendicular do <i>Pinus elliottii</i> em função da temperatura.	112

Tabela 25. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular do <i>Pinus elliottii</i> em função da temperatura.	113
Tabela 26. Erro relativo percentual dos faotres de modificação característicos do <i>Pinus elliottii</i>	115
Tabela 27. ANOVA do modelo de regressão para o fator de modificação da resistência paralelo do <i>Eucalyptus salign</i> em função da temperatura.	116
Tabela 28. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo em função da temperatura do <i>Eucalyptus saligna</i>	116
Tabela 29. ANOVA do modelo de regressão do fator de modificação da resistência perpendicular do <i>Eucalyptus saligna</i> em função da temperatura. ...	117
Tabela 30. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular do <i>Eucalyptus saligna</i> em função da temperatura.	117
Tabela 31. Erro relativo percentual dos fatores de modificação característicos do <i>Eucalyptus saligna</i>	119
Tabela 32. Dados utilizados para calcular o tamanho da amostra dos ensaios de resistência ao embutimento.	133
Tabela 33. Coeficientes de rigidez de embutimento médio e os desvios-padrão.	145
Tabela 34. Coeficientes de modificação característicos para as espécies <i>Pinus elliottii</i> e <i>Eucalyptus saligna</i>	146

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ACR	Associação Catarinense de Empresas Florestais
ANOVA	Análise de Variância
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWC	American Wood Council
DSC	Calometria Exploratória Diferencial
EN	Norma Europeia
IBA	Indústria Brasileira de Árvores
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
NCh	Norma Chilena
NDS	National Desing Specification
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
TG/DTG	Termogravimétrica Derivada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ângulo de inclinação da grã da madeira
α_e	coeficiente dado pela norma ABNT NBR 7190:1997
$k_{e,\alpha\theta}$	coeficiente de modificação de embutimento
s_D	desvio- padrão da amostra
D	diâmetro do parafuso
T	espessura do corpo de prova
\bar{d}	estimativa das médias dos desvios-padrão
\exists	existe diferença estatística
F_e	força de embutimento
$F_{máx}$	força máxima de embutimento
$m_{12\%}$	massa a 12% de umidade
$\rho_{12\%}$	massa específica aparente a 12% de umidade da madeira
ρ_k	massa específica característica da madeira
M_s	massa seca
U_m	massa úmida
μ_D	média dos desvios-padrão
\nexists	não existe diferença estatística
B	parâmetro de regressão
k_{90}	parâmetro determinado a partir da relação entre a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras
$f_{c,0}$	resistência à compressão paralela às fibras
f_e	resistência ao embutimento
$f_{e,15}$	resistência ao embutimento a 15°
$f_{e,30}$	resistência ao embutimento a 30°
$f_{e,45}$	resistência ao embutimento a 45°
$f_{e,60}$	resistência ao embutimento a 60°
$f_{e,75}$	resistência ao embutimento a 75°
$f_{e,0}$	resistência ao embutimento paralelo às fibras
$f_{h,0}$	resistência ao embutimento paralelo às fibras
$f_{e,90}$	resistência ao embutimento perpendicular às fibras
$f_{h,90}$	resistência ao embutimento perpendicular às fibras
K_i	coeficiente inicial de rigidez de embutimento inicial
K_s	coeficiente modificado de rigidez de embutimento modificado
N	tamanho da amostra
Θ	Temperatura
$T.U.$	teor de umidade
$t_{\alpha/2,n-1}$	valor estatístico t para n-1 graus de liberdade
$v_{12\%}$	volume a 12% de umidade

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em madeira normalmente requerem ligações entre seus elementos e devem ser dimensionadas de modo a atender às solicitações impostas e garantindo a segurança. Os elementos estruturais podem ser unidos por meio de pinos metálicos, pregos, parafusos auto-atarraxantes, cavilhas, anéis metálicos e adesivos. A presente pesquisa limita-se ao uso de pinos metálicos como elementos de conexão.

A resistência ao embutimento da madeira é um dos parâmetros para avaliar a capacidade de carga das ligações aparafusadas em estruturas de madeira. Em condições normais, as resistências ao embutimento, paralela (0°) e perpendicular (90°) à grã ou às fibras da madeira, são determinadas a 20°C e 12% de teor de umidade. No entanto, alguns estudos mostraram que a resistência ao embutimento e a capacidade de carga das ligações diminuem quando submetidas à altas temperaturas (MORAES, ROGAUNNE *et al.*, 2005; MANRIQUEZ e MORAES, 2008; MANRIQUEZ, 2012). Outros trabalhos abordam o efeito da temperatura sobre as ligações em estruturas de madeira submetidas a situações de incêndio e quando o material encontra-se em processo de carbonização (AUSTRUY, 2007; MOSS, BUCHANAN *et al.*, 2009; CACHIM e FRASSEN, 2009; RACHER, LAPLANCHE *et al.*, 2010; MARAVEAS, MIAMIS e MATTHAIYOU, 2013; AUDEBERT, DHIMA *et al.*, 2013; KHELIFA, A.KHENNANE *et al.*, 2014; AUDEBERT, DHIMA *et al.*, 2014). Essas pesquisas relatam que a capacidade resistente das ligações diminui com o aumento da temperatura e com o tempo de exposição da madeira ao fogo.

Algumas normas para projetos de estruturas de madeira consideram a redução de algumas propriedades mecânicas em função do aumento da temperatura (ANSI/AWC NDS-2015; NCh 1198:2006; EN 1995-1-2:2004). As normas ANSI/AWC NDS-2015 e NCh 1198:2006 recomendam reduções somente abaixo de 70°C , enquanto a norma EN 1995-1-2:2004 sugere fatores de redução, somente para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade à compressão paralela para madeiras de coníferas, abaixo de 300°C . Já a norma ABNT NBR 7190:1997 não apresenta valores de redução das propriedades mecânicas em função do aumento da temperatura.

Os procedimentos experimentais para a determinação das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular à grã da madeira são descritos em normas como a ABNT NBR 7190:1997, a ASTM D5764-97a e a EN 383:2007. A equação de Hankinson é usada para estimar a resistência ao embutimento inclinada em relação a grã, sendo isto des-

crito nas normas ABNT NBR 7190:1997, EN 1995-1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015. Como esta equação foi inicialmente desenvolvida para a temperatura ambiente, o comportamento da resistência de embutimento em outras temperaturas, combinado a diferentes ângulos da grã é desconhecido. Alguns trabalhos propõem modelos para estimação da resistência mecânica inclinada em relação à grã em temperatura ambiente (KARLSEN, 1967; SZÜCS, 1992; LOGSDON e FINGER, 2010, WHALE, SMITH e HILSON, 1986; EHLBECK e WERNER, 1992; BLERON e DUCHANOIS, 2006; HUBNER, BOGENSPERGER e SCHICKHOFER, 2008; FRANKE e QUENNEVILLE, 2010). Porém os autores divergem quanto aos resultados encontrados, sendo necessários estudos adicionais sobre o assunto para dirimir essas questões.

Em ligações aparafusadas submetidas à flexão, por exemplo, a direção dos esforços nos parafusos varia em relação à grã da madeira. Para estimar a capacidade de carga da ligação, a resistência ao embutimento deve ser considerada como função da direção de carga de acordo com o ângulo da grã (RACHER, 1996). A capacidade de carga da ligação em estruturas de madeira é estimada pelo modelo matemático de uma viga apoiada em uma fundação elástica, formulado por Johansen (JOHANSEN, 1949) ou pelo método dos elementos finitos (PATTON-MALLORY, 1996; MOSES, 2000; KHAROUF, 2001; CHEN; JENG, 2003). No modelo de Johansen, a teoria da análise de limites define a capacidade de suporte de carga de um único elemento de conexão, na qual é considerado comportamento plástico ideal para o aço e para a madeira, supondo-se o pino como rígido-plástico. Nesta teoria, o nível de tensão da falha na madeira é representado pela resistência ao embutimento, enquanto que, em muitos modelos com base em elementos finitos, a resistência à compressão da madeira é usada como parâmetro de falha (HONG; BARRET, 2008). No entanto, o comportamento da madeira em compressão difere da situação de embutimento, devido às tensões na zona de contato entre a madeira e o parafuso.

À temperatura ambiente, a capacidade de carga das ligações pode ser estimada, por exemplo, conforme a norma EN 1995-1-1:2004. Já em situações de incêndio, ela pode ser estimada segundo a norma EN 1995-1-2:2004 ou por meio de modelagens de ligações disponíveis na literatura (CACHIM; FRANSSEN, 2009; RACHER *et al*, 2010; AUDEBERT *et al*, 2013; AUDEBERT *et al*, 2014; KHELIFA *et al*, 2014). Porém, as normas e as modelagens existentes podem não considerar as modificações que a madeira sofre em suas propriedades mecânicas em temperaturas inferiores às de sua carbonização (300 °C). As modelagens de ligações em estruturas de madeira podem ser otimizadas se forem

considerados os efeitos das temperaturas elevadas e do ângulo entre a força e a grã da madeira na resistência ao embutimento.

No presente trabalho, busca-se uma função contínua que descreva o comportamento da resistência ao embutimento da madeira em situações de temperaturas elevadas e com diferentes ângulos da grã em relação a força, podendo ser utilizado em modelos avançados de ligações em estruturas de madeira.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito da temperatura e do ângulo entre a direção da força e a grã da madeira na resistência ao embutimento, entre as temperaturas de 25 e 180 °C, e propor fatores de modificação da resistência ao embutimento como uma função contínua da temperatura e do ângulo entre a direção da força e a grã, a qual possa ser usada na modelagem de ligações aparafusadas de madeira de *Pinus elliotii* e de *Eucalyptus saligna* com idade aproximada de 13 anos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) propor uma metodologia para a realização de testes para a determinação da resistência ao embutimento da madeira entre 25 e 180 °C e com ângulos de 0 e 90° entre a força e a grã da madeira;
- b) avaliar a influência da temperatura e do ângulo entre a direção da força e a grã da madeira na resistência ao embutimento;
- c) obter fatores de modificação da resistência ao embutimento em função da temperatura e do ângulo entre a direção da força e a grã da madeira;
- d) propor modelos matemáticos preliminares para os fatores de modificação da resistência ao embutimento para madeira de coníferas e folhosas com idades de aproximadamente 13 anos, os quais possam ser usados na modelagem de ligações em estruturas de madeira que utilizam pino metálico de 10 mm de diâmetro;
- e) avaliar a influência temperatura e do ângulo entre a direção da força e a grã da madeira no coeficiente inicial de rigidez de embutimento.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A tese está dividida em capítulos, os quais são: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e métodos, Resultados e discussão, Conclusões e sugestões para trabalhos futuros, Referências bibliográficas e Apêndices.

O capítulo Revisão Bibliográfica aborda informações sobre a influência da temperatura nos polímeros da madeira e nas propriedades mecânicas da madeira; a influência do ângulo da grã nas propriedades mecânicas da madeira; os fatores que influenciam a resistência ao embutimento da madeira e as normas para determinação da resistência ao embutimento. Essa unidade permitiu verificar as lacunas presentes no tema da tese, buscando-se assim o ineditismo da pesquisa.

O próximo capítulo apresenta os materiais e os métodos que foram utilizados para a avaliação da influência da temperatura e do ângulo entre a força e a grã da madeira na resistência e no coeficiente inicial de rigidez ao embutimento. Os procedimentos utilizados permitiram determinar as resistências ao embutimento média e característica, fatores de modificação da resistência ao embutimento característica e o coeficiente inicial de rigidez de embutimento. Por meio da análise estatística dos dados foi possível avaliar a influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento e no coeficiente inicial de rigidez ao embutimento, além de propor modelos matemáticos para os fatores de modificação da resistência ao embutimento.

No capítulo de Resultados e discussão, inicialmente, é apresentada uma proposta de metodologia para a determinação da resistência ao embutimento da madeira para temperaturas elevadas e diferentes ângulos de inclinação da grã. Após, são apresentados e discutidos os seguintes resultados: teor de umidade da madeira; tipos de falhas e do comportamento das curvas força \times deslocamento durante os ensaios de embutimento; aderência entre os valores experimentais e teóricos da resistência ao embutimento; influência da temperatura na resistência ao embutimento da madeira em cada ângulo da grã; os valores de resistência ao embutimento característica; a influência da temperatura e do ângulo da grã no coeficiente inicial de rigidez de embutimento; os modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos fatores de modificação da resistência ao embutimento característica em função da temperatura e do ângulo da grã para madeira de conífera e folhosa.

Por último são apresentadas as conclusões obtidos por meio dos resultados e as propostas de trabalhos futuros a serem desenvolvidos a partir da presente pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nesta seção serão abordados os assuntos relacionados à influência da temperatura nos polímeros e nas propriedades mecânicas da madeira; os fatores que influenciam a resistência ao embutimento da madeira e as normas que regulamentam a realização de testes para a determinação da resistência ao embutimento.

2.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS POLÍMEROS DA MADEIRA

A madeira é constituída, do ponto de vista macromolecular, por celulose, polioses ou hemiceluloses, lignina e extrativos (FENGEL e WEGENER, 1989). A proporção de cada constituinte apresenta variação segundo a origem da madeira: folhosas ou coníferas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Constituintes da madeira.

Constituinte	Coníferas	Folhosas
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Polioses ou hemiceluloses	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: Klock et al., 2003.

A degradação térmica da celulose, da lignina e da hemicelulose ocorre quando elas são expostas a altas temperaturas. Na Figura 1, observa-se que o primeiro polímero entre os que possuem função de sustentação estrutural na madeira, a hemicelulose é a primeira a sofrer fortes alterações químicas, seguida da celulose e da lignina. Essas alterações ocorrem a partir da temperatura de 160 °C. Adicionalmente, cada polímero apresenta uma velocidade de degradação diferente, sendo que a hemicelulose é degradada de forma mais rápida por ser mais instável, enquanto a celulose e a lignina possuem degradação mais lenta (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003). Logo, a estrutura química e os efeitos da temperatura em cada polímero da madeira serão apresentados nas próximas seções.

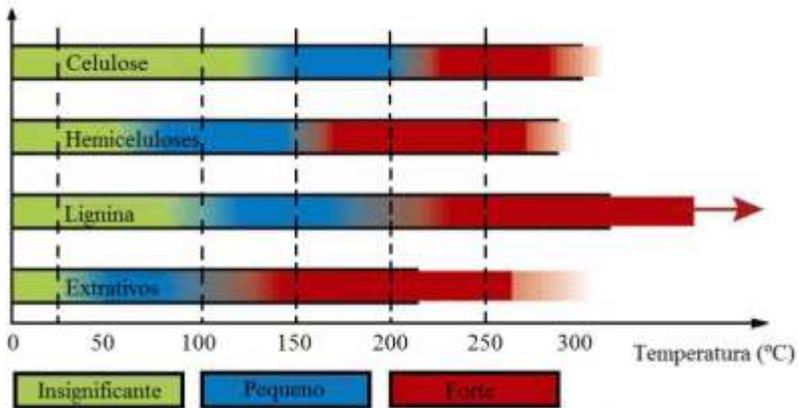


Figura 1. Temperaturas de degradação dos polímeros da madeira. Fonte: Sundqvist, 2004

2.1.1 Celulose

A celulose é o polímero que se encontra em maior quantidade na madeira, tanto para coníferas quanto para folhosas, conforme se observa na Tabela 1. Esse polímero é um polissacarídeo linear formado por unidades de monossacarídeos de B-D-glucose (FENGEL; WEGENER, 1989; MILLER, 1999).

A estrutura da celulose pode ser dividida em três níveis: o primeiro nível corresponde à estrutura primária da celulose, que é definida pelas ligações β -(1-4)-glicosídicas entre unidades de anidrogucose; o segundo nível é caracterizado pelas ligações de hidrogênio intramoleculares que conferem linearidade ao homopolímero, envolvendo, principalmente, o oxigênio hemiacetalico e a hidroxila ligada ao carbono C-3 da unidade D-glucopinanosídica vicinal; o terceiro nível define o grau de associação molecular entre várias cadeias lineares da celulose, envolvendo, ligações de hidrogênio intermoleculares, de natureza intraplanar ou interplanar, mantidas pela interação polar entre o oxigênio hemiacetalico e as hidroxilas ligadas aos carbonos C-3 e C-6 de unidades adjacentes (ATALLA, 1993; FENGEL; WEGENER, 1989).

O arranjo molecular da celulose possui estrutura semicristalina, ou seja, parte de seu arranjo é ordenado e regular, sendo mais dura e resistente (MORSING, 2000). Outra parte do seu arranjo passa a assumir uma disposição aleatória, que ocorre tanto na superfície de estruturas cristalinas quanto nas regiões que as interligam (FENGEL; WEGENER, 1989).

Com o aumento da temperatura, os polímeros semicristalinos (celulose) apresentam uma mudança de comportamento de vítreo para elástico (FPL, 2010, 19-1). Isso ocorre em temperatura específica, denominada de temperatura de transição vítrea, na qual ocorre um amolecimento dos polímeros presentes na madeira, reduzindo as resistências mecânicas desse material (BACK e SALMÉN, 1982; IRVINE, 1984). A temperatura de transição vítrea da celulose na condição seca se situa entre 200 °C e 250 °C (BACK e SALMÉN, 1982).

2.1.2 Hemicelulose

As hemiceluloses estão associadas à celulose na parede celular do tecido lenhoso. Elas são polissacarídeos de baixa massa molecular, sendo constituídas por, pelo menos, dois monossacarídeos denominados pentoses e hexoses. As pentoses e as hexoses são açúcares simples, cujas cadeias principais tem 5 e 6 átomos de carbonos, respectivamente. As hexoses presentes na hemicelulose são: glucoses, manose e galactose; e as pentoses são: xilose e arabinose.

A quantidade e os tipos de hemiceluloses variam entre coníferas e folhosas. Segundo Fengel e Wegener (1989), a madeira de folhosas tem maior quantidade de hemicelulose em relação às coníferas. Já os tipos de hemiceluloses nas coníferas são: galactan, arabinoglucuronoxilano e galactoglucomannan; e, nas folhosas, os tipos são: glucoronoxilanos e glucomannan (SJÖSTRÖM, 1993).

A hemicelulose possui um arranjo molecular amorfo, sendo mais quebradiça e rígida do que a celulose. Os polímeros com arranjo amorfo, em temperatura ambiente, tem um comportamento vítreo (FPL, 2010, p.19-1) e, com aumento da temperatura, passam a ter um comportamento plástico. Isso ocorre devido à temperatura de transição vítrea. Em condições secas, essa temperatura, para a hemicelulose, situa-se entre 150 e 220 °C. Para o teor de umidade igual ao ponto de saturação das fibras (PSF), a temperatura de transição vítrea é próxima a 50 °C (BACK e SALMÉN, 1982). Para madeira de *Pinus radiata*, Irvine (1984) obteve a temperatura de transição vítrea da hemicelulose igual a 120 e 68 °C a 6% e 15% de teor de umidade, respectivamente. Para a madeira de *Eucalyptus regnans*, a temperatura de transição vítrea foi de 118 °C, para o teor de umidade de 7%, e 62 °C, para o teor de umidade de 17% (IRVINE, 1984).

2.1.3 Lignina

O outro polímero da madeira, a lignina, é constituído por um sistema aromático compostos de unidades de fenil-propano e tem a função de ligação entre células. Sua estrutura macromolecular difere das apresentadas pela celulose e pela hemicelulose, formando uma estrutura resistente e conferindo rigidez e resistência à madeira. Esse polímero está sempre associado às hemiceluloses, não só por meio da interação física, como também por ligações covalentes (WINANDY; ROWELL, 2005; IPT, 1998).

A quantidade e a composição química da lignina diferem entre coníferas e folhosas (FENGEL; WEGENER 1989; SJÖSTRÖM, 1993). A lignina está presente, em maior quantidade, nas coníferas que nas folhosas, conforme pode ser observado na Tabela 1. Nas coníferas, a lignina é composta quimicamente por hidroxifenil e grupos fenólicos. Já nas folhosas, ela é composta por lignina guaiacyl e siringyl, além de grupos fenólicos (SJÖSTRÖM, 1993).

A lignina, assim como a hemicelulose e a celulose, também apresenta temperatura de transição vítrea, a qual é função do teor de umidade (Figura 2a). Segundo Back e Salmén (1982), em condições secas, a temperatura de transição vítrea da lignina situa-se entre 120 e 200 °C. Para o teor de umidade igual ao ponto de saturação das fibras, ela situa-se entre 60 e 90 °C. Os resultados obtidos por Irvine (1984) corroboram as informações mencionadas. Este autor obteve as temperaturas de transição vítrea da lignina para o *Eucalyptus regnans* igual a 138 e 45 °C a 0% de teor de umidade e acima do PSF, respectivamente (IRVINE, 1984).

A temperatura de transição vítrea de cada polímero influencia na transição vítrea da madeira. Segundo os resultados apresentados por Irvine (1984), a temperatura de transição vítrea para madeira de *Eucalyptus regnans*, para o teor de umidade de 6%, é de 115 °C, enquanto que, para o teor de umidade de 20%, a temperatura decresce para aproximadamente 60 °C (Figura 2b).

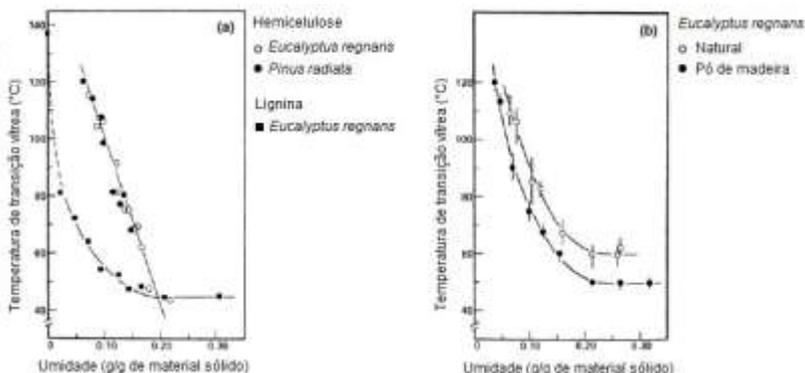


Figura 2. Temperatura de transição vítrea em função do teor de umidade: (a) hemicelulose e lignina; (b) madeira. Fonte: modificado de Irvine (1984).

2.1.4 Conclusões parciais

Os polímeros da madeira apresentam-se em diferentes proporções na madeira e possuem diferentes arranjos moleculares, temperaturas de degradação e temperatura de transição vítrea. O polímero em maior proporção na madeira é a celulose, seguido da lignina e hemicelulose, sendo que esses dois últimos apresentam variações em porcentagem entre coníferas e folhosas. O arranjo molecular da lignina e da hemicelulose é amorfo e da celulose é semicristalino. A temperatura de início de degradação de cada polímero da madeira é diferente. O primeiro polímero a sofrer degradação térmica é a hemicelulose. A temperatura de transição vítrea é diferente entre os polímeros e esses valores variam em função do teor de umidade. Portanto, as alterações nos polímeros causadas pelo aumento da temperatura podem influenciar na resistência mecânica da madeira.

2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A resistência mecânica da madeira normalmente diminui com o aumento da temperatura, sendo que a temperatura produz efeitos reversíveis e irreversíveis (GEHARDS, 1982; OSTMAN, 1985; THIAM, MILOTA e LEICHTI, 2002; BEKHTA e NIEMZ, 2003; FRÜHWALD, 2007; MANRIQUEZ, 2012; LLANA, IÑIGUEZ-GONZALEZ, *et al.*, 2013). Os efeitos são reversíveis quando a madeira é submetida por curtos períodos de tempo a temperaturas inferiores a 100 °C (FPL, 2010,

p. 5-36). Porém, quando a madeira é exposta a temperaturas superiores a 100 °C, eles se tornam irreversíveis (FPL, 2010, p. 5-36). A diminuição irreversível das propriedades mecânica é devida à perda de massa, a qual é resultado da despolimerização das hemiceluloses e à formação de monômeros de furfural durante a degradação térmica desse material (FPL, 1999; THIAM, MILOTA e LEICHTI, 2002).

A influência da temperatura nas propriedades da madeira também depende do teor de umidade da madeira durante o aquecimento, conforme se observa na Tabela 3. O efeito da variação da temperatura é mais acentuado em teores de umidade mais elevados, conforme ilustrado na Figura 3 (SCHAFFER, 1973; KNUDSON e SCHNIEWIND, 1975; GEHARDS, 1982; YOUNG e CLANCY, 2001; HANDBOOK, 2010, p5-36).

Tabela 2. Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira em diferentes condições de umidade.

Propriedade	Teor de umidade (%)	Modificação das propriedades mecânicas em relação à temperatura de 20 °C (%)	
		-50 °C	+50 °C
		Módulo de elasticidade paralela à grã	0 12 >PSF
Módulo de elasticidade perpendicular à grã	6 12 ≥20	- - -	-20 -35 -38
Módulo de elasticidade transversal	>PSF	-	-25
Resistência à flexão	≤4	18	-10
	11-15	35	-20
	18-20	60	-25
	≥PSF	110	-25
Resistência à tração paralela à grã	0-12	-	-4
Resistência à compressão paralela à grã	0	20	-10
	12-45	50	-25
Resistência ao cisalhamento paralela à grã	>PSF	-	-25
Resistência à tração perpendicular à grã	4-6	-	-10
	11-16	-	-20
	≥18	-	-30
Resistência à compressão perpendicular à grã no limite proporcional	0-6	-	-20
	≥10	-	-35

Fonte: modificado de GEHARDS, 1982.

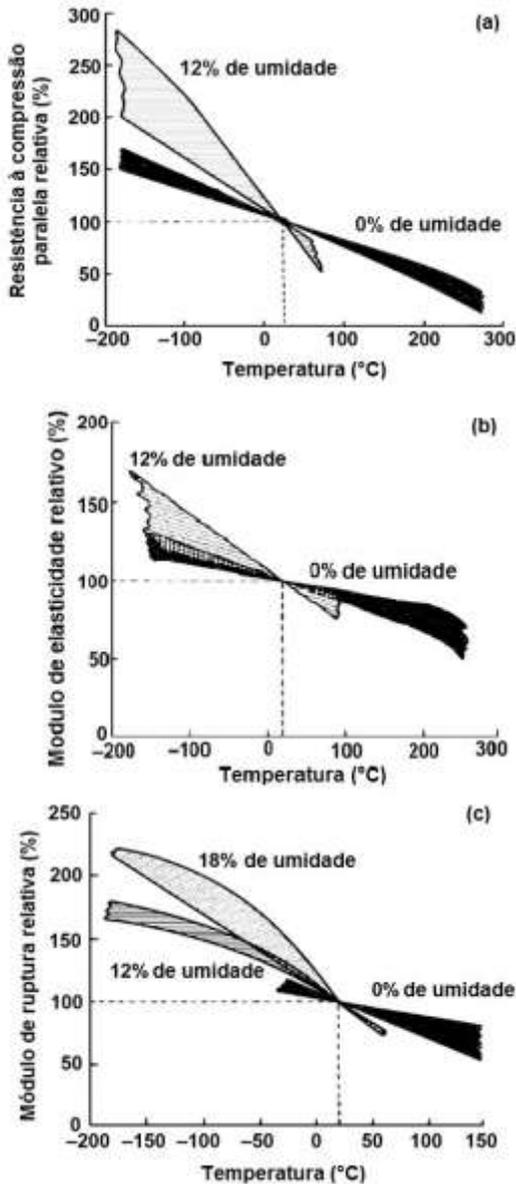


Figura 3. Efeito da temperatura e do teor de umidade nas propriedades mecânica: (a) resistência à compressão paralela, (b) módulo de elasticidade e (c) módulo de ruptura. Fonte: modificado de Wood Handbook (2010).

A madeira é um compósito natural constituído por fibras, as quais são formadas por polímeros. Esses polímeros sofrem influência da temperatura, a qual reflete nas propriedades mecânicas da madeira. Goodrich *et al.* (2010) mostraram que a resistência à compressão paralela à grã da madeira de balsa reduz com o aumento da temperatura. Essa redução é atribuída ao amolecimento da hemicelulose e da celulose devido a transformações de fase da transição vítrea. O amolecimento da hemicelulose começa em 50 °C e da celulose em 200 °C, conforme observado na Figura 4. Isso pode ter consequências em outras propriedades mecânicas, pois, dependendo do esforço ao qual a madeira é submetida, os polímeros que a constituem são solicitados de forma diferente.

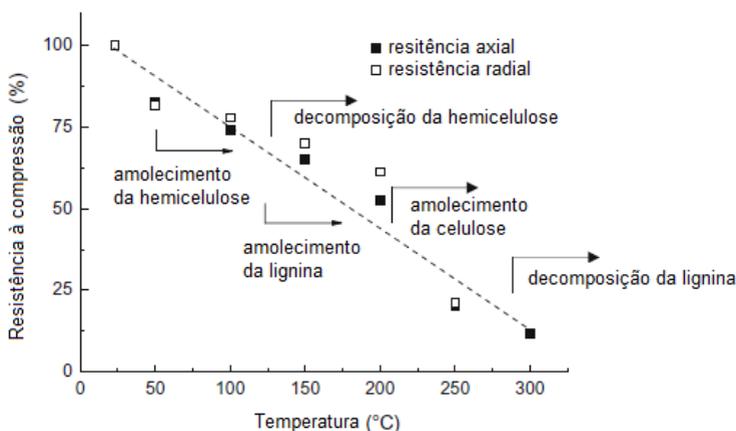


Figura 4. Resistência à compressão paralela à grã de madeira de balsa. Fonte: modificado de Goodrich *et al.* (2010).

As propriedades mecânicas da madeira dependem do comportamento de cada polímero. A celulose é o polímero que mais contribui para a resistência mecânica da madeira. Esse polímero é importante nas resistências à tração, à compressão e no módulo de elasticidade. Essa contribuição é devida às pontes de hidrogênio existente entre as cadeias de celulose, dos graus de polimerização e de cristalinidade (WINANDY e ROWELL, 2005; TANG *et al.*, 1971; CHAND e HASHMI, 1993; GREENBERG *et al.*, 1989). A lignina, por sua vez, também apresenta grande importância na resistência mecânica da madeira, principalmente, nas resistências à compressão, à tração normal e ao cisalhamento (BODIG; JAYNE, 1993). Já a hemicelulose tem uma contribuição menor na resistência mecânica da madeira. Sua maior contribuição está na instabi-

lidade dimensional da madeira. Isso se deve à capacidade da hemicelulose de absorver e de liberar umidade com maior facilidade que os outros polímeros da parede celular (BOONSTRA et al., 2007). Mas a degradação ou as mudanças na estrutura química da hemicelulose podem diminuir as resistências à compressão e ao cisalhamento (YILDIZ et al., 2006; SILVA, 2012).

Portanto, o aumento da temperatura, combinado com o teor de umidade, provoca alterações nos polímeros da madeira, refletindo nas propriedades mecânicas da madeira. Dependendo do esforço, os polímeros têm maior ou menor importância na resistência mecânica.

2.3 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DA GRÃ NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A madeira é um material anisotrópico e, por simplificação, pode ser considerado ortotrópico por apresentar propriedades mecânicas diferentes nas três direções: longitudinal, radial e tangencial (BODIG e JAYNE, 1982). Os valores de resistência mecânica nas direções tangencial e radial são menores que a resistência na direção longitudinal. Assim, as grandes diferenças nas propriedades mecânicas se encontram entre as direções paralela e perpendicular à grã da madeira (MORESCHI, 2014).

As propriedades da madeira em direções diferentes da paralela (longitudinal) e da perpendicular (tangencial e radial) são estimadas por meio da fórmula de Hankinson, conforme Equação (1) (BODIG e JAYNE, 1982; WOOD HANDBOOK, 2010, p. 5-29). Essa fórmula é função das propriedades nas direções paralela e perpendicular e do ângulo entre a direção da força e a grã da madeira.

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \text{sen}^n \alpha + f_{90} \cdot \text{cos}^n \alpha}, \quad (1)$$

sendo f_{α} a resistência inclinada em relação à grã, f_0 é a resistência na direção paralela, f_{90} é a resistência na direção perpendicular, n é o expoente do termo trigonométrico e α é o ângulo de inclinação da grã.

A inclinação da grã tem influência tanto nos valores do módulo de elasticidade quanto nas resistências à tração, à compressão, ao cisalhamento, à flexão e ao embutimento. Essa influência nas propriedades mecânicas tem sido investigada por diversos autores, a fim de estabelecer modelos matemáticos que descrevem a relação entre a resistência

mecânica e o ângulo de inclinação da grã (SZÜCS, 1992; KARLSEN et al., 1967; LONGSDON et al., 2010; CARRASCO e MANTILLA, 2016; GUPTA e SINHA, 2012, REITERER e STANZL-TSCHEGG, 2001). Os resultados encontrados por esses autores divergem, principalmente, em relação ao expoente “n” do termo trigonométrico. Nesses trabalhos, o expoente varia entre 1,5 e 3, dependendo da propriedade mecânica analisada e da espécie da madeira. Na Tabela 3, valores propostos por Wood Handbook (2010, p. 5-29) para o expoente “n” e para a relação entre a resistência da madeira nas direções paralela e perpendicular são apresentados.

Tabela 3. Parâmetros para estimar as propriedades mecânicas da madeira com inclinação da grã.

Propriedade mecânica	“n”	f_0/f_{90}
Resistência à tração	1,5 – 2	0,04 – 0,07
Resistência à compressão	2 – 2,5	0,03 – 0,40
Resistência à flexão	1,5 – 2	0,04 – 0,10
Módulo de elasticidade	2	0,04 – 0,12

Fonte: Wood Handbook (2010)

A redução dos valores das propriedades mecânicas com o aumento do ângulo entre a força e a grã da madeira não ocorre da mesma forma para todas as propriedades mecânicas. Segundo Baumann (1922), a inclinação do ângulo da grã tem maior influência na resistência à tração, seguida das resistências à flexão e à compressão. Portanto, é importante ter conhecimento sobre como o ângulo da grã influencia em cada propriedade e, no caso do presente estudo, na resistência ao embutimento. Esse assunto é abordado com maiores detalhes na seção 2.5.4.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA

O embutimento é caracterizado pelo deslocamento do elemento de ligação na direção de uma força aplicada na peça de madeira, podendo ser nas direções paralela, perpendicular ou com inclinação em relação à grã da madeira.

A resistência ao embutimento é influenciada por fatores relacionados à madeira, à condição do ambiente, aos elementos da ligação e pelos métodos de ensaio usados para determinar essa propriedade (ZHOU; GUAN, 2006; HÜBNER *et al.*, 2008, FRANKE; MAGNIÈRE, 2014; COUSIN; SALENIKOVICH, 2012). Os fatores correlatos à ma-

deira são: espécie, massa específica, teor de umidade, inclinação da grã; a condição do ambiente está ligada à temperatura a qual a madeira é submetida; ao elemento de ligação restringi-se ao seu diâmetro. Todos esses fatores serão discutidos nessa seção, exceto os relacionados aos parâmetros de ensaio, os quais são apresentados na seção 2.9.

2.4.1 Espécie

A resistência ao embutimento varia entre espécies de coníferas e folhosas, conforme é apresentado na Figura 5. As diferenças ocorrem tanto nos valores das resistências quanto no deslocamento até o rompimento e isso pode ser atribuído às diferenças anatômicas que há entre coníferas e folhosas (SANDHAAS *et al.*, 2010). Porém, alguns autores relatam que a resistência ao embutimento é mais influenciada pela massa específica do que pela espécie (WHALE; SMITH, 1989; EHLBECK; WERNER 1992; SAWATA; YASUMURA, 2002; HÜBNER *et al.*, 2008; VREESWIJK, 2003; SANDHAAS *et al.*, 2010). A influência da massa específica na resistência ao embutimento será discutida na seção 2.5.2.

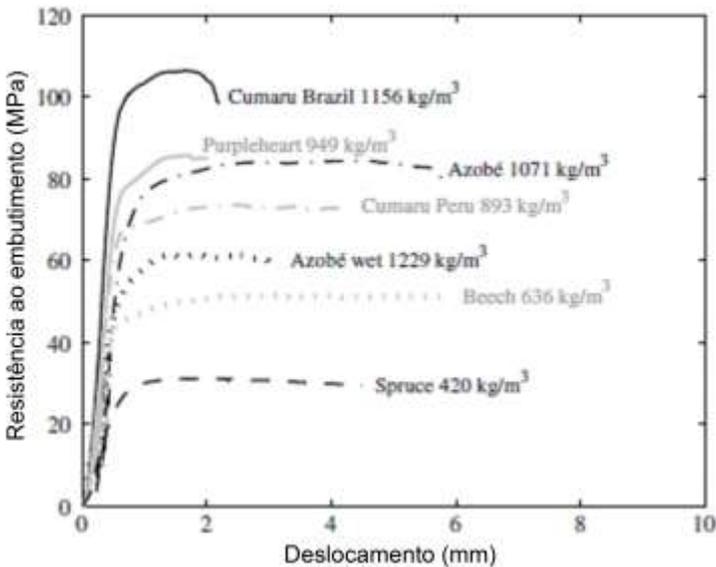


Figura 5. Resistência ao embutimento de madeiras de diferentes espécies. Fonte: Modificado de Sandhaas *et al.* (2010).

2.4.2 Massa específica

A resistência ao embutimento e a massa específica da madeira se correlacionam positivamente, ou seja, quanto maior a massa específica, maior a resistência ao embutimento. As normas EN 1995-1-1:2004 e NDS:2015 e trabalhos experimentais propõem equações para estimar a resistência ao embutimento em função da massa específica da madeira (SANDHAAS *et al.*, 2010; SAWATA. YASAMURA, 2002; FRANKE; QUENNEVILLE, 2010; HÜBNER *et al.*, 2008; GARCIA; ITAGAKI, 2014; KENNEDY *et al.*, 2014; GLISOVIC *et al.*, 2012; SANDHAAS *et al.*, 2013; ZITTO *et al.*, 2012; WILKINSON, 1991; SANTOS *et al.*, 2010; SANTOS *et al.* 2008; PEDERSEN, 2002). Os resultados experimentais dos trabalhos encontrados na literatura diferem dos resultados calculados por meio das equações dispostas nas normas. Portanto, as equações propostas nos trabalhos citados são diferentes para estimar a resistência ao embutimento teórica por meio da massa específica da madeira.

2.4.3 Teor de umidade

A resistência ao embutimento diminui com o aumento do teor de umidade da madeira, principalmente, quando a madeira possui umidade abaixo do PSF. Acima do PSF, a resistência ao embutimento torna-se constante, analogamente às outras propriedades mecânicas da madeira (WILKINSON, 1991; WILKINSON, 1971; EHLBECK, 1979; KOPONEN, 1991; GREEN; KRETSCHMANN, 1994, RAMMER, WINISTORFER, 2001). A relação entre a resistência ao embutimento e o teor de umidade é ilustrada na Figura 6. De acordo com os resultados de Rammer e Winistorfer (2001), Koponen (1991) e Fahlbus (1955), a resistência ao embutimento diminui entre os teores de umidade de 4 e 25,3% e, a partir desse teor de umidade, a resistência torna-se constante.

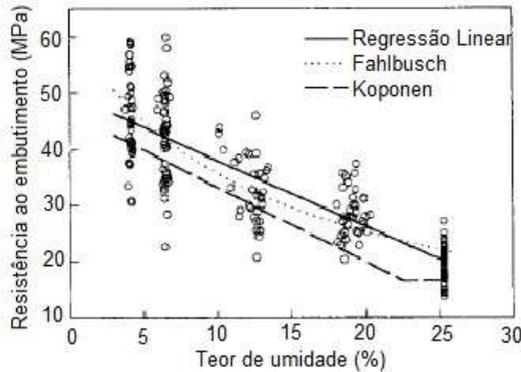


Figura 6. Relação entre resistência ao embutimento e teor de umidade. Fonte: modificado de Rammer e Winistorfer (2001).

2.4.4 Inclinação da grã

O ângulo de inclinação da grã da madeira tem influência na resistência ao embutimento, nas curvas força \times deslocamento e nas formas de ruptura dos corpos de prova. A resistência ao embutimento diminui com o aumento do ângulo de inclinação da grã. As curvas força \times deslocamento apresentam diferenças nos trechos lineares e plásticos e os tipos de falhas ocorre por fendilhamento, esmagamento ou tração normal às fibras, dependendo do ângulo entre a força e a grã. Portanto, a seguir cada um desses aspectos citados será discutido detalhadamente.

a. Resistência ao embutimento

Os valores das resistências ao embutimento são diferentes, dependendo do ângulo entre a força e a grã. Alguns trabalhos sobre a resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira mostram que ela diminui de forma não linear, com o aumento do ângulo de inclinação da grã, sendo a fórmula de Hankinson a mais utilizada para descrever esse comportamento (VALLE, 1999; PEDERSEN, 2002; BLERON e DUCHANOIS, 2006; HUBNER, BOGENSPERGER e SCHICKHOFER, 2008; FRANKE e QUENNEVILLE, 2010). Essa fórmula é adotada pelas normas ABNT NBR 7190:1997, EN 1995-1-1:2004 e ANSI/AWC NDS-2015 para estimar a resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira.

O comportamento da resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira é diferente entre coníferas e folhosas. A partir

das equações apresentadas nas normas ABNT NBR 7190:1997, EN 1995-1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015, os fatores de redução da resistência ao embutimento em função do ângulo de inclinação da grã da madeira foram calculados (Figura 7). Observa-se que a maior redução dos valores ocorreu para norma ABNT NBR 7190:1997, seguida pela EN 1995-1-1:2004, para coníferas, e ANSI/AWC NDS:2015. Já os resultados obtidos a partir das equações da norma EN 1995-1-1:2004, para as folhosas, apresentam a menor redução.

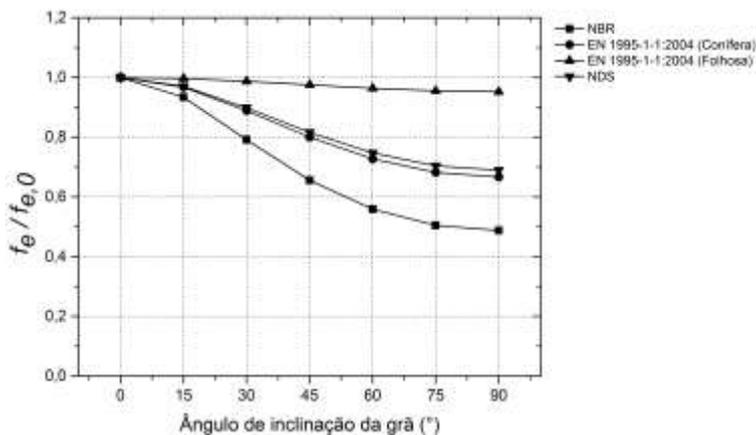


Figura 7. Redução teórica da resistência do embutimento em função do ângulo de inclinação da grã. Fonte: autor.

Na literatura, algumas equações foram propostas para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira, considerando a força transmitida em relação a qualquer ângulo de inclinação da grã da madeira (Tabela 4). Essas equações foram obtidas a partir de dados experimentais, baseando-se nas equações propostas pela norma EN 1995-1-1:2004. Porém, existem diferenças entre elas, sendo uma delas a maneira de estimar as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular. A outra é a divergência quanto ao valor do expoente “n”. Normalmente, o valor de “n” é igual a 2, mas, nos resultados apresentados por Bleron e Duchanois (2006), o expoente “n” do termo trigonométrico recomendado é 3.

Tabela 4. Equações para estimação da resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira.

Equações	Autor	Madeira
$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,0738 \cdot (1 - 0,0104 \cdot d) \cdot \rho_k}{(0,581 + 0,0400 \cdot d) \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$	(1)	Folhosa
$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,0150 \cdot \rho_k^{1,29} \cdot d^{-0,179}}{(0,618 + 0,0351 \cdot d) \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$	(2)	Folhosa
$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,015 \cdot \rho_k^{1,3} \cdot d^{-0,2}}{(0,62 + 0,035 \cdot d) \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$	(3)	Folhosa
$f_{h,\alpha,k} = \frac{(0,09 - 0,0013 \cdot d^{-1,2}) \cdot \rho_k}{\left(0,32 + \frac{340}{\rho_k} + \frac{19}{d}\right) \cdot \text{sen}^3 \alpha + k_{frot} \cdot \text{cos}^3 \alpha}$	(4)	Conífera
$f_{h,\alpha,k} = \frac{k_{frot} = 1 \text{ ou } 0,68}{2,0 \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha} \cdot \frac{0,076 \cdot (1 - 0,0044 \cdot d) \cdot \rho_k}{2,0 \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$	(5)	Conífera

sendo: ρ_k = massa específica (kg/m³); d = diâmetro do parafuso (mm); α = ângulo; (1) Ehlbeck; Werner (1992); (2) Whale *et al.* (1986); (3) Hübner *et al.* (2008); (4) Bleron; Duchanois (2006); (5) Franke; Quenneville (2010).

Na Figura 8, os valores da resistência ao embutimento calculados a partir das equações encontradas na literatura são apresentados (Tabela 4). Foram usados valores de massa específica da madeira igual a 500 kg/m³ e do diâmetro do parafuso igual 10 mm. Observa-se que a resistência das madeiras de coníferas tem comportamento diferente da resistência das folhosas. As equações para a estimação da resistência ao embutimento das espécies de coníferas mostram que os valores diminuem de forma não linear com o aumento do ângulo de inclinação da grã, exceto na equação proposta por Bleron e Duchanois (2006), que apresenta elevação da resistência ao embutimento para o ângulo de 15°. Os resultados das equações para as folhosas mostram que o ângulo da grã tem pouca influência na resistência ao embutimento.

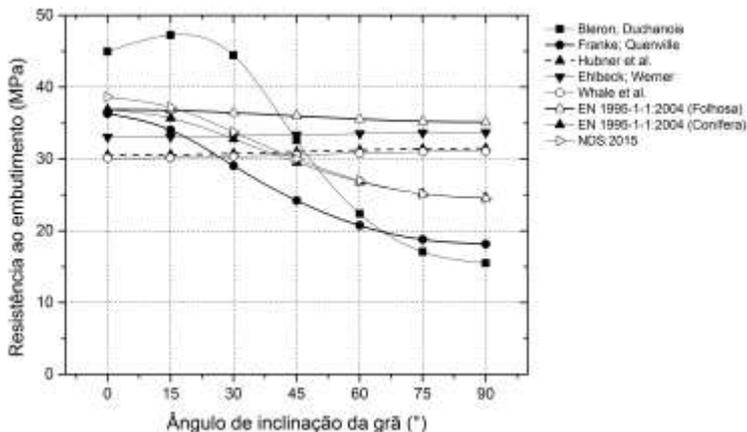


Figura 8. Resistência ao embutimento em função da grã da madeira. Fonte: autor.

b. Curvas força \times deslocamento de embutimento da madeira

Na Revisão bibliográfica, constatou-se que as curvas força \times deslocamento em testes de embutimento podem apresentar comportamentos diferentes, dependendo do ângulo entre a força e a grã da madeira. Essas diferenças ocorrem nos trechos linear e plástico (Figuras 9 e 10). No trecho linear, o ângulo de inclinação da curva diminui com o aumento do ângulo entre a força e a grã, ou seja, diminui o coeficiente inicial de rigidez ao embutimento. No trecho plástico da curva, principalmente após o limite de proporcionalidade, o ângulo de inclinação desse trecho da curva aumenta com o ângulo entre a força e a grã da madeira (PEDERSEN, 1997; FRANKE e QUENVILLE, 2010), conforme observado nas Figuras 9 e 10. Esse aumento pode ser relacionado com a densificação da madeira na área de contato abaixo do pino e com o efeito de corda (“rope effect”) das fibras da madeira (SCHWEIGLER *et al*, 2016).

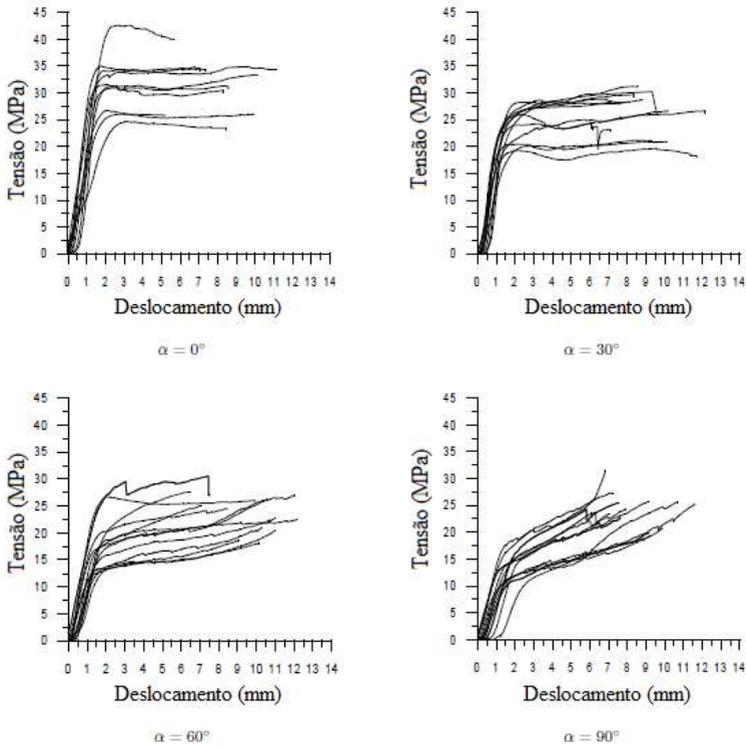


Figura 9. Resistência ao embutimento Fonte: modificado de Pedersen, 2002.

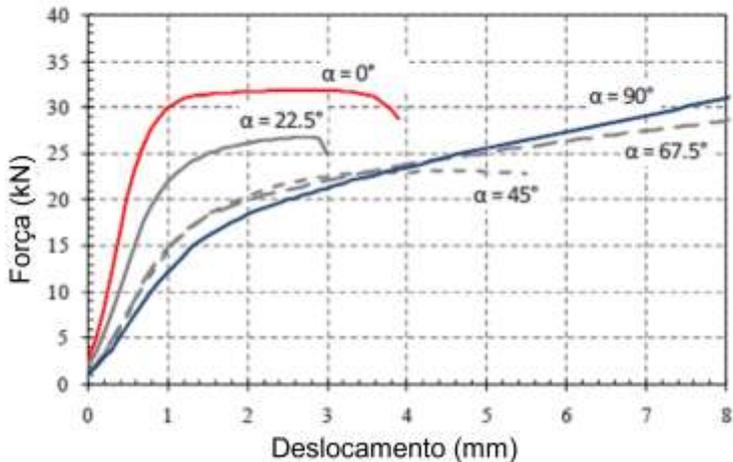


Figura 10. Curvas força \times deslocamento de embutimento para diferentes ângulos entre a força e a grã da madeira. Fonte: modificado de Quenville (2010).

c. Tipos de falhas

Os tipos de falha na madeira em corpos de prova de embutimento podem ser por: fendilhamento, esmagamento ou tração normal às fibras da madeira, dependendo da direção da força em relação à grã da madeira (PEDERSEN, 2002; BLERON; DUCHANOIS, 2006; SCHWEIGLER *et al*, 2016). A falha por fendilhamento ocorre normalmente quando o ângulo entre a força e a grã da madeira é 0° . A falha por esmagamento ocorre quando este ângulo é 90° e a por tração normal às fibras para os ângulos intermediários (VALLE, 1999).

Nesses três tipos de falhas, a forma do furo no corpo de prova também apresenta variações com a inclinação da grã em relação a força (Figuras 11, 12 e 13). No ângulo de 0° (Figuras 11 e 13), o pino se desloca na direção da grã de maneira linear, resultando em falhas por fendilhamento. Quando o ângulo da grã é 90° (Figuras 11 e 13), na região de contato entre o pino e a madeira ocorre um esmagamento das fibras na direção normal. Nos ângulos intermediários (Figuras 11, 12 e 13), o pino metálico provoca uma deformação na madeira em forma de “feijão”. Esta deformação começa a ocorrer perto do limite de proporcionalidade, quando a peça de madeira tem um deslocamento na mesma direção das fibras. Então, a madeira começa a ser esmagada pelo pino metálico até o momento em que a rigidez lateral passa a ser maior do que aquela na direção das fibras da madeira (BLERON; DUCHANOIS, 2006).

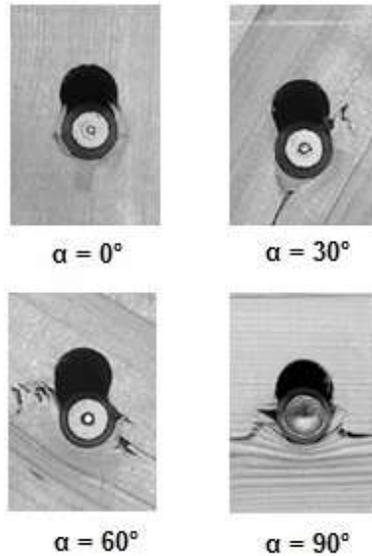


Figura 11. Formas de ruptura dos corpos de prova. Fonte: Pedersen, 2002.

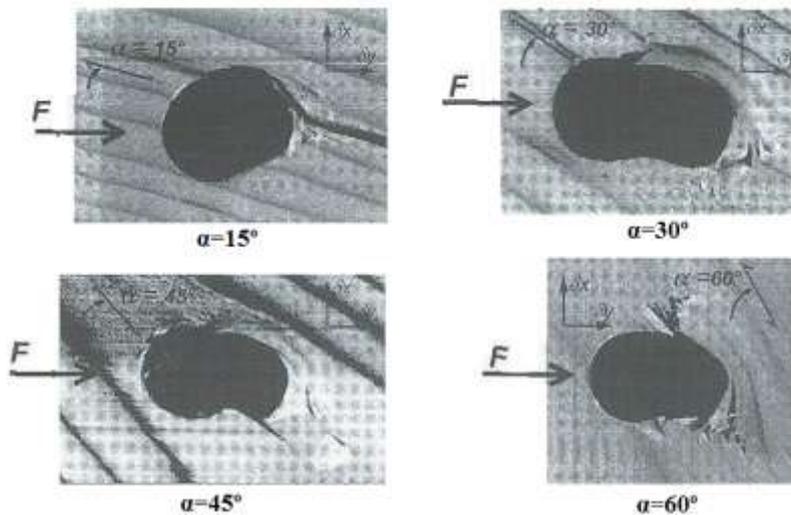


Figura 12. Deformações em corpos de prova de ensaio de embutimento inclinado em relação às fibras da madeira. Fonte: modificado de Bleron e Duchanois, 2006.

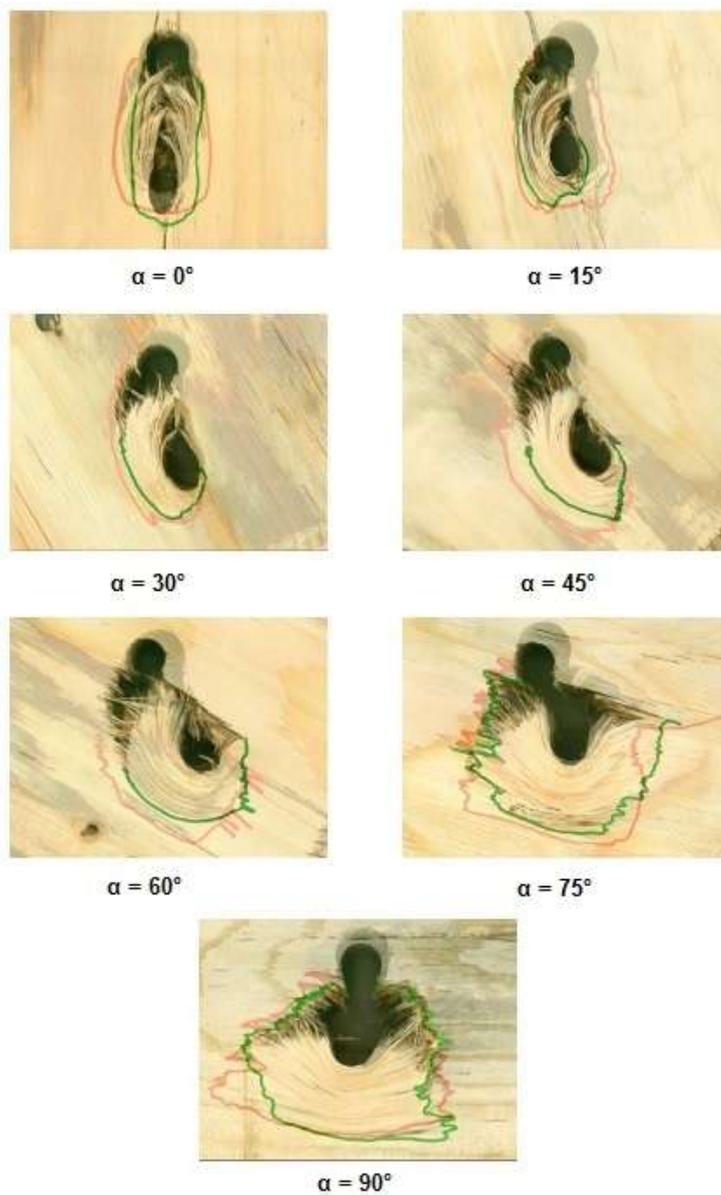


Figura 13. Deformações do furo em testes de embutimento com corpos de prova de LVL. Fonte: modificado de Schweigler *et al*, 2016.

2.4.5 Temperatura

A temperatura exerce influência sobre a resistência ao embutimento, sobre a forma das curvas força \times deslocamento e sobre os tipos de falhas na madeira. Verifica-se que a resistência ao embutimento diminui com o aumento da temperatura de forma não linear (CHUO, 2007; MOSS *et al.*, 2010, NOREN, 1996; MORAES *et al.*, 2005; MANRIQUEZ, 2008; CORREIA, 2009; MANRIQUEZ, 2012). Nas curvas força \times deslocamento, a temperatura altera o trecho plástico e os tipos de falhas por fendilhamento aumentam para temperaturas mais elevadas. Todas esses tópicos serão discutidos com maiores detalhes a seguir.

a. Resistência ao embutimento

A resistência ao embutimento da madeira, seja no sentido paralelo ou no perpendicular á grã, é reduzida pela ação da temperatura. As resistências ao embutimento paralelo e perpendicular a 100 °C sofrem uma redução entre 20 e 25% em relação à temperatura ambiente. A 150 °C, a resistência ao embutimento apresentam um acréscimo e, a 240 °C, uma redução de 60%. Esse comportamento pode ser influência do teor de umidade e da degradação dos polímeros da madeira (MOREAS *et al.*, 2005; MANRIQUEZ, 2008; CORREIA, 2009; MANRIQUEZ, 2012).

O efeito da temperatura sobre a resistência ao embutimento da madeira é discutido em diversos trabalhos, conforme resultados ilustrados na Figura 14 (CHUO, 2007; MOSS *et al.*, 2010, NOREN, 1996; MORAES *et al.*, 2005; MANRIQUEZ, 2008; CORREIA, 2009; MANRIQUEZ, 2012). Observa-se que ocorre uma redução da resistência entre 70 e 100 °C, a qual pode estar associada à temperatura de transição vítrea da lignina. Back e Salmen (1982), Irvine (1984) e Olsson e Salmén (1997) mostraram que, para madeira em condições úmidas, a temperatura de transição vítrea ocorre entre 60 e 90 °C, favorecendo um amolecimento da lignina e, conseqüentemente, uma redução da resistência mecânica da madeira. Em temperaturas próximas a 150 °C, a resistência ao embutimento aumenta e esse comportamento pode estar relacionado com a diminuição do teor de umidade da madeira durante o aquecimento. Quando a celulose perde umidade, muitas ligações de hidrogênio entre a celulose e a água de adesão são convertidas em ligações celulose-celulose, favorecendo o aumento da resistência e da rigidez das fibras (LUNDBERG; De RUBO, 1978).

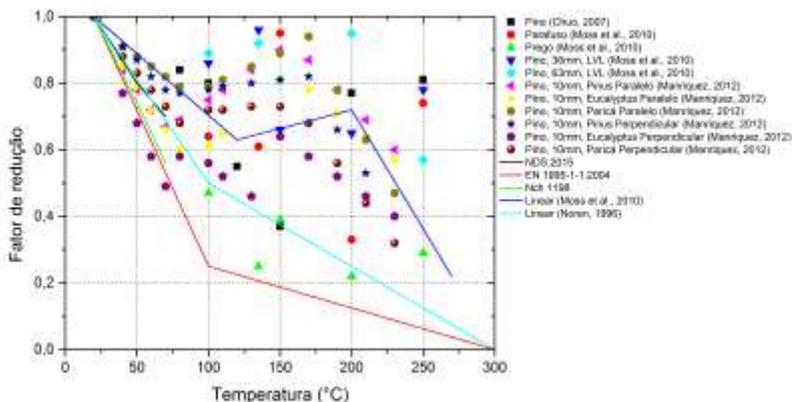


Figura 14. Fatores de redução das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular para diferentes espécies e tipos de ligadores. Fonte: autor.

As normas EN 1995-1-2:2004, ANSI/AWC NDS-2015 e NCh 1198:2006 apresentam fatores de redução para as propriedades mecânicas da madeira. A norma EN 1995-1-1:2004 apresenta fatores de redução para as resistências à tração, à compressão paralela, ao cisalhamento paralelo às fibras e o módulo de elasticidade. Já as normas ANSI/AWC NDS-2015 e NCh 1198:2006 apresentam os fatores para o módulo de elasticidade e para outras propriedades mecânicas. Com intuito de aprimorar os projetos de ligações em estruturas de madeira, seria recomendável que houvesse fatores de modificações em função da temperatura para a resistência ao embutimento.

b. Curvas força \times deslocamento

As curvas força \times deslocamento de testes de embutimento apresentam comportamento diferente com o aumento da temperatura, principalmente no trecho plástico da curva. Nesse trecho, é possível avaliar o comportamento dúctil da madeira. Segundo Moraes (2004), a partir de 60 °C, a madeira é mais dúctil do que em temperatura ambiente (20 °C) e esse comportamento continua até 100 °C. Para temperaturas superiores a 100 °C, a madeira começa a se torna menos dúctil, mas os valores são maiores do que em relação a 20 °C (MORAES, 2003), conforme ilustrado na Figura 15.

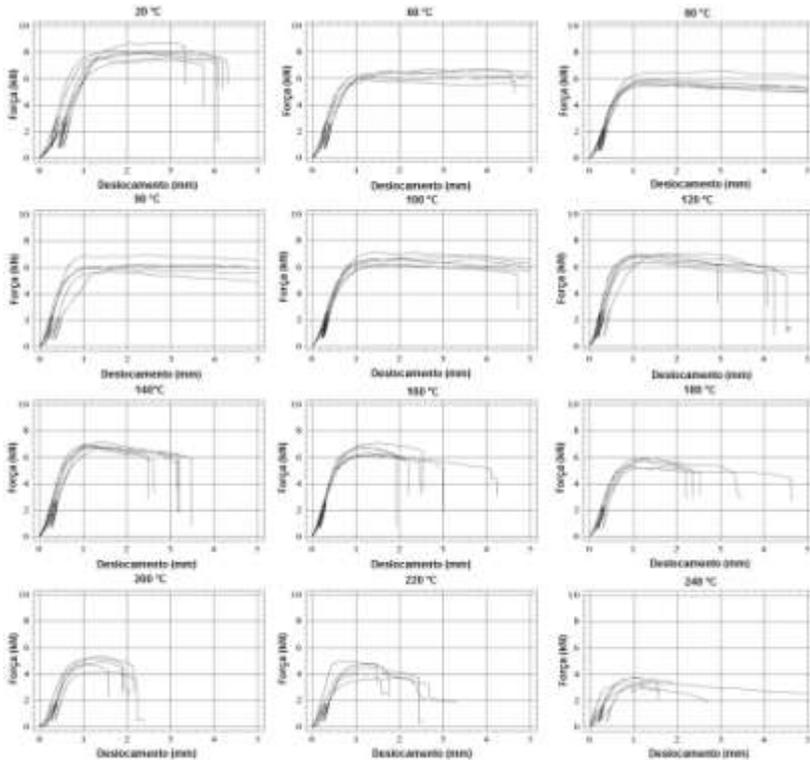


Figura 15. Curvas força \times deslocamento de testes de embutimento paralelo em função da temperatura. Fonte: modificado de Moraes, 2003.

c. Tipos de falhas

Nos testes de embutimento em temperaturas elevadas, ocorrem dois tipos de falhas: por fendilhamento e por esmagamento das fibras. Essas falhas foram descritas no item 2.5.4.c e podem ser observadas nas Figuras 16 a e b.

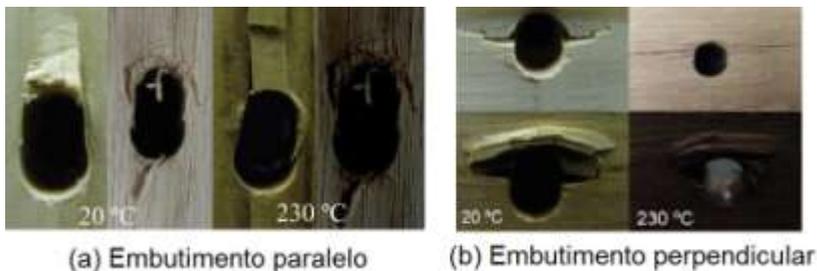


Figura 16. Falhas por embutimento em função da temperatura. Fonte: modificado de Manriquez, 2012.

O aumento da temperatura favorece as falhas por fendilhamento na direção paralela às fibras (Figura 17). Segundo Manriquez (2012), os corpos de prova de *Pinus taeda* começam a apresentar falhas por fendilhamento a partir de 130 °C. Para os corpos de prova em *Eucalyptus saligna*, essas falhas surgem a partir de 150 °C. Com a elevação da temperatura, as falhas por fendilhamento podem ser associadas ao comportamento da lignina. Esse polímero desempenha uma função de adesivo entre as fibras da madeira e sofre modificações com aumento da temperatura, apresentando mudanças visíveis em sua estrutura química a partir de 120 °C (IFJU, 1964; KOŠÍKOVÁ *et al.*, 1999; KACÍK *et al.*, 1999).



Figura 17. Falhas por fendilhamento no embutimento paralelo. Fonte: modificado de Manriquez, 2012.

2.4.6 Diâmetro do elemento da ligação

Na literatura, não existe consenso sobre a influência do diâmetro do pino nos valores das resistências ao embutimento. Nas equações propostas pelas normas europeia (EN 1995-1-1:2004) e americana (NDS:2015), o diâmetro e a resistência ao embutimento estão relacionados de forma inversa, ou seja, quanto maior o diâmetro, menor a resistência. Algumas pesquisas também relatam que as resistências ao embutimento paralela e perpendicular são influenciadas pelo diâmetro do pino (WHALE; SMITH, 1986; EHLBECK; WERNER, 1992; SMITH *et al.*, 1988; CHUI *et al.*, 2006). Contudo, outros autores apresentam resultados experimentais que indicam que o diâmetro não tem influência na resistência ao embutimento (FRANKE; QUENNEVILLE, 2011; WHALE *et al.*, 1987; WILKINSON, 1991; SAWATA AND YASUMURA, 2002; KENNEDY *et al.*, 2014). Portanto, os resultados experimentais são diferentes dos propostos pelas normas e entre as pesquisas, sendo uma questão para qual não se apresenta uma conclusão.

2.4.7 Conclusões parciais

A resistência ao embutimento é influenciada por diferentes fatores, conforme discutido e analisado em várias pesquisas. São eles: espécies, teor de umidade, massa específica, inclinação da grã e temperatura. A resistência ao embutimento apresenta diferenças principalmente entre espécies de coníferas e folhosas; o teor de umidade tem influência na resistência apenas abaixo do ponto de saturação das fibras; a massa específica é diretamente proporcional à resistência ao embutimento; o aumento da inclinação da grã e da temperatura reduz a resistência ao embutimento, influenciam as curvas força \times deslocamento e os tipos de falhas.

Portanto, no presente trabalho serão investigados os fatores relacionados à espécie, à temperatura e ao ângulo da grã. A massa específica será homogênea e o diâmetro será constante, a fim de limitar o número de variáveis na pesquisa. Na literatura, encontra-se a influência da temperatura sobre as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular. Nos ângulos de inclinação da grã diferentes de 0 e 90°, todos os trabalhos são realizados em temperatura ambiente (25 °C). Assim, faz-se necessário investigar o efeito da temperatura sobre a resistência ao embutimento com diferentes inclinações da grã da madeira.

2.5 NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO COEFICIENTE DE RIGIDEZ AO EMBUTIMENTO

A determinação experimental da resistência ao embutimento é comumente realizada nas direções paralela ou perpendicular às fibras da madeira. Os ensaios são previstos em normas como a ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007 e ASTM D5764-97a, nas quais a resistência ao embutimento é determinada pela razão entre a força de embutimento e o produto da espessura do corpo de prova e do diâmetro do pino.

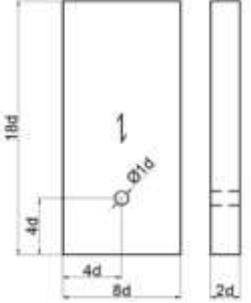
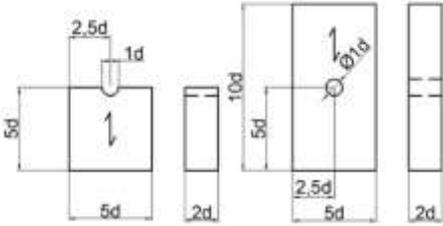
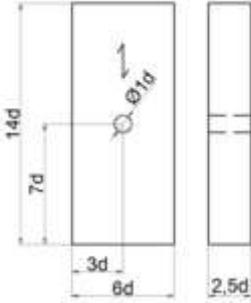
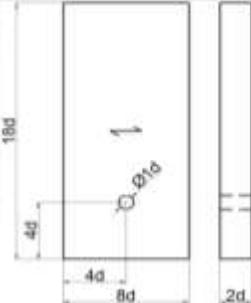
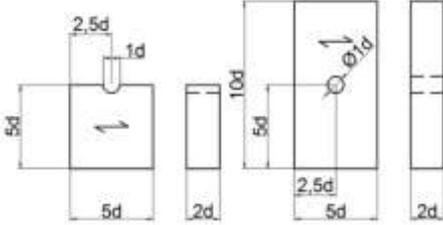
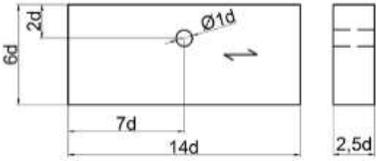
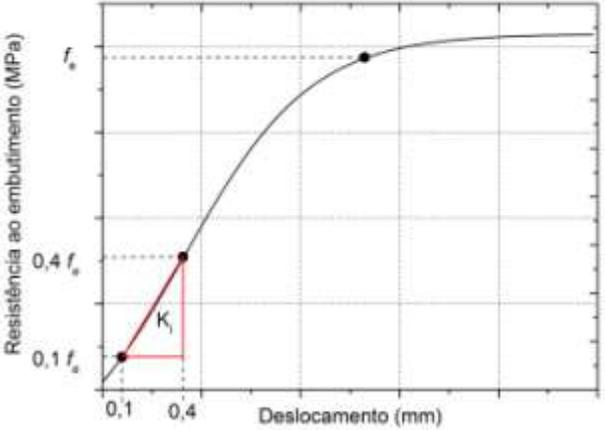
As normas citadas divergem entre si quanto às dimensões dos corpos de prova, à velocidade de carregamento, à determinação da força de embutimento, à determinação teórica da resistência ao embutimento paralelo, perpendicular e inclinado em relação às fibras da madeira, conforme sintetizado na Tabela 5. Essas divergências serão discutidas a seguir.

2.5.1 Velocidade de aplicação da força

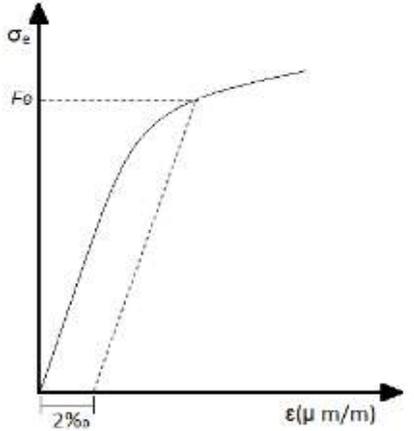
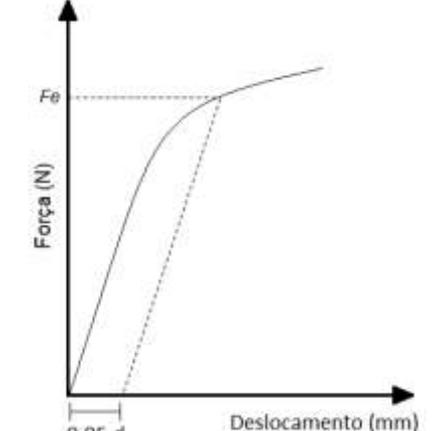
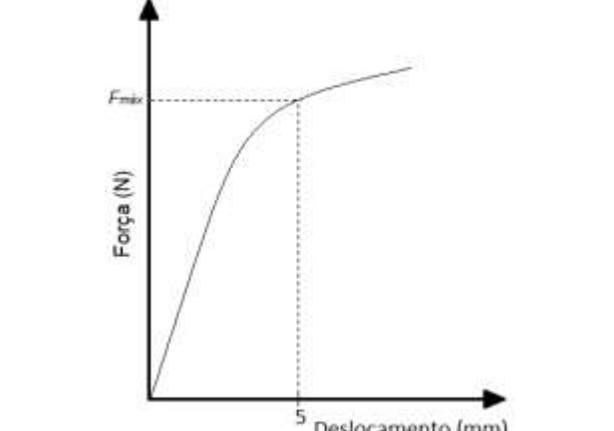
A resistência ao embutimento é uma propriedade mecânica da madeira que deve ser obtida em ensaios estáticos de curta duração. Em ensaios estáticos, a força máxima deve ser atingida em aproximadamente 5 min e a relação entre a força e a velocidade pode ser descrita como uma função exponencial (HANDBOOK, 2010, p5-38). A velocidade de aplicação da força pode influenciar os valores de resistência ao embutimento, como relatado por alguns autores (BARRETT; LAU, 1994; WOOD HANDBOOK, 2010). Já autores como Cousin e Salenikovitch (2012) não corroboram com essa informação.

A velocidade de aplicação da força durante os testes de embutimento apresentadas pelas as normas ABNT NBR 7190:1997, ASTM D5764-97a e EN 383:2007 diferem entre si. A ABNT NBR 7190:1997 menciona que a velocidade dever ser de 10 MPa/min., e o ensaio realizado em dois ciclos de carga e descarga antes de determinar a força máxima. A EN 383:2007 recomenda que a carga máxima deva ser atingida em até 300 ± 120 s, realizando-se um ciclo de carga e descarga antes de determinar a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), enquanto que a norma ASTM D5764-97a determina que o teste tenha duração de no máximo 10 min. para atingir a carga máxima, sem a realização de ciclos de carga e descarga. No caso das normas NBR 7190:1997 e EN 383:2007 os ciclos de carga e descarga são usados para determinar a rigidez de embutimento.

Tabela 5. Parâmetros das normas para determinação da resistência ao embutimento.

	Normas		
	ABNT NBR 7190:1997	ASTM D5764-97a:2013 e ANSI/AWC NDS-2015	EN 383:2007 e EN 1995-1-1:2004
Velocidade de aplicação da força	10 MPa/min	1 mm/min	1 mm/min
Corpo de prova de embutimento paralelo			
Corpo de prova de embutimento perpendicular			
Determinação do coeficiente rigidez de embutimento			

Continuação da Tabela 5.

<p>Determinação da força de embutimento para o cálculo da respectiva resistência</p>			
<p>Resistência ao embutimento</p>	$f_e = \frac{F_e}{td}$	$f_h = \frac{F_e}{td}$	$f_h = \frac{F_{máx}}{td}$
<p>Resistência teórica ao embutimento paralelo</p>	$f_{e,0} = f_{c,0}$	$f_{h,0} = 0,07725 \cdot \rho_k$	$f_{h,0} = 0,082(1 - 0,01d) \cdot \rho_k$
<p>Resistência teórica ao embutimento perpendicular</p>	$f_{e,90} = 0,25 \cdot f_{e,0} \cdot \alpha_e$	$f_{h,90} = 212(0,001 \cdot \rho_k)^{1,45} \cdot d^{-0,5}$	$f_{h,90} = \frac{f_{h,0}}{k_{90}}$ $k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \text{ (Coníferas)}$ $k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \text{ (Folhosas)}$
<p>Resistência teórica ao embutimento inclinado em relação às fibras</p>	$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0} \cdot f_{e,90}}{f_{e,0} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{e,90} \cdot \text{cos}^2 \alpha}$	$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{h,90} \cdot \text{cos}^2 \alpha}$	$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0}}{k_{90} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$

sendo: f_e = resistência ao embutimento; F_e = força aplicada durante o ensaio; $F_{máx}$ = força máxima aplicada durante o ensaio; t = espessura do corpo de prova; d = diâmetro do parafuso; $f_{e,0}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras (MPa); $f_{c,0}$ = resistência à compressão paralela às fibras (MPa); $f_{e,90}$ = resistência ao embutimento perpendicular às fibras (MPa); α_e = coeficiente dado pela norma ABNT NBR 7190:1997; $f_{h,0}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras (MPa); $f_{h,90}$ = resistência ao embutimento perpendicular às fibras (MPa); k_{90} = parâmetro determinado a partir da relação entre as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras; ρ = massa específica da madeira (kg/m³);

2.5.2 Corpos de prova

As dimensões dos corpos de prova para os testes de embutimento são diferentes entre as normas ABNT NBR 7190:1997, ASTM D5764-97a e EN 383:2007, mas todas elas determinam que as dimensões sejam definidas em função do diâmetro do elemento de ligação. A norma ABNT NBR 7190:1997 apresenta as maiores dimensões, enquanto a ASTM D5764-97a as menores. Devido a isso, os corpos de prova propostos pela ABNT NBR 7190:1997 necessitam de um maior volume de madeira para a sua confecção.

As normas ABNT NBR 7190:1997 e EN 383:2007 fazem distinção do formato do corpo de prova conforme a direção da força em relação à grã da madeira, enquanto que para a norma ASTM D5764-97a, o formato do corpo de prova não é modificado. Por esta razão, a confecção e a padronização dos corpos de prova propostos pela última norma são mais fáceis em relação ao propostos pelas duas normas citadas inicialmente.

Na confecção de corpos de prova para ensaios mecânicos da madeira devem ser considerados fatores como a disponibilidade de madeira e o tamanho das peças das quais serão retirados os corpos de prova. A disponibilidade de madeira varia de acordo com as espécies. Atualmente, no Brasil, as peças de madeira com maior disponibilidade são oriundas de florestas plantadas, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Nessas florestas, as árvores não atingem diâmetros elevados, dificultando assim o desdobro de madeira serrada com grandes dimensões. O tamanho das peças de madeira é o fator preponderante na escolha da geometria do corpo de prova a ser utilizado. O presente trabalho requer que sejam retirados corpos de prova com diferentes ângulos de inclinação da grã exigindo que as peças de madeira tenham grandes dimensões na largura.

Os corpos de prova com ângulo de inclinação igual a 45° é o que exige maior largura das peças. Com essa inclinação, as dimensões das peças devem ter uma largura mínima que varia de acordo com cada norma: 18,38d para a NBR 7190:1997; 14,14d para a EN 383:2007 e 7,07d para a ASTM D5764-97a, sendo d o diâmetro do pino. Portanto, as dimensões dos corpos de prova da norma ASTM D5764-97a facilitam a confecção dos mesmos, exigindo peça com menor largura e, conseqüentemente, menor volume de madeira.

2.5.3 Coeficiente de rigidez de embutimento

O coeficiente de rigidez de embutimento (K) é a relação entre a resistência ao embutimento e o deslocamento relativo entre o pino e a peça de madeira, sendo a sua determinação realizada por meio experimental e/ou analítico. As normas ABNT NBR 7190:1997 e ASTM D5764-97a não fazem nenhum comentário a respeito da determinação do coeficiente de rigidez de embutimento. Por outro lado, a norma EN 383:2007 apresenta critérios para determinação do coeficiente de rigidez de embutimento inicial e do modificado. O coeficiente de rigidez inicial (K_i) é a inclinação da reta secante da curva do diagrama força \times deslocamento para valores de 0 e 40% da força máxima, sendo que a definição da força máxima é descrita na Tabela 5 na seção 3.2. Já o coeficiente de rigidez inicial modificado (K_s) é definido como a inclinação da secante da curva desse mesmo diagrama, porém entre valores de 10% e 40% da força máxima. Esses coeficientes de rigidez são calculados conforme as Equações (2) e (3).

$$K_i = \frac{0,4f_{e,\alpha\theta}}{w_i}, \quad (2)$$

$$K_s = \frac{0,4f_{e,\alpha\theta}}{w_{i\ mod}}, \quad (3)$$

sendo $f_{e,\alpha\theta}$ é a resistência ao embutimento (MPa), w_i é igual a $u_{0,4}$ que é o deslocamento correspondente a 40% da força (mm), $w_{i\ mod}$ é igual a $4/3(u_{0,4} - u_{0,1})$ que é o deslocamento correspondente entre 40% e 10 % da força (mm).

2.5.4 Determinação da força de embutimento

Pesquisas relatam que o método de determinação da força de embutimento tem influencia nos valores das resistências ao embutimento (ALMEIDA, 2014; VALLE, 1999). A determinação da força de embutimento (F_e) durante o teste de embutimento apresenta variações entre as normas pesquisadas (Tabela 5). A norma ABNT NBR 7190:1997 define que a força seja determinada quando a deformação residual for igual a 2%. Já a norma EN 383:2007 sugere que a força seja determina-

da para o deslocamento igual a 5 mm, enquanto a norma ASTM D5764-97a a define para um deslocamento igual a 5% do diâmetro do parafuso.

Na literatura, os resultados relatados por Almeida (2014) e por Valle (1999) sugerem que, dependendo da norma escolhida para a realização dos ensaios, podem ser encontrados valores diferentes para a resistência ao embutimento. Essas diferenças estão relacionadas com a determinação da força máxima de embutimento a partir dos resultados experimentais. Por outro lado, os resultados de Sawata e Yasumura (2002) e de Santos *et al.* (2010) sugerem que os procedimentos das normas não influenciam os resultados. Diante disso, a escolha da norma exige maiores investigações e cuidados para não haver distorções na interpretação dos resultados.

2.5.5 Resistência ao embutimento teórica

A resistência ao embutimento teórica pode ser obtida por meio de equações apresentadas nas normas. A norma ABNT NBR 7190:1997 menciona que, na ausência de valores de resistência ao embutimento paralelo, esses podem ser estimados a partir da resistência à compressão paralela às fibras. Já a norma EN 1995-1-1: 2004 sugere o cálculo das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras em função do diâmetro do parafuso, da massa específica e da espécie (conífera ou folhosa). Segundo o ANSI/AWC NDS-2015 (NDS, 2015), os valores para as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular podem ser estimados em função da massa específica da madeira e do diâmetro do pino.

A resistência ao embutimento pode apresentar diferenças entre espécies. As equações apresentadas na Tabela 5 para a determinação da resistência teórica foram propostas a partir de ensaios realizados com madeira de espécies utilizadas nos Estados Unidos e em países da Europa. No Brasil, a madeira das espécies usadas em estruturas são diferentes das espécies usadas nos países citados, portanto essas equações podem resultar em valores incorretos se aplicadas para estimar a resistência ao embutimento de madeiras de espécies encontradas no Brasil.

As resistências ao embutimento teóricas para um pino com diâmetro igual a 10 mm, determinadas a partir das normas EN 1995-1-1:2004 e ANSI/AWC NDS-2015 são ilustradas na Figura 18. A resistência ao embutimento paralelo obtida a partir das normas EN 1995-1-1:2004 e ANSI/AWC NDS-2015 apresentam valores próximos. Porém os valores de resistência ao embutimento perpendicular, obtidos a partir da norma EN 1995-1-1:2004 para madeira de folhosas, são superiores

aos encontrados segundo a norma ANSI/AWC NDS-2015. Para a madeira de coníferas, os valores de resistência ao embutimento se distanciam com o aumento da massa específica.

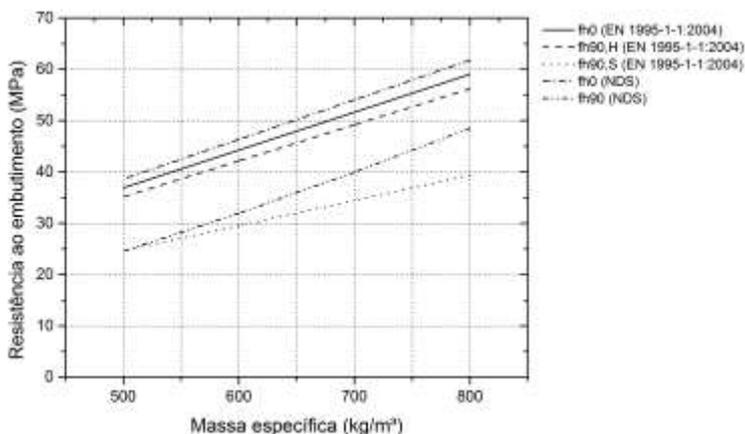


Figura 18. Resistências ao embutimento paralelo e perpendicular à grã da madeira. Fonte: autor.

Os resultados das resistências ao embutimento teóricas mostram que as equações propostas pelas normas nem sempre apresentam compatibilidade com os dados experimentais. Pedersen (2002) obteve resultados experimentais de resistência ao embutimento paralelo próximos aos valores estimados segundo a norma EN 1995-1-1:2004 para madeira de *Picea abies*. Já os resultados de Zitto *et al.* (2012), para o *Eucalyptus grandis*, mostraram que os valores calculados conforme a norma EN 1995-1-1:2004 foram 46% e 176% superiores aos experimentais para as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular, respectivamente.

2.5.6 Conclusões parciais

Os parâmetros definidos nas normas apresentam diferenças para os procedimentos experimentais dos testes de embutimento, sendo eles: velocidade de aplicação da força, dimensões e formato dos corpos de prova, determinação do coeficiente de rigidez de embutimento, determinação da força de embutimento e resistência ao embutimento teórica. A velocidade de aplicação da carga difere entre as normas, mas em todas elas o tempo para atingir a força máxima é menor que 5 min. A confecção dos corpos de prova de acordo com norma ASTM D5764-97a é de

fácil execução e requer menor volume de madeira. A norma EN 383:2007 é a única que descreve o procedimento para determinar a rigidez de embutimento. A determinação teórica da resistência ao embutimento definida é semelhante entre as normas americana e europeia e é função da massa específica da madeira e do diâmetro do parafuso. A determinação da força de embutimento é o parâmetro que apresenta maior divergência entre as normas pesquisadas. Devido a isso, esse parâmetro deve ser mais bem investigado, determinando qual o mais adequado para o cálculo da resistência ao embutimento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, apresentam-se os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. Os corpos de prova e os procedimentos dos testes de embutimento seguiram as recomendações da norma ASTM D5764-97a. Já a determinação da força de embutimento, a qual é usada para o cálculo da resistência ao embutimento, foi realizada segundo duas normas: a ASTM D5764-97a e a EN 383:2007. Foram realizados ensaios de embutimento com corpos de prova fabricados com madeiras das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, em várias condições de temperatura e com diferentes ângulos entre a força e a grã da madeira. A partir da resistência ao embutimento foram determinados os fatores de modificação da resistência ao embutimento em função da temperatura e do ângulo. Todas as amostras foram ensaiadas em níveis de temperatura situados entre 25 °C e 180 °C e com ângulos entre 0° e 90°, com intervalos de 15°.

3.1 MATERIAL

A madeira utilizada para confeccionar os corpos de prova era proveniente das espécies *Pinus elliottii* Engelm e *Eucalyptus saligna* Sm oriundas de plantações localizadas no município de Anitápolis, Santa Catarina. A idade aproximada dos plantios era de 13 anos e portanto, a madeira é caracterizada como madeira juvenil. Após o abate das árvores, as mesmas foram desdobradas em tábuas de 2,5 cm × 10 cm × 300 cm. Essas tábuas passaram pelo processo de secagem artificial em estufa até atingir teor de umidade de 12%.

Nos testes de embutimento, foram usados parafusos sextavados com rosca parcial de aço zincado (Figura 19), classe de resistência 8.8 e 10 mm de diâmetro, cujas tensões de escoamento e de ruptura são 640 MPa e 800 MPa, respectivamente (ISO 898-1, 2009).



Figura 19. Parafuso de rosca parcial usado nos testes de embutimento. Fonte: autor.

3.2 AMOSTRA E CORPOS DE PROVA PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA

A resistência ao embutimento foi determinada a partir de testes mecânicos de embutimento paralelo, perpendicular e inclinado em relação à grã da madeira com ângulos de 15°, 30°, 45°, 60° e 75°. Os testes foram realizados em 10 níveis de temperatura: 25, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160 e 180 °C. Em cada combinação de temperatura e ângulo de inclinação da grã, foram testados 10 corpos de prova, sendo este número definido a partir de estudos preliminares, os quais se encontram no Apêndice A. A discussão sobre a definição do tamanho da amostra é apresentada na seção 4.1.1.

Os níveis de temperaturas foram escolhidos a partir de trabalhos já desenvolvidos (MANRIQUEZ, 2012, MORAES, 2003). Esses níveis abrangem a temperatura de transição vítrea da madeira, situada entre 50 e 100 °C, assim como temperaturas superiores a 100 °C, as quais causam degradação dos polímeros e modificações irreversíveis nas propriedades mecânicas da madeira.

Nas tabelas 6 e 7, são apresentados os valores médios da massa específica aparente a 12% de teor de umidade das amostras usadas em cada combinação de temperatura e ângulo de inclinação da grã. As médias das massas específicas são homogêneas entre si, conforme o teste ANOVA. Portanto, a massa específica não será uma variável da pesquisa.

Tabela 6. Massas específicas aparentes do *Pinus elliottii*.a 12% de umidade

θ (°C)	Massa específica aparente (kg/m ³)						
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
25	444 a	450 a	462 a	454 a	456 a	454 a	444 a
	(37)	(40)	(32)	(41)	(35)	(37)	(37)
40	443 a	449 a	462 a	454 a	456 a	454 a	443 a
	(34)	(38)	(31)	(40)	(32)	(34)	(34)
50	442 a	450 a	462 a	455 a	457 a	454 a	442 a
	(32)	(36)	(29)	(38)	(30)	(33)	(32)
60	442 a	451 a	464 a	455 a	457 a	454 a	442 a
	(30)	(35)	(28)	(37)	(30)	(32)	(30)
80	443 a	452 a	464 a	454 a	457 a	455 a	443 a
	(30)	(35)	(27)	(37)	(29)	(32)	(30)
100	443 a	451 a	464 a	455 a	457 a	455 a	443 a
	(30)	(35)	(27)	(36)	(29)	(31)	(30)

Continuação da Tabela 6.

θ (°C)	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
120	442 a (32)	450 a (35)	464 a (27)	455 a (36)	457 a (29)	456 a (30)	442 a (32)
140	443 a (33)	450 a (35)	464 a (28)	454 a (37)	458 a (28)	455 a (30)	443 a (33)
160	443 a (34)	451 a (36)	463 a (28)	454 a (38)	458 a (30)	455 a (32)	443 a (34)
180	444 a (36)	451 a (37)	462 a (31)	444 a (32)	457 a (32)	455 a (33)	444 a (35)

Valores médios na mesma coluna, seguidos de letras minúsculas iguais, não apresentam diferença estatística em nível de 95% de confiança; θ é a temperatura; α é o ângulo da grã; valores entre parênteses representam o desvio-padrão (kg/m³).

Tabela 7. Massas específicas aparentes do *Eucalyptus saligna* a 12% umidade.

θ (°C)	Massa específica aparente (kg/m ³)						
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
25	559 a (47)	556 a (54)	559 a (51)	558 a (50)	558 a (52)	563 a (51)	557 a (51)
40	559 a (45)	556 a (51)	560 a (49)	558 a (47)	559 a (50)	564 a (50)	557 a (49)
50	560 a (43)	556 a (50)	559 a (47)	558 a (46)	558 a (48)	564 a (48)	557 a (47)
60	560 a (43)	557 a (49)	560 a (47)	558 a (45)	559 a (48)	564 a (47)	557 a (45)
80	560 a (43)	558 a (48)	560 a (46)	558 a (45)	559 a (47)	565 a (47)	557 a (43)
100	562 a (40)	557 a (48)	562 a (46)	559 a (44)	559 a (46)	565 a (46)	557 a (43)
120	561 a (40)	556 a (48)	561 a (45)	560 a (44)	558 a (47)	564 a (45)	557 a (44)
140	561 a (41)	555 a (49)	558 a (47)	558 a (44)	557 a (48)	564 a (46)	557 a (45)
160	561 a (42)	555 a (51)	560 a (47)	558 a (46)	556 a (50)	563 a (47)	557 a (48)
180	561 a (43)	556 a (51)	560 a (49)	557 a (48)	557 a (51)	563 a (49)	557 a (49)

Valores médios na mesma coluna, seguidos de letras minúsculas iguais, não apresentam diferença estatística em nível de 95% de confiança; θ é a temperatura; α é o ângulo da grã; valores entre parênteses representam o desvio-padrão (kg/m³).

As dimensões e o formato dos corpos de prova para os ensaios de embutimento seguiram as recomendações da norma americana ASTM D5764-97a (ASTM, 2013) com meio furo, conforme apresentado na Figura 20. As dimensões e o formato de corpo de prova foram discutidos na seção 2.5.2.

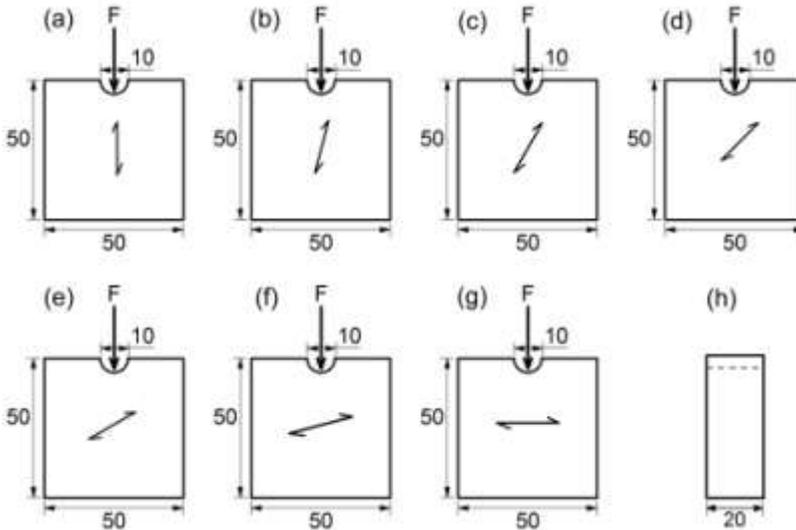


Figura 20. Vista frontal dos corpos de prova de embutimento com indicação inclinação da grã por seta: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75°, (g) 90°. Vista lateral do corpo de prova (h). F é a força aplicada. Dimensões são em mm.

3.3 TESTES DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

Os testes de resistência ao embutimento foram realizados conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D5764-97a (ASTM, 2013). Eles foram efetuados no interior de uma câmara térmica acoplada à máquina universal de ensaios da marca KRATOS (Figura 21). Esse procedimento garantiu que os testes de embutimento fossem realizados na temperatura desejada, ou seja, a madeira permaneceu aquecida na temperatura estipulada durante os testes. A força foi aplicada de modo monotônico no sentido de compressão, com velocidade constante de 1,9 mm/min. Ela foi mensurada por meio de uma célula de carga de 200 kN. O registro da força, a mensuração e o registro do deslocamento durante

os testes foram feitos pelo sistema de aquisição de dados da máquina de ensaios.

Os testes de embutimento foram finalizados quando o deslocamento da travessa da máquina de ensaios em relação ao parafuso era igual a 5 mm ou quando a força máxima era atingida, dependendo do que ocorria primeiro.

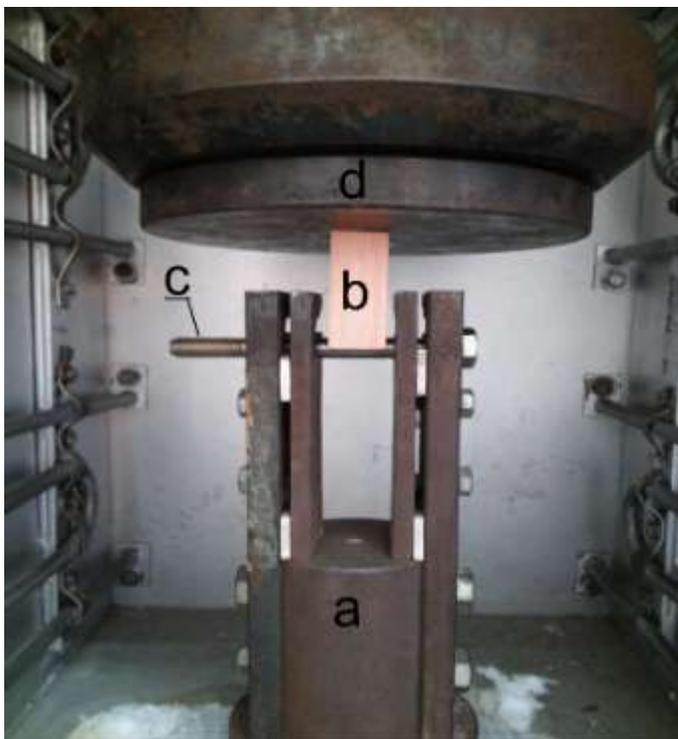


Figura 21. Aparato do ensaio de embutimento: (a) suporte; (b) corpo de prova; (c) pino metálico; (d) prato de compressão.

3.4 AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram pré-aquecidos durante 120 min em uma estufa elétrica com dimensões 90 cm × 100 cm × 66 cm e controle automático de temperatura com ± 1 °C de precisão. O tempo de pré-aquecimento foi obtido por um estudo preliminar que consistia em determinar o tempo necessário para a homogeneização da temperatura no interior do corpo de prova com a temperatura da estufa elétrica. O tempo

de aquecimento foi determinado quando a diferença entre a temperatura do interior da estufa elétrica e do corpo de prova era de $\pm 5\%$, conforme indicado nas figuras 47 e 48 no Apêndice B.

Na Tabela 8, são apresentados os tempos de aquecimento dos corpos de prova para cada temperatura e cada espécie. Esses tempos foram obtidos por meio da análise dos gráficos do Apêndice B (figuras 47 e 48). O tempo de aquecimento é função da temperatura interna da estufa elétrica e do teor de umidade inicial da madeira. Quanto maior a diferença entre a temperatura interna da estufa elétrica e do corpo de prova, maior é o fluxo de calor por irradiação, conseqüentemente reduzindo o tempo de aquecimento do corpo de prova. A dependência do teor de umidade dos corpos de prova do tempo de aquecimento se dá em função da necessidade de aquecimento da água contida na madeira. Isso demanda uma maior quantidade de energia térmica a ser transferida ao corpo de prova para o aquecimento e para a evaporação da água e posterior secagem da madeira. Segundo Pereira *et al.* (2010), na fase de secagem da madeira, a qual ocorre entre 50 e 100 °C, mais energia para retirar a água da madeira é necessária, caracterizando esse processo como endotérmico.

Tabela 8. Tempo de aquecimento dos corpos de prova.

Temperatura (°C)	Tempo de aquecimento (min)	
	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
40	119	119
50	119	119
60	115	119
80	118	120
100	102	119
120	84	112
140	56	96
160	63	69
180	38	54

O tempo de aquecimento das espécies de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna* apresentam diferenças entre si. Isso acontece em temperaturas superiores a 100 °C. Possivelmente, essa diferença é devida à diferença entre os teores iniciais de umidade da madeira. O teor de umidade inicial dos corpos de prova de *Eucalyptus saligna* era de aproximadamente 12% a 25 °C, enquanto que os corpos de prova em *Pinus elliottii* apresentavam o teor de umidade inicial de aproximadamente 10%. O tempo de aquecimento influencia as propriedades mecânicas da madeira. Com intuito de submeter todos os corpos de prova ao mesmo

tempo de aquecimento, esse foi definido com sendo 120 min, pois tratava-se do tempo máximo necessário para aquecer os corpos de prova na temperatura estipulada (Tabela 8).

3.5 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE EMBUTIMENTO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

Para cada teste, foi obtida uma curva força \times deslocamento, a partir da qual foram determinados a força de embutimento usada no cálculo da resistência ao embutimento e o seu respectivo deslocamento. Eles foram obtidos seguindo dois procedimentos distintos: um definido pelo critério da norma ASTM D5764-97a (ASTM, 2013) e outro pelo critério da norma EN 383:2007 (CEN, 2007).

3.5.1 Critério da norma ASTM D5764-97a

A força de embutimento para o cálculo da resistência ao embutimento segundo a norma ASTM D5764-97a (ASTM, 2013) é determinada pela intersecção da curva força \times deslocamento por uma reta paralela ao trecho elástico da curva, porém com a origem deslocada de uma distância equivalente a 5% do diâmetro do pino metálico usado no teste (Figura 22). Na intersecção da curva e da reta paralela também foi determinado o deslocamento.

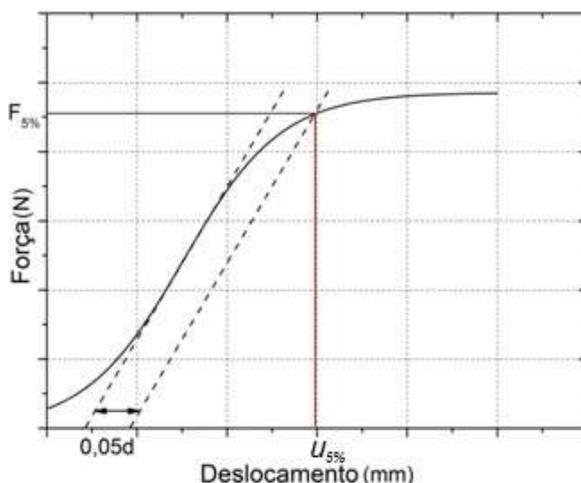


Figura 22. Força de embutimento de acordo com a norma ASTM D5764-97a e o seu respectivo deslocamento. Fonte: autor.

3.5.2 Critério da norma EN 383:2007

A força de embutimento para o cálculo da resistência ao embutimento segundo norma EN 383:2007 (CEN, 2007) é determinada quando o deslocamento do corpo de prova em relação ao pino metálico atinge o valor de 5 mm ou quando a força máxima for atingida, aquele que ocorrer primeiro (Figura 23). O deslocamento foi determinado na força máxima de embutimento ou foi igual a 5 mm.

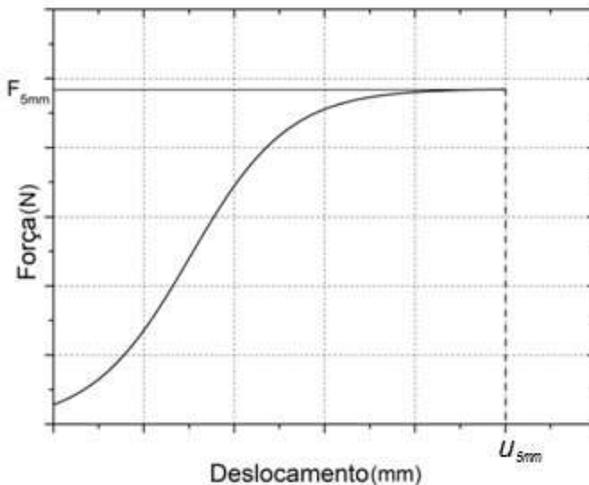


Figura 23. Força de embutimento de acordo com a norma EN 383:2007 e o seu respectivo deslocamento. Fonte: autor.

3.6 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

A resistência ao embutimento ($f_{e,\alpha\theta}$), em MPa, foi calculada por meio da Equação (4).

$$f_{e,\alpha\theta} = \frac{F_e}{d \cdot t}, \quad (4)$$

sendo F_e a força de embutimento em N, d o diâmetro do pino em mm e t a espessura do corpo de prova em mm.

3.7 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO MÉDIA

A resistência ao embutimento média ($f_{e,\alpha\theta,m}$), para cada combinação de temperatura e ângulo da grã, foi calculada por meio da média aritmética dos dados.

3.8 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA

A resistência ao embutimento característica ($f_{e,\alpha\theta,k}$) foi calculada, para cada combinação entre a temperatura e o ângulo da grã, usando-se a Equação (4) e a metodologia estatística da distribuição t de Student com $n-1$ graus de liberdade (MIRSHAWKA, 1981). O procedimento estatístico utilizado foi baseado em metodologias de normas como ASTM D5764-97a e EN 383:2007. A resistência característica representa o menor valor que possui apenas 5% de probabilidade de ser ultrapassado em lote.

$$f_{e,\alpha\theta,k} = f_{e,\alpha\theta,m} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

sendo $f_{e,\alpha\theta,m}$ a média da resistência ao embutimento, t o valor tabelado da distribuição t de Student, s o desvio-padrão e n o número de corpos de prova da amostra.

3.9 FATORES DE MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA

Os fatores de modificação ($k_{e,\alpha\theta}$) foram calculados em função da temperatura e dos ângulos da grã, a partir dos valores de resistência característica ao embutimento, por meio da Equação (6). O cálculo dos fatores de modificação foi baseado nas norma EN 1995-1-2:2004, NCH 1998 e NDS:2015, nas quais são propostos fatores de redução para as propriedades mecânicas da madeira em função da temperatura, dividindo-se o valor da resistência obtida à temperatura elevada pela resistência obtida à temperatura ambiente (25 °C).

$$k_{e,\alpha\theta} = \frac{f_{e,\alpha\theta,k}}{f_{e,0^{\circ}25^{\circ}C,k}}, \quad (6)$$

sendo $f_{e,\alpha\theta,k}$ a resistência característica ao embutimento para cada combinação entre ângulo de inclinação e temperatura e $f_{e,0^\circ 25^\circ\text{C},k}$ a resistência característica ao embutimento paralelo a 25 °C.

3.10 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO TEÓRICA

A resistência ao embutimento teórica foi obtida por meio das Equações (7) e (8) da norma NDS:2015 e das Equações (9), (10), (11) e (12) da norma EN 1995-1-1:2004. Essas equações utilizam como parâmetros a massa específica e o diâmetro do pino para calcular os valores das resistências ao embutimento paralela e perpendicular.

$$f_{h,0} = 0,07725 \cdot \rho_k, \quad (7)$$

$$f_{h,90} = 212(0,001 \cdot \rho_k)^{1,45} \cdot d^{-0,5}, \quad (8)$$

$$f_{h,0} = 0,082(1 - 0,01d) \cdot \rho_k, \quad (9)$$

$$f_{h,90} = \frac{f_{h,0}}{k_{90}}, \quad (10)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \text{ (coníferas)}, \quad (11)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \text{ (folhosas)}, \quad (12)$$

sendo $f_{h,0}$ a resistência ao embutimento paralela (MPa), $f_{h,90}$ a resistência ao embutimento perpendicular (MPa), ρ_k a massa específica da madeira (kg/m^3) e d o diâmetro do pino metálico (mm).

3.11 COEFICIENTE DE RIGIDEZ DE EMBUTIMENTO INICIAL

O coeficiente de rigidez de embutimento inicial ($K_{i,\theta,\alpha}$) foi calculado a partir da inclinação da reta que liga os pontos correspondentes a 10% e 40 % da resistência ao embutimento, determinada segundo a metodologia da norma ASTM D5764-97a (Figura 24).

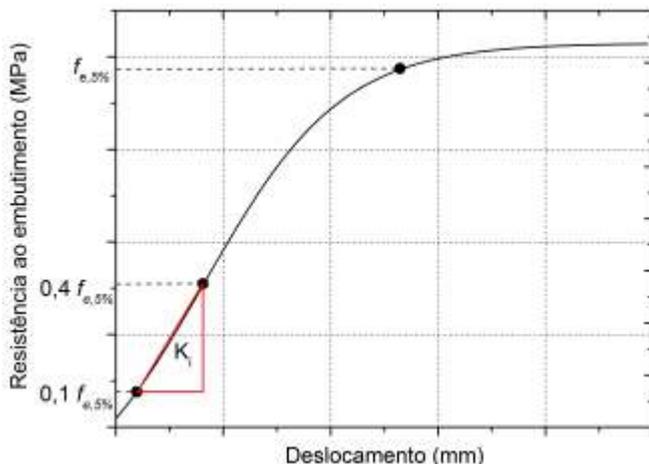


Figura 24. Coeficiente de rigidez de embutimento inicial. Fonte: autor.

3.12 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade de cada corpo de prova foi determinado logo após os testes de resistência ao embutimento. O corpo de prova foi pesado em balança analítica com precisão de 0,01 g, obtendo-se a massa úmida. Ao final da série de ensaios, os mesmos foram colocados em uma estufa elétrica a 103 ± 2 °C para realização da secagem. A massa seca foi obtida após a ocorrência de uma variação menor ou igual a 0,5% entre duas medidas consecutivas da massa. De posse dos valores das massas úmida e seca de cada corpo de prova, foi determinado o teor de umidade, usando-se a Equação (13).

$$T.U = \frac{mu - ms}{ms} \cdot 100, \quad (13)$$

sendo $T.U.$ o teor de umidade (%), mu a massa úmida (g) e ms a massa seca (g);

3.13 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE A 12% DE UMIDADE

A massa específica aparente de cada corpo de prova foi determinada antes do aquecimento e da realização dos testes de embutimento, quando a madeira tinha teor de umidade de 12%. As dimensões dos

corpos de prova foram medidas com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm e as massas dos mesmos foram mensurados em balança analítica com precisão de 0,01 g. De posse dos valores, a massa específica foi calculada conforme a Equação (14).

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}}, \quad (14)$$

sendo $\rho_{12\%}$ a massa específica aparente a 12% (kg/m³); $m_{12\%}$ a massa a 12% de umidade (kg) e $v_{12\%}$ o volume a 12% de umidade (m³).

3.14 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os procedimentos estatísticos usados na análise dos dados obtidos nesta pesquisa foram: teste de análise de variância (ANOVA) e seus pressupostos, teste Kruskal-Wallis, teste de pairing e modelo de regressão polinomial (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Antecedendo os testes da ANOVA, foi verificada a existência de valores espúrios de resistências ao embutimento para cada temperatura e ângulo de inclinação da grã (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Nessa análise, foram identificados esses valores em relação a média, porém optou-se por não retirar os mesmos, pois os corpos de prova já haviam sido selecionados de modo que as massas específicas das amostras fossem homogêneas entre si e os corpos de prova livres de defeitos, fatores que poderiam causar a ocorrência dos valores espúrios de resistência ao embutimento. Adicionalmente, considera-se que a variabilidade dos resultados é inerente à determinação das propriedades mecânica da madeira.

3.14.1 Análise de variância (ANOVA)

A ANOVA tem como hipótese nula (H_0) a igualdade das médias e, em caso de rejeição de H_0 , aplica-se o teste de Tukey para a obtenção das médias estatisticamente diferentes, com nível de confiança de 95% (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). A ANOVA e o teste Tukey foram aplicados na comparação de médias das resistências ao embutimento entre temperatura para todos os ângulos de inclinação da grã para a madeira de *Pinus elliotii*. Já para a madeira de *Eucalyptus saligna*, não foi possível aplicar a ANOVA e o teste Tukey em todos os ângulos, pois não foram atendidos os pressupostos de normalidade dos dados, homogeneidade de variância e independência dos resíduos. Assim, nos

ângulo de 15, 30, 60, 75 e 90°, aplicou-se a ANOVA e, nos ângulo de 0° e 15°, o teste Kruskal-Wallis (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Adotou-se como variável ou fator independente a temperatura e variável dependente a resistência ao embutimento.

Os resultados obtidos segundo as metodologias das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para a determinação da resistência ao embutimento também foram comparados por meio da ANOVA. Assim, atribuiu-se como variável ou fator independente a metodologia das normas e variável dependente a resistência ao embutimento.

a. Verificação dos pressupostos da ANOVA

Antecedendo a ANOVA, foram verificados os pressupostos de normalidade dos dados, homogeneidade de variância e independência dos resíduos (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Para avaliar a normalidade, foi aplicado o teste de Anderson-Darling. A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett e a independência por meio da análise do gráfico dos resíduos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Em caso de rejeição de algum dos pressupostos de normalidade dos dados e/ou de homogeneidade das variâncias, a ANOVA não pode ser aplicada para comparação das médias das resistências ao embutimento. Então, aplicou-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis (MONTGOMERY; RUGER, 2003).

3.14.2 Teste Kruskal-Wallis

O teste não paramétrico Kruskal-Wallis (MONTGOMERY; RUGER, 2003) tem como hipótese nula (H_0) a igualdade da função de distribuição entre as populações. No caso de rejeição de H_0 , aplicou-se o teste de comparação múltipla pelo método de Bonferroni com um nível de significância de 5% (MONTGOMERY; RUGER, 2003).

3.14.3 Teste de pairing

Os resultados experimentais obtidos para a resistência ao embutimento inclinado em relação à grã da madeira, para cada temperatura, foram comparados com os resultados das resistências ao embutimento estimados a partir da fórmula de Hankinson (Equação (15), por meio do teste de *pairing*, citado por Lahr (1983). Esse teste avalia se a média dos desvios entre os resultados experimentais e dos estimados pela fórmula de Hankinson pode ser admitida como nula, sendo obtida pela Equação

(16). Se a média dos desvios contiver o “zero”, as médias dos valores experimentais e estimados são iguais e, portanto, os valores são estatisticamente equivalentes.

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0} \cdot f_{e,90}}{f_{e,0} \cdot \text{sen}^n \alpha + f_{e,90} \cdot \text{cos}^n \alpha}, \quad (15)$$

sendo $f_{e,\alpha}$ a resistência ao embutimento inclinada em relação à grã da madeira, $f_{e,0}$ a resistência ao embutimento paralela, $f_{e,90}$ a resistência ao embutimento perpendicular, α é o ângulo de inclinação da grã e n é o expoente do termo trigonométrico.

$$\bar{d} - \frac{t_{\alpha/2, n-1} S_D}{\sqrt{n}} \leq \mu_D \leq \bar{d} + \frac{t_{\alpha/2, n-1} S_D}{\sqrt{n}}, \quad (16)$$

sendo \bar{d} a estimativa das médias dos desvios, $t_{\alpha/2, n-1}$ o valor estatístico t para $n-1$ graus de liberdade e 95% de confiança, S_D o desvio-padrão da amostra, n o tamanho da amostra e μ_D a média dos desvios-padrão.

Foram testados os intervalos de expoentes “ n ” de 1,0 a 2,5 com incrementos de 0,1, obtendo-se o intervalo com nível de significância de 95%. A escolha do expoente com melhor ajuste foi realizada por meio da avaliação do coeficiente de correlação entre os dados experimentais e calculados (MONTGOMERY; RUGER, 2003), escolhendo-se o expoente com maior coeficiente de correlação.

3.14.4 Regressão polinomial

A regressão polinomial foi usada para obter os fatores de modificação da resistência ao embutimento paralela e perpendicular característica em função da temperatura. Nas regressões polinomiais das resistência ao embutimento paralela e perpendicular, a variável resposta foi o fator de modificação e a variável explicativa foi a temperatura. Essas regressões foram inseridas no modelo matemático baseado na fórmula de Hankinson e utilizados para elaborar os gráficos de superfície.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões contemplam os seguintes itens: (1) a avaliação dos resultados para a definição da metodologia para a determinação da resistência ao embutimento da madeira submetidos a diferentes níveis de temperatura e ângulos da grã; (2) a avaliação da influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência e no coeficiente de rigidez de embutimento inicial e (3) a proposição de modelos matemáticos para representar os fatores de modificação característicos em função da temperatura e do ângulo da grã. Os itens 2 e 3 somente foram realizados com os dados obtidos a partir da metodologia de determinação da resistência ao embutimento considerada mais adequada.

4.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS PARA DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DOS TESTES DE EMBUTIMENTO

Nesta subseção, apresentam-se a avaliação dos resultados para a proposição de uma metodologia de ensaios de embutimento da madeira a temperaturas elevadas e com diferentes ângulos da grã. Essa avaliação foi realizada a partir da análise dos seguintes itens: tamanho da amostra, dimensões dos corpos de prova, tempo de aquecimento dos corpos de prova, força de embutimento e deslocamentos médios do pino na força de embutimento. Determinaram-se também os fatores de modificação em função da temperatura e do ângulo entre a força e a grã da madeira. Após a análise desses critérios foram estabelecidas etapas de uma metodologia a ser adotada para os testes de determinação da resistência embutimento da madeira à temperatura elevada.

4.1.1 Tamanho da amostra

O tamanho da amostra de corpos de prova a ser usada no ensaio de embutimento sob temperaturas elevadas deve ser definido por meio de análise estatística, sendo necessário estabelecer critérios como: o valor crítico que corresponde ao nível de confiança desejado, erro máximo da estimativa e o desvio-padrão ou coeficiente de variação. O valor crítico ($Z_{\alpha/2}$) é obtido da distribuição normal e associado ao nível de confiança, sendo que o mais utilizado na área de Engenharia é 95 %. Já o erro máximo da estimativa é definido de acordo com o esperado ou que se deseja para a média amostral. Por fim, o desvio-padrão ou coeficiente de variação é função da propriedade mecânica que está sendo estudada e são obtidos por meio de resultados experimentais prelimina-

res, de revisão bibliográfica e de normas. Por exemplo, na norma NBR 7190:1997 considera-se que o coeficiente de variação para a resistência a esforços normais (compressão e tração) é de 18% e a esforços tangenciais (cisalhamento) é de 28%. Quando há a necessidade de se obter o coeficiente de variação para uma propriedade específica, como é o caso da resistência ao embutimento, pode-se obter esses valores em trabalhos já desenvolvidos ou fazer a caracterização da madeira para essa propriedade.

O coeficiente de variação para a resistência ao embutimento pode variar em função da espécie, temperatura e direções paralela e perpendicular, conforme verificado por Manriquez (2012). Devido a isso, foi realizada uma caracterização preliminar da madeira com objetivo de determinar o tamanho da amostra a ser utilizada na presente pesquisa. Esses resultados são apresentados no Apêndice A.

Os coeficientes de variação ou desvios-padrão dos dados preliminares (Tabela 32) foram diferentes entre as diferentes combinações de temperaturas e dos ângulos da grã, resultando em tamanhos de amostras diferentes para cada combinação de temperatura e de ângulo. O máximo valor de coeficiente de variação foi de 35,7% para o ângulo de 45° e temperatura de 120 °C e o mínimo valor foi de 5,2% para o ângulo de 15° e temperatura de 140 °C (Tabela 32). Para o máximo valor do coeficiente de variação, o tamanho necessário da amostra para atingir o nível de confiança de 95% foi de 49 corpos de prova. Porém, esse número de corpos de prova é economicamente inviável. Portanto, determinou-se o tamanho da amostra a partir da média aritmética dos tamanhos definidos para cada combinação de temperatura e de ângulo da grã, resultando 10 corpos de prova para cada combinação.

Nas Tabelas 9 e 10, observa-se que a utilização de 10 corpos de prova para cada combinação, em ambas espécies de madeira, implica que em algumas combinações de temperatura e de ângulos da grã, o tamanho da amostra não foi suficiente para atingir 95% de confiança para a média da resistência ao embutimento. Para o *Pinus elliottii*, o tamanho da amostra não foi suficiente para garantir 95% de confiança em 23 das 70 combinações de temperatura e ângulo da grã, conforme apresentado na Tabela 11 e destacados em amarelo. Já para o *Eucalyptus saligna*, o tamanho da amostra adotado não assegurou a confiabilidade de 95% em 11 das 70 combinações (Tabela 11). Para a média da resistência ao embutimento ter intervalos de confiança de 95%, o tamanho da amostra teria que ser maior. Para o *Pinus elliottii* e o *Eucalyptus saligna*, em cada combinação de parâmetros, a amostra deveria ter 53 e 20

corpos de prova, respectivamente (Tabela 11), o que seria economicamente inviável para esta pesquisa.

Tabela 9. Níveis de confiança das amostras de *Pinus elliottii*.

θ (°C)	Ângulo da grã (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	100%	100%	96%	95%	97%	97%	93%
40	100%	98%	100%	71%	97%	93%	98%
50	95%	98%	100%	76%	61%	93%	97%
60	97%	99%	98%	97%	85%	99%	100%
80	92%	100%	99%	93%	97%	99%	100%
100	89%	96%	94%	88%	87%	95%	100%
120	98%	98%	97%	97%	84%	93%	100%
140	98%	95%	99%	98%	94%	90%	100%
160	98%	96%	92%	87%	91%	84%	98%
180	89%	99%	100%	94%	78%	96%	91%

Tabela 10. Níveis de confiança das amostras de *Eucalyptus saligna*.

θ (°C)	Ângulo da grã (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	89%	98%	93%	98%	96%	100%	92%
40	98%	99%	100%	100%	99%	100%	99%
50	94%	100%	100%	100%	100%	100%	98%
60	100%	99%	97%	100%	99%	100%	100%
80	91%	100%	100%	99%	100%	100%	99%
100	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
120	96%	100%	99%	93%	100%	99%	100%
140	90%	98%	99%	100%	97%	100%	100%
160	100%	88%	100%	99%	100%	100%	98%
180	84%	95%	95%	100%	89%	99%	91%

Tabela 11. Tamanho necessário da amostra para o nível de confiança de 95%.

θ (°C)	<i>Pinus elliottii</i>							<i>Eucalyptus saligna</i>						
	Ângulo da grã (°)													
	0	15	30	45	60	75	90	0	15	30	45	60	75	90
25	4	3	9	11	9	8	12	15	8	12	7	9	5	12
40	5	7	5	34	8	11	7	7	6	4	1	5	4	6
50	10	7	3	28	53	11	8	11	3	2	2	2	4	7
60	8	5	7	8	19	6	2	2	6	8	2	5	3	3
80	12	1	6	12	8	6	4	13	4	4	5	4	3	5
100	15	9	11	17	17	10	3	7	5	6	4	4	1	4
120	7	7	9	8	19	11	2	9	3	5	12	2	6	2
140	7	10	6	7	11	15	4	14	6	6	4	8	2	5
160	7	9	13	17	14	19	7	3	17	3	6	4	5	8
180	15	7	4	11	26	8	14	20	10	10	4	15	4	13

Em que: θ é a temperatura.

4.1.2 Dimensões dos corpos de prova

Os corpos de prova de embutimento apresentados na norma americana (ASTM D5764-97a) com meio furo apresentam vantagens em relação às outras normas, como: menor consumo de madeira e podem ser confeccionados a partir de peças de madeira serrada com menor largura. Essas vantagens foram discutidas e apresentadas com maiores detalhes na Seção 2.6.2. Portanto, recomenda-se que esses corpos de prova sejam utilizados em testes de embutimento.

4.1.3 Tempo de aquecimento dos corpos de prova

O tempo de aquecimento deve ser determinado a partir de um estudo preliminar, conforme descrito na seção 3.4. Este estudo auxilia a determinação do tempo de aquecimento do corpo de prova para cada temperatura estudada. No estudo simultâneo de várias temperaturas, o tempo de aquecimento deve ser definido como sendo maior tempo de aquecimento registrado, a fim de não introduzir mais uma variável no processo.

4.1.4 Resistência ao embutimento média

Nas figuras 25 e 26, apresentam-se os resultados das resistências ao embutimento média e os desvios-padrão determinadas para a madeira de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna*. Esses valores foram obtidos seguindo os critérios de determinação da força de embutimento das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007. Observam-se, para ambas as espécies, que os valores das resistências ao embutimento determinadas pela norma europeia (EN 383:2007) foram superiores aos da norma americana (ASTM D5764-97a).

Os coeficientes de variação das médias das resistências ao embutimento determinados de acordo com cada norma apresentam diferenças. Para a espécie *Pinus elliottii*, os coeficientes de variação dos resultados obtidos segundo o método da norma EN 383:2007 situavam-se entre 8% e 27%, enquanto que os obtidos segundo o método da norma ASTM D5764-97a situavam-se entre 6% e 37%. Já para a espécie *Eucalyptus saligna*, os coeficientes de variação obtidos segundo o método da norma europeia situavam-se entre 6% e 36% e segundo o método da norma americana entre 4% e 23%. Na literatura, são encontrados coeficientes de variação entre 9% e 18% para o método da norma europeia e entre 13% e 18% para o método da norma americana (SANTOS *et al.*, 2010; FRANKE e MAGNIÈRE, 2016; GARCIA e ITAGAKI, 2014, SAWATA e YASUMURA, 2002). Contudo, os coeficientes de variação obtidos com as resistências calculadas conforme a metodologia da norma americana apresentaram maior frequência de resultados inferiores a 20%, com médias de 16% e de 12% para o *Pinus elliottii* e o *Eucalyptus saligna*, respectivamente. Portanto, os resultados obtidos por meio do método da norma americana são considerados mais homogêneos, pois apresentaram menor dispersão que aqueles obtidos segundo a norma europeia.

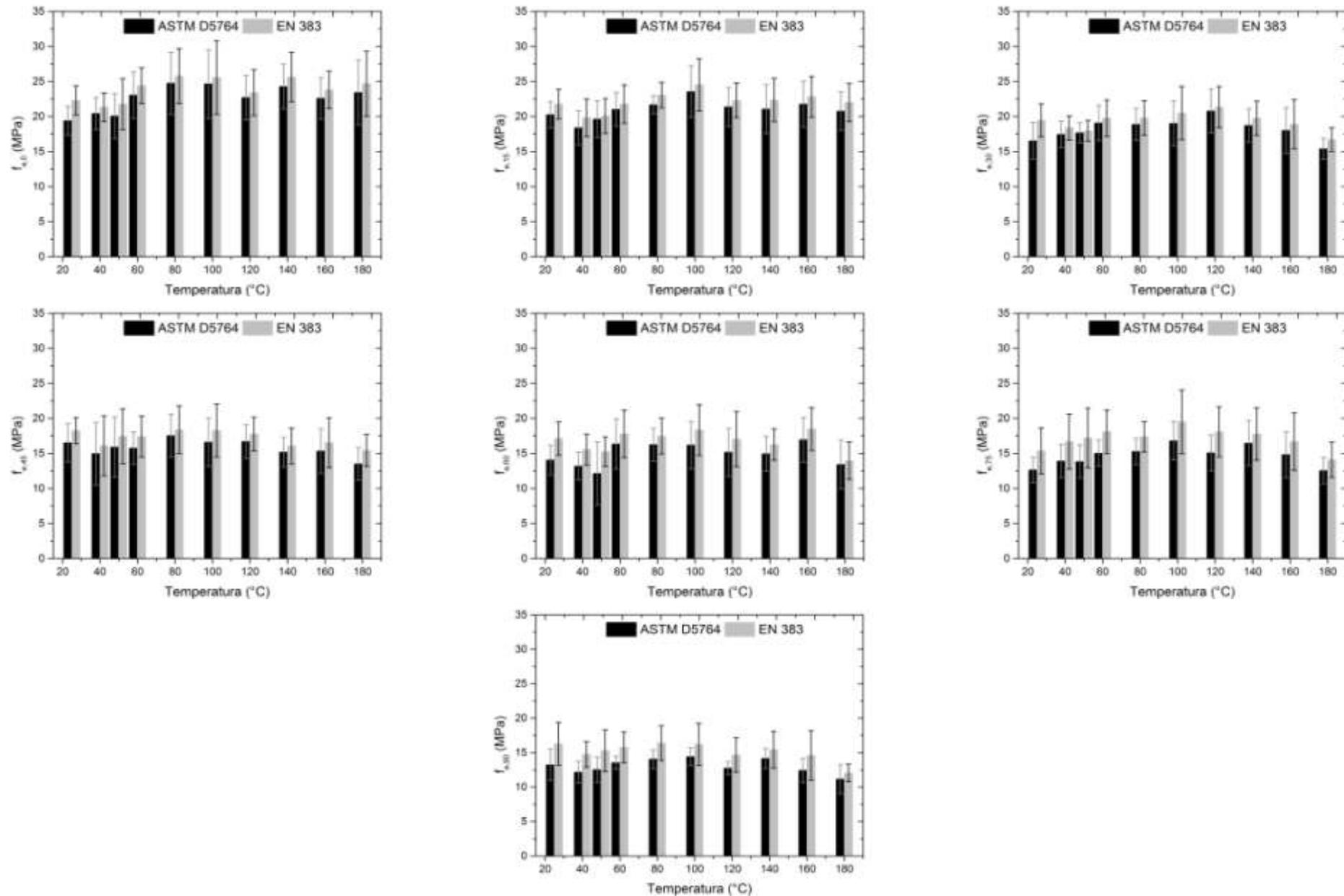


Figura 25. Resistências ao embutimento médias determinadas seguindo as recomendações das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o *Pinus elliottii*.

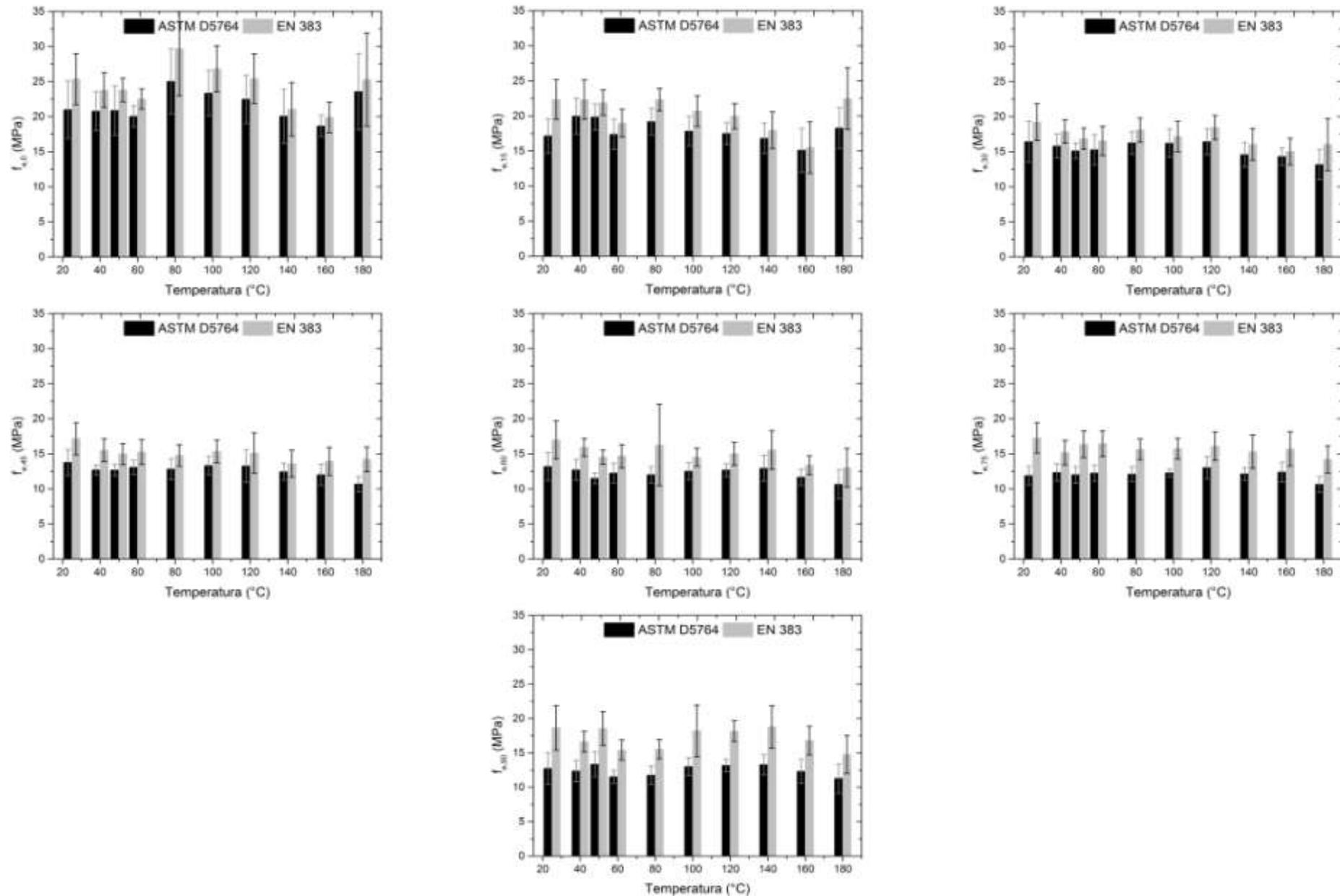


Figura 26. Resistências ao embutimento médias determinadas seguindo as recomendações das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o *Eucalyptus saligna*.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados das comparações de médias entre as resistências ao embutimento determinadas segundo os critérios das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para a madeira de *Pinus elliottii*. Em quase todas as combinações de temperaturas e ângulos da grã, as resistências médias não apresentaram diferença estatisticamente significativas. Para os ângulos da grã de 0 e de 30°, existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias obtidas segundo as duas normas somente a 25 °C. Já para os ângulos de 15 e de 45°, essas diferenças não foram observadas. Para os ângulos da grã de 75° e de 90°, as diferenças ocorrem em maior quantidade entre 25 e 80 °C.

Tabela 12. Teste de comparação de médias das resistências ao embutimento obtidos segundo os critérios da ASTM D5764-97a e da EN 383:2007 para o *Pinus elliottii*.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	∃	∄	∃	∄	∃	∃	∃
40	∄	∄	∄	∄	∃	∄	∃
50	∄	∄	∄	∄	∄	∃	∃
60	∄	∄	∄	∄	∄	∃	∃
80	∄	∄	∄	∄	∄	∃	∃
100	∄	∄	∄	∄	∄	∄	∄
120	∄	∄	∄	∄	∄	∃	∄
140	∄	∄	∄	∄	∄	∄	∄
160	∄	∄	∄	∄	∄	∄	∄
180	∄	∄	∄	∄	∄	∄	∄

Onde θ é a temperatura, α é o ângulo de inclinação da grã, \exists existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das resistências, \nexists não existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das resistências.

Para a madeira de *Eucalyptus saligna* foram realizadas as mesmas comparações que para a madeira de *Pinus elliottii*. Os resultados dos testes de comparação de médias por meio da ANOVA (Tabela 13) mostraram que, para quase todas as temperaturas e em todos os ângulos da grã, as médias das resistências obtidas conforme as metodologias das normas americana e europeia apresentaram diferenças estatísticas significativas.

Tabela 13. Teste de comparação de médias das resistências ao embutimento obtidos pelos critérios da ASTM D5764-97a e EN 383:2007 para o *Eucalyptus saligna*.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	∃	∃	∃	∃	∃	∃	∃
40	∃	∄	∃	-	∃	∃	∃
50	-	∃	∃	∃	∃	∃	∃
60	∃	∄	∄	∃	∃	∃	∃
80	∄	∃	∃	∃	-	∃	∃
100	∃	∃	∄	∃	∃	-	∃
120	∄	∃	∃	∄	∃	∃	∃
140	∄	∄	∄	∄	∃	-	-
160	∄	∄	∄	∃	∃	∃	∃
180	∄	∃	∃	∃	∃	∃	∃

Onde θ é a temperatura, α é o ângulo de inclinação da grã, \exists existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das resistências, \nexists não existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das resistências.

A definição de um método para a determinação da força de embutimento é necessária, pois os valores obtidos segundo as metodologias das normas discutidas apresentam diferenças estatisticamente significativas. Essa definição torna-se importante para permitir a comparação dos resultados oriundos de pesquisas diferentes e para a padronização dos critérios de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira (FRANKE e MAGNIÈRA, 2016).

A análise estatística dos resultados provenientes das duas metodologias de determinação da força de embutimento não foi conclusiva. Isso se deve aos seguintes motivos: os coeficientes de variação das duas normas foram muito próximos, porém a metodologia da norma americana mostrou uma média de coeficiente de variação ligeiramente inferior ao da norma europeia; as diferenças entre os valores das resistências ao embutimento na maioria das combinações de temperatura e de ângulos da grã foram estatisticamente significativas apenas para a espécie *Eucalyptus saligna* (Tabela 13); para o *Pinus elliottii*, as diferenças significativas ocorrem em algumas combinações de temperatura e de ângulo (Tabela 12). Portanto, devem ser analisados outros critérios para o estabelecimento da metodologia mais adequada, são eles: resistência ao embutimento característica, deslocamento médio do pino e fatores de modificação característicos.

4.1.5 Resistência ao embutimento característica

Nas figuras 27 e 28, são apresentadas as resistências ao embutimento características das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente, determinadas segundo os critérios das normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007. As resistências ao embutimento características determinadas conforme a norma europeia são superiores aos da norma americana para as duas espécies, sendo 10% superior para o *Pinus elliottii* e 20% para o *Eucalyptus saligna*. Segundo Franke e Magnière (2016), as resistências ao embutimento obtidas segundo os métodos das normas europeia e americana podem diferir em até 76%.

Os valores de resistências ao embutimento característicos obtidos segundo a norma ASTM D5764-97a mostram-se mais conservadores, podendo levar a utilização de um maior número de pinos ou maiores dimensões em largura e espessura das peças da estrutura de madeira. Em ligações de madeira submetidas ao fogo, as espessuras dos elementos aumentam o tempo de resistência ao incêndio, sendo um fator importante no projeto desse tipo de ligação (AUDEBERT, DHIMA, *et al.*, 2013). Devido a isso, recomenda-se que a resistência ao embutimento característica sob temperaturas elevadas seja calculada a partir dos resultados de resistência determinados de acordo com a norma americana ASTM D5764-97a.

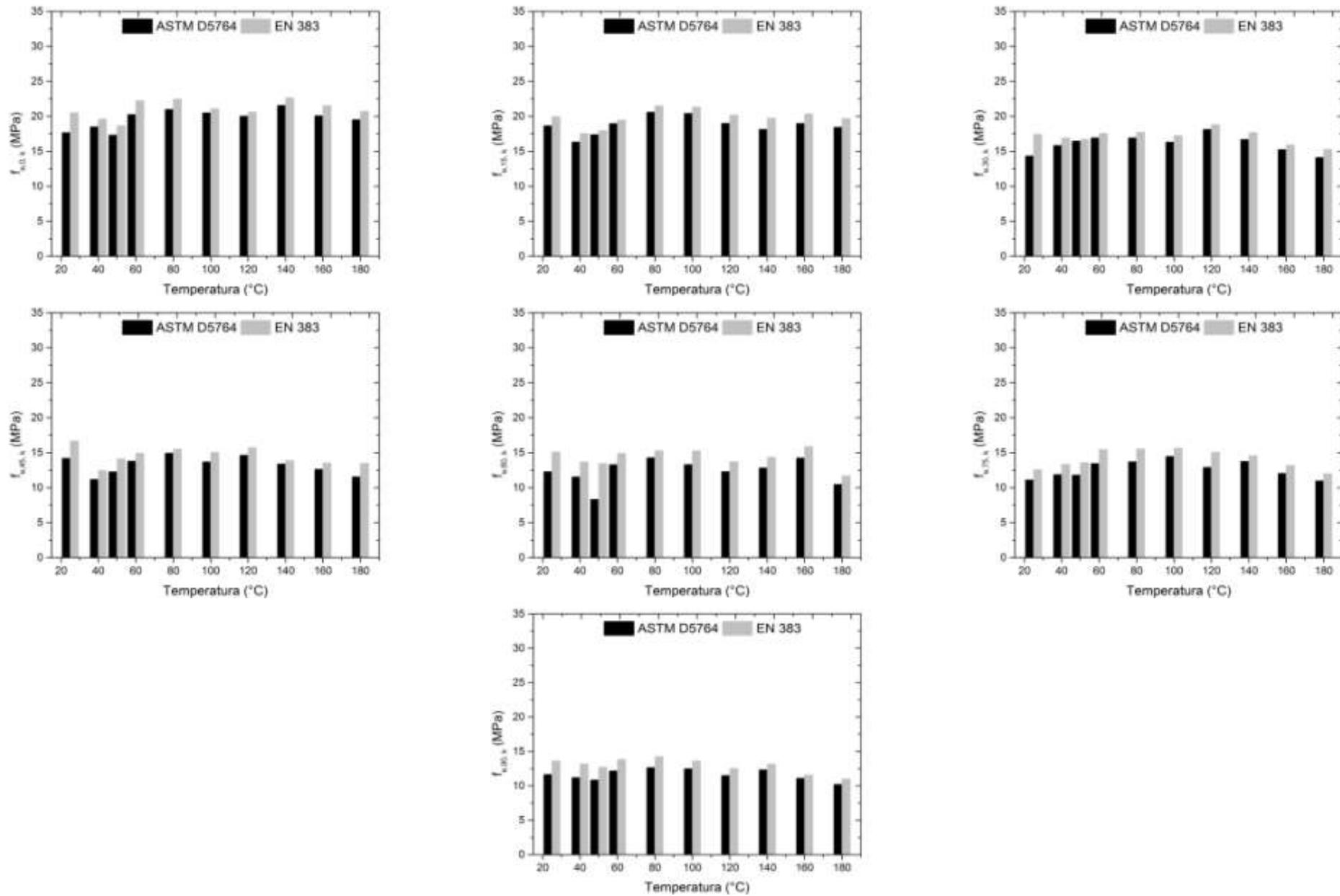


Figura 27. Resistências ao embutimento características para o *Pinus elliottii*.

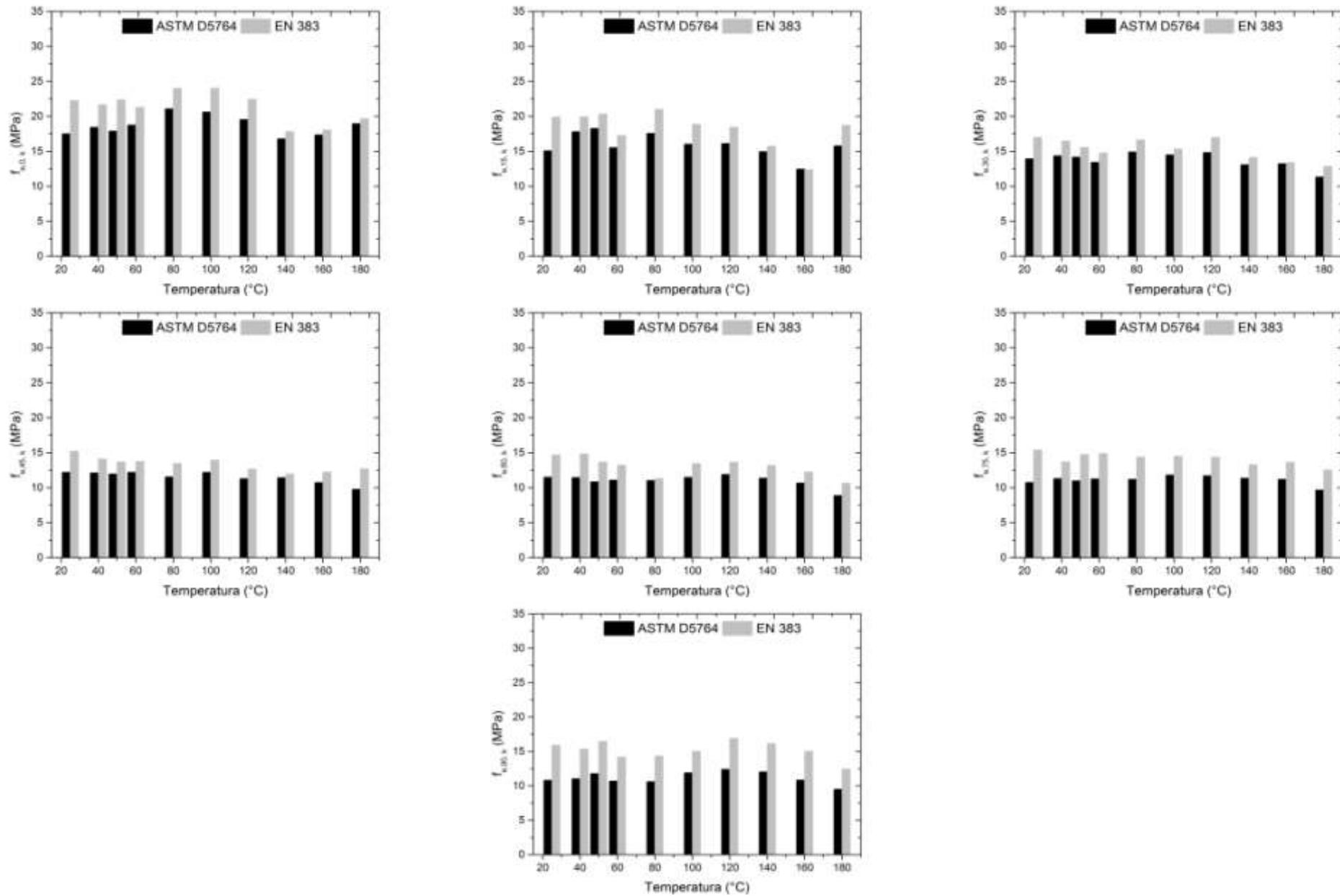


Figura 28. Resistências ao embutimento características para o *Eucalyptus saligna*.

4.1.6 Deslocamento do pino

Os deslocamentos médios do pino determinados na força de embutimento de acordo com as normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 são apresentados na Figura 29 para as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. Os resultados permitem observar que: os deslocamentos determinados na força de embutimento de acordo com a norma ASTM D5764-97a são mais homogêneos em relação aos determinados pelo critério da norma EN 383:2007 e a determinação da força de embutimento de acordo com a norma americana ocorre em deslocamentos menores. Os deslocamentos obtidos segundo a norma ASTM D5764-97a situam-se entre 1,5 e 2,5 mm, enquanto que aqueles obtidos segundo os critérios da norma EN 383:2007 estão entre 2 e 5 mm. Os resultados segundo o critério da norma americana implicam que as resistências ao embutimento sejam determinadas com um deslocamento menor. Devido a isto, o deslocamento da ligação é maior antes de ocorrer a falha da mesma, permitindo que o dimensionamento das ligações em estruturas de madeira seja mais seguro.

Portanto, a metodologia de determinação da força de embutimento da norma americana mostra-se mais adequada que a europeia, pois a força de embutimento será determinada para um deslocamento mais homogêneo e com valores de deslocamentos menores.

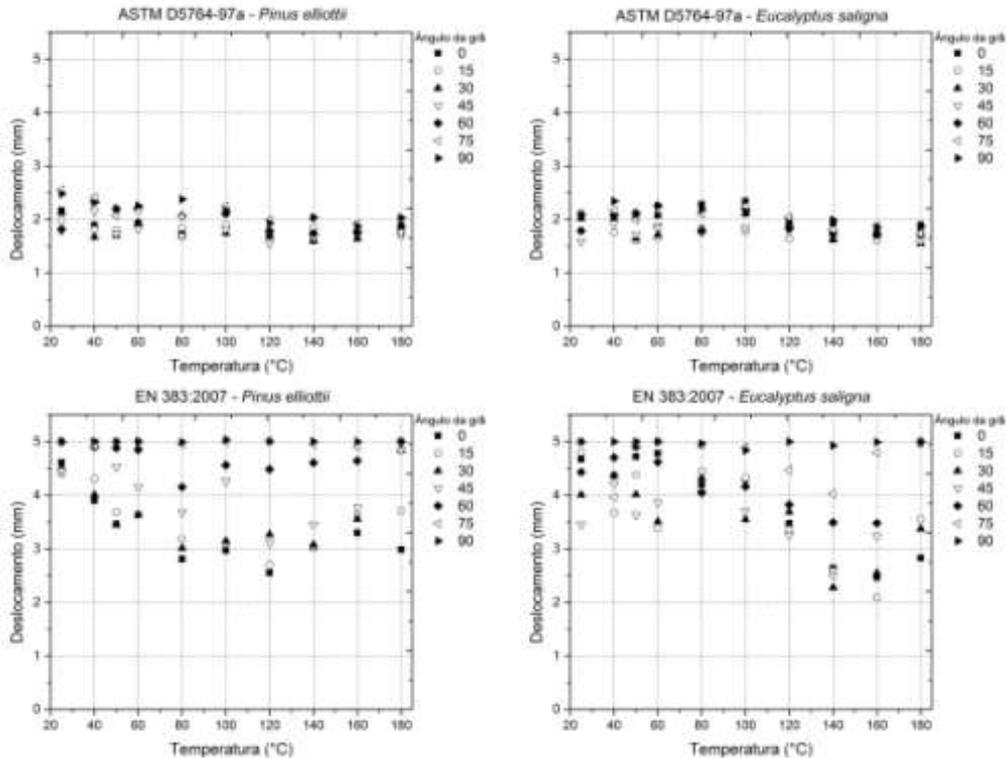


Figura 29. Deslocamento médio do pinho na força de embutimento.

4.1.7 Fatores de modificação

Na Figura 30, apresentam-se os fatores de modificação para as duas espécies de madeira estudadas e para as duas metodologias de determinação da força de embutimento. Os fatores de modificação calculados a partir das resistências de embutimento definidas pelas normas ASTM D5764-97a e EN 383:2007 foram próximos para ambas às espécies em todos os ângulos, exceto para o *Pinus elliottii* nos ângulos de 0, 15 e 30°. Nestes casos de exceção, os fatores de modificação calculados a partir da metodologia da norma americana foram superiores aos da norma europeia.

Os fatores de modificação em função da temperatura foram diferentes entre as espécies em quase todos os ângulos da grã. Para o *Eucalyptus saligna* e os ângulos de 45, 60 e 75°, os fatores de modificação praticamente permaneceram constantes com a temperatura, em torno de 0,6 para as duas metodologias de determinação da resistência ao embutimento. Para o *Pinus elliottii*, os fatores de modificação determinados segundo ambas as normas apresentaram maiores variações com a temperatura. Portanto, isso indica que as folhosas (*Eucalyptus saligna*) e as coníferas (*Pinus elliottii*) devem ser tratadas de modos diferentes.

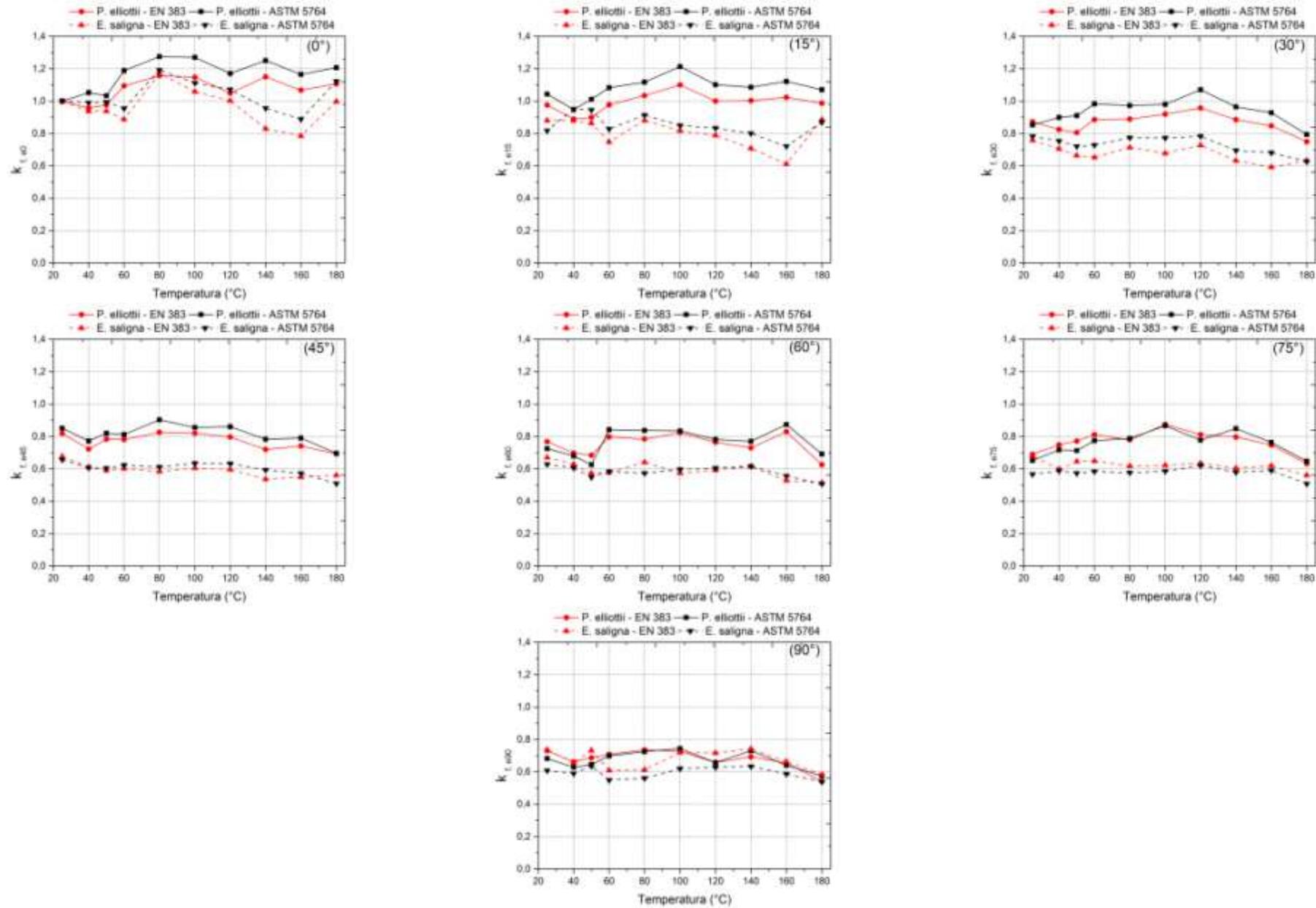


Figura 30. Fatores de modificação em função da temperatura e do ângulo da grã.

4.1.8 Conclusão da avaliação da metodologia

A partir dos resultados apresentados e discutidos, foi definido que, na presente pesquisa, os procedimentos descritos na norma ASTM D5764-97a são os mais adequados para a determinação da resistência ao embutimento. Os dois parâmetros que contribuíram para essa definição foram: deslocamento médio do pino e valores característicos da resistência ao embutimento. Os deslocamentos médios determinados conforme os critérios da norma ASTM D5764-97a foram mais homogêneos. Já os valores característicos determinados a partir da norma americana mostraram-se mais conservadores, sendo favoráveis à segurança de projetos de ligações em estruturas de madeira submetidas a altas temperaturas. Portanto, todos os resultados apresentados a seguir foram determinados de acordo com a norma americana, sendo eles: influência da temperatura na resistência ao embutimento, influência do ângulo da grã na resistência ao embutimento, valores das resistências características ao embutimento e fatores de modificação característicos em função da temperatura e ângulo da grã.

4.1.9 Etapas para determinação da resistência ao embutimento da madeira submetidas às altas temperaturas e com diferentes ângulos da grã

Os resultados apresentados anteriormente permitiram definir etapas para o procedimento de testes de embutimento e a determinação da resistência ao embutimento. Assim, é proposta uma metodologia de teste de embutimento para diferentes níveis de temperatura e ângulos da grã, sendo que os procedimentos são: determinação do tamanho da amostra, dimensões dos corpos de prova, determinação do tempo de aquecimento dos corpos de prova, testes mecânicos de embutimento, determinação da força de embutimento, da resistência ao embutimento e de fatores de modificação.

a. Amostra

A amostra em cada combinação de temperatura e ângulo da grã deve ser economicamente viável, sendo que para cada amostra deve ser informado o nível de confiabilidade dos dados. Conforme discutido na seção 4.1.1, devido à variabilidade dos resultados das resistências ao embutimento, indica-se a necessidade de estudos adicionais para definir o número de corpos de prova em cada amostra. Recomenda-se que os

corpos de prova sejam agrupados de forma que a massa específica seja homogênea estatisticamente para as diferentes combinações de temperatura e de ângulo da grã.

b. Corpos de prova

Os corpos de prova devem ser isentos de defeitos, principalmente de nós. As dimensões dos corpos de prova devem seguir as recomendações da norma americana ASTM D5764-97a para corpos de prova com meio furo. Os corpos de prova da norma americana são menores e de fácil confecção a partir das dimensões comerciais das peças de madeira oriundas de florestas plantadas.

c. Determinação do tempo de aquecimento dos corpos de prova

O aquecimento dos corpos de prova deve ser realizado em uma estufa elétrica. A temperatura da estufa quando o corpo de prova for inserido deve ser igual à temperatura que se deseja realizar os testes de embutimento, afim de evitar a rampa de aquecimento inicial da estufa. Para isso, devem-se utilizar corpos de prova oriundos da amostra que será utilizada para realizar os testes de embutimento, a fim de manter as mesmas características físicas, a espécie e a massa específica.

Para monitorar a temperatura, devem-se fazer furos na lateral (espessura) do corpo de prova, sendo que em cada furo deve-se inserir um fio termopar. A ponta quente do termopar deve estar situada no centro do corpo de prova. Os dados coletados desse monitoramento devem ser utilizados para confeccionar um gráfico tempo \times temperatura. O tempo de aquecimento é determinado quando a diferença é de $\pm 5\%$ entre a temperatura do interior da estufa e da temperatura do corpo de prova. Essa diferença de $\pm 5\%$ é recomendada, pois ocorre a estabilização da temperatura no interior do corpo de prova.

A determinação do tempo de aquecimento deve ser igual para todas as amostras e deve-se adotar o maior tempo obtido necessário para aquecimento homogêneo do corpo de prova. Isso deve ser realizado, pois o tempo de exposição da madeira a temperatura também tem influência nos valores de resistência mecânica.

d. Teor de umidade

O teor de umidade de cada corpo de prova deve ser determinado antes do aquecimento na estufa elétrica e após os testes mecânicos de resistência ao embutimento. O procedimento foi descrito na seção 3.12.

e. Testes de resistência ao embutimento

Os testes de embutimento devem ser realizados em uma máquina universal de ensaio. Esse equipamento deve ser acoplado a um forno elétrico para manter a temperatura dos corpos de prova durante os testes no nível estipulado para os testes de embutimento. Os corpos de prova devem ser pré-aquecidos antes da realização dos testes durante o tempo necessário para a homogeneização da temperatura interna, conforme o item 4.9.1.c.

f. Determinação da força de embutimento e da resistência ao embutimento

A determinação da força de embutimento e da resistência ao embutimento devem seguir as recomendações da norma ASTM D5764-97a, descritos nos itens 3.5.1 e 3.6 da presente pesquisa. O critério da norma americana mostra-se mais adequado por dois motivos: a força de embutimento é determinada para deslocamentos mais homogêneos e menores; e a resistência ao embutimento característica é menor, o que proporciona maior segurança no dimensionamento de ligações em estruturas de madeira em situação de incêndio.

g. Determinação dos fatores de modificação da resistência ao embutimento característica

Os fatores de modificação devem ser calculados conforme o procedimento descrito no item 3.9. Esses fatores de modificação utilizam a resistência ao embutimento paralela a 25 °C como referência.

4.2 TEOR DE UMIDADE

Nas figuras 31 e 32, apresentam-se os valores médios dos teores de umidade dos corpos de prova de embutimento para as espécies *Pinus elliotii* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente, no momento da realização dos testes mecânicos. Como esperado, os corpos de prova de *Pinus*

elliottii estavam praticamente anidros a partir de 100 °C (Figura 31). A partir de 120 °C, os valores de teor de umidade foram negativos, o que pode estar associado à perda dos componentes orgânicos da madeira (Figura 32). Esse comportamento foi observado por Carrasco *et al.* (2016), para temperaturas acima de 160 °C, e por Pinheiro e Sève (1998), para temperaturas acima de 200 °C. Os corpos de prova de *Eucalyptus saligna* estavam anidros a partir de 140 °C e apresentaram valores negativos de teor de umidade somente a 180 °C (Figura 32).

A madeira possui 3 tipos de água em sua constituição: água livre ou capilar, água de adesão e água adsorção química; e variam conforme o teor de umidade desse material. Em teores de umidade acima do PSF, a madeira possui os 3 tipos de água. Entre 6% e 28% de teor de umidade, encontra-se na madeira a água de adesão e a química. Abaixo dos 6% de umidade, a madeira possui somente água química (MORESCHI, 2014). Esses tipos de água podem ser eliminados da madeira com aumento da temperatura.

De acordo com Moreschi (2014), a eliminação de cada tipo de água provoca alterações diferentes na resistência mecânica da madeira. A eliminação da água de adesão causa alterações da resistência mecânica da madeira, pois alteram o peso e favorecem a aproximação das micelas, microfibrilas e macrofibrilas, conferindo assim maior rigidez (MORESCHI, 2014). Se a água de adsorção química é eliminada, ocorre redução das propriedades mecânicas desse material (BODIG; JAYNE, 1993).

O teor de umidade dos corpos de prova de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna* indica que a madeira possui dois tipos de água no momento dos testes de embutimento: água de adesão e água de adsorção química. Para o *Pinus elliottii*, a madeira nas temperaturas entre 25 e 60 °C tinham teores de umidade entre 9,22 e 5,19% (Figura 31), indicando a presença de água de adesão. Nas temperaturas superiores a 60 °C, somente água de adsorção química estava presente. Portanto, entre 25 e 60 °C pode ocorrer um acréscimo de resistência ao embutimento e nas temperaturas superiores a 60 °C pode ocorrer perda da resistência. Para o *Eucalyptus saligna*, a madeira nas temperaturas entre 25 e 80 °C tinham teores de umidade entre de 11,58 e 5,71% (Figura 32), indicando presença de água de adesão. Já para temperaturas superiores a 80 °C, a madeira tinha somente água de adsorção química. Portanto para o *Eucalyptus saligna*, a resistência ao embutimento pode aumentar entre 25 e 80 °C e decrescer nas temperaturas superiores a 80°C. Contudo não é possível analisar a influência do teor de umidade na resistência ao embutimento isoladamente no presente trabalho, pois a temperatura tam-

bém provoca modificações nas propriedades mecânicas da madeira. Isso será analisado nas próximas seções do trabalho.

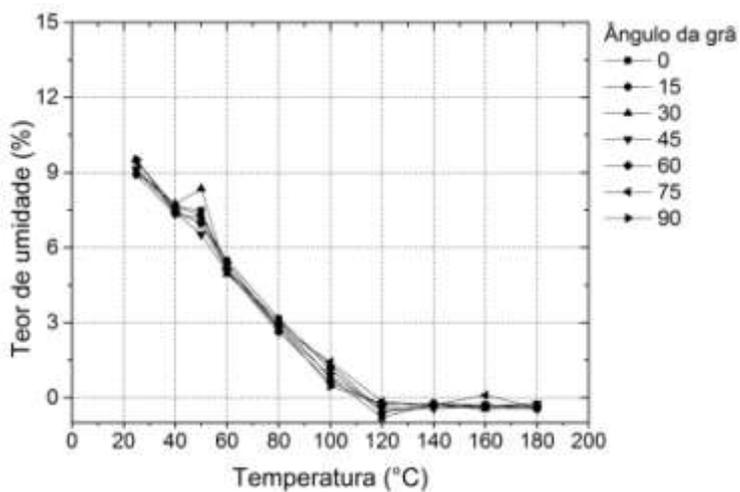


Figura 31. Teor de umidade dos corpos de prova de *Pinus elliottii*.

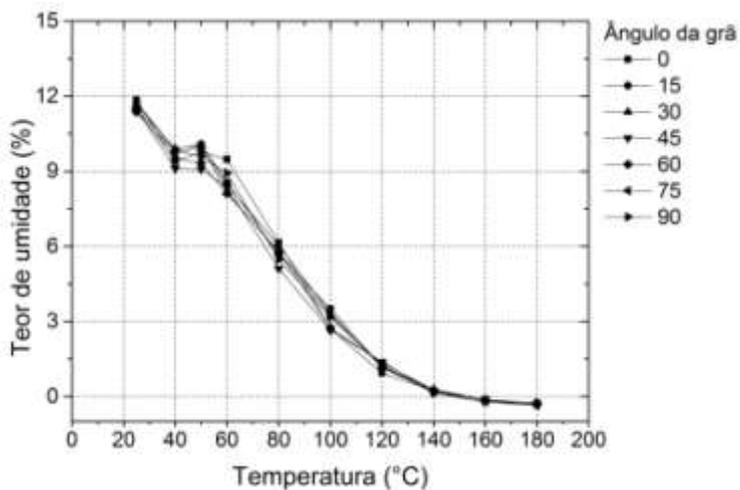


Figura 32. Teor de umidade dos corpos de prova de *Eucalyptus saligna*.

4.3 CURVAS FORÇA × DESLOCAMENTO DOS TESTES DE EMBUTIMENTO

Nas figuras 33 e 34, são apresentadas as curvas força × deslocamento médias dos testes de embutimento do *Pinus elliottii* e do *Eucalyptus saligna*, as quais foram obtidas a partir das curvas ilustradas no Apêndice D (figuras 49 a 62). Essas curvas apresentam dois trechos distintos: o trecho linear, que ocorre no início do teste de embutimento e apresenta proporcionalidade entre a força e o deslocamento; e o trecho plástico, que ocorre após essa proporcionalidade e o deslocamento aumenta de forma mais acentuada que a força até a ruptura do material. No trecho linear, observa-se que, com o aumento do ângulo da grã, o coeficiente de rigidez de embutimento inicial diminui. Esse coeficiente de rigidez é a inclinação do trecho linear da curva. No trecho plástico, é possível observar que as curvas força × deslocamento obtidas para diferentes condições de temperatura e de ângulos de grã diferem entre si. Os corpos de prova de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna* apresentam rupturas antes do deslocamento atingir 5 mm. O número de rupturas aumenta com o acréscimo da temperatura e ocorrem nos ângulos da grã entre 0° e 45°. Isso indica que a madeira tornou-se menos dúctil com o aumento da temperatura, surgindo mais falhas por fendilhamento nos corpos de prova. No ângulo de 60°, a madeira apresentou comportamento mais dúctil que em ângulos menores, mas ainda ocorreram falhas por fendilhamento e rupturas antes de 5 mm de deslocamento. Nos ângulos de 75 e 90°, notou-se que, na maioria dos corpos de prova, a madeira era mais dúctil e as curvas não apresentaram diferenças com o aumento da temperatura.

Na literatura, são encontrados resultados que corroboram com aqueles da presente pesquisa (PEDERSEN, 2002; BLERON e DUCHANOIS, 2006; SCHWEIGLER *et al*, 2016; MORAES, 2003). Esses resultados mostram que a influência do ângulo da grã e da temperatura pode ser percebida nas curvas força × deslocamento, principalmente no trecho plástico, após o limite de proporcionalidade. Nesse trecho, o aumento do ângulo da grã provoca um aumento da inclinação da curva. Isso pode estar relacionado com a densificação da madeira na área de contato abaixo do pino e ao efeito de corda (“rope effect”) das fibras da madeira (SCHWEIGLER *et al*, 2016).

A influência da temperatura no comportamento das curvas força × deslocamento em testes de embutimento paralelo e perpendicular é relatado por Moraes (2003). A madeira torna-se mais dúctil acima de 60 °C em relação ao comportamento apresentado a 20 °C e isso contínua

até 120 °C (MORAES, 2003). A madeira pode se tornar mais dúctil e menos resistente devido aos efeitos da temperatura e do teor de umidade nos polímeros da madeira, principalmente devido ao amolecimento da lignina, o qual está relacionado à temperatura de transição vítrea. Esse polímero sofre amolecimento em temperaturas inferiores a 100 °C quando a madeira encontra-se úmida. Porém, em condições secas, o amolecimento da lignina é deslocado para temperaturas maiores (IRVINE, 1982).

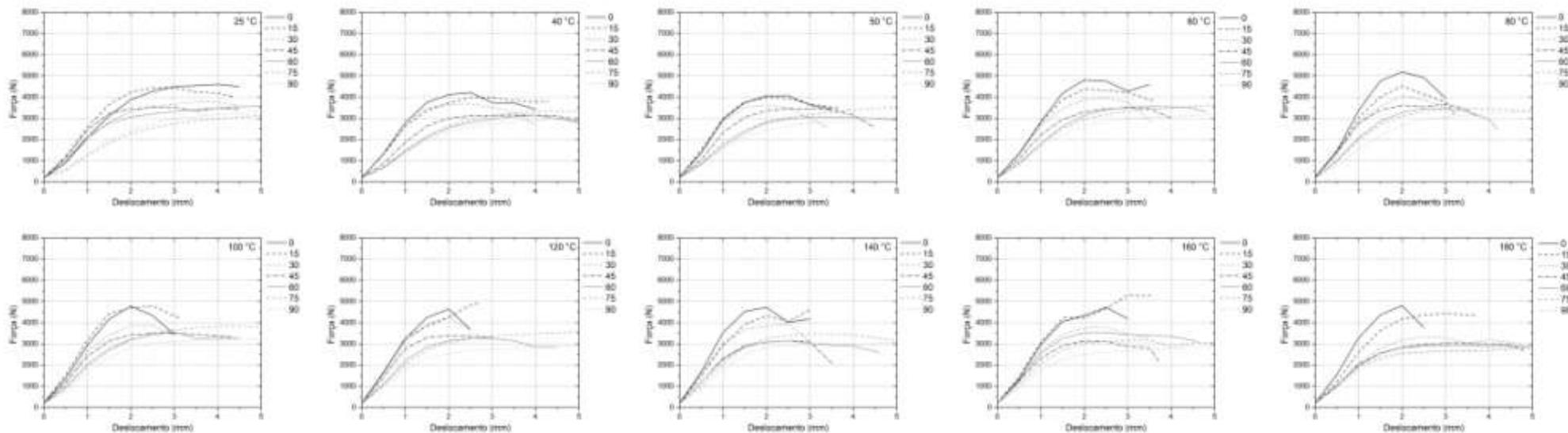


Figura 33. Curvas médias força \times deslocamento dos testes de embutimento em cada ângulo da grã e temperatura de *Pinus elliottii*.

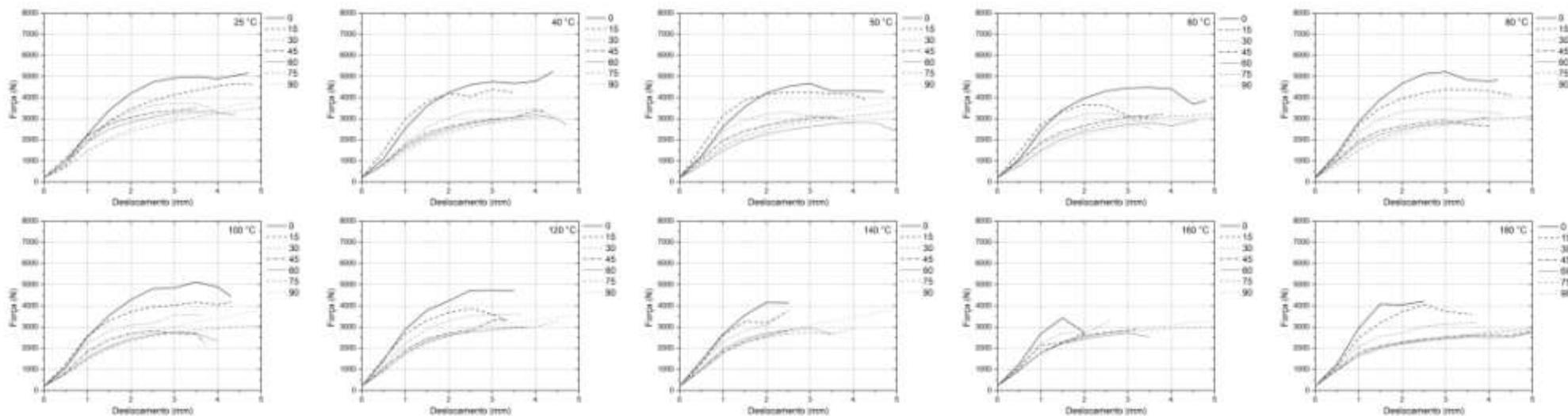


Figura 34. Curvas médias força \times deslocamento dos testes de embutimento em cada ângulo da grã e temperatura de *Eucalyptus saligna*.

4.4 TIPOS DE FALHAS

Os tipos de falha ocorridos durante os testes de embutimento foram: falhas por fendilhamento e falhas por esmagamento (figuras 35 a 38). A quantidade delas variou em função da espécie, da temperatura e do ângulo entre a força e a grã da madeira. Observa-se que, nos corpos de prova que apresentaram falhas por esmagamento (figuras 35 e 37), a forma da semicircunferência onde é colocado o parafuso apresentou uma distorção em forma de “feijão”. Isso ocorre devido ao deslocamento do pino no sentido perpendicular à grã da madeira, direção na qual a rigidez da madeira é menor. Esses resultados são semelhantes aos observados por Bleron e Duchanois (2006) e por Pedersen (2002). Nos corpos de prova que apresentam fendilhamento (figuras 36 e 38), a falha por fendilhamento ocorreu sempre paralela à grã, devido ao rompimento das fibras por tração normal. Nota-se que a falha por fendilhamento não foi observada nos ensaios de embutimento perpendicular às fibras, pois a madeira é esmagada no local entre o contato do pino e a madeira, rompendo posteriormente por tração normal às fibras.



Figura 35. Falhas por esmagamento do *Pinus elliottii*.

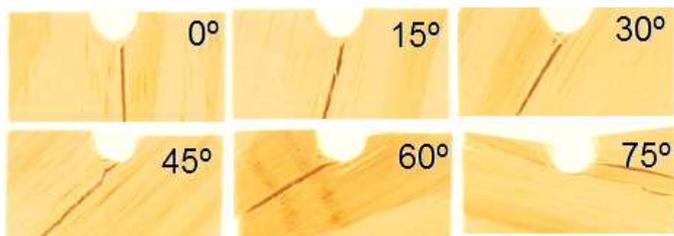


Figura 36. Falhas por fendilhamento do *Pinus elliottii*.

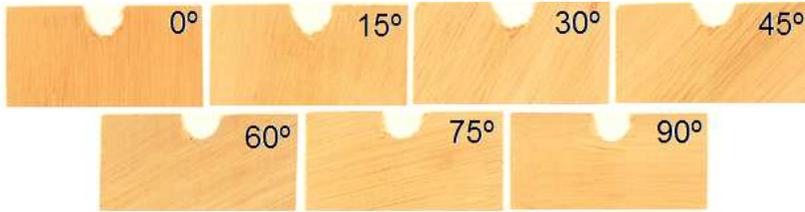


Figura 37. Falhas por esmagamento do *Eucalyptus saligna*.

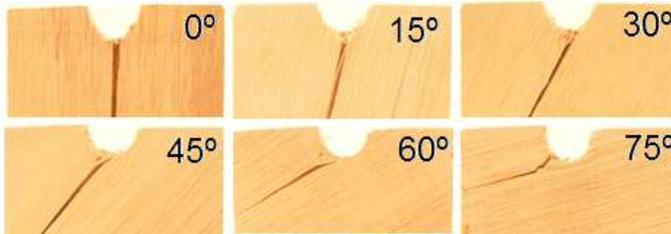


Figura 38. Falhas por fendilhamento do *Eucalyptus saligna*.

Na Tabela 14, é apresentada a quantidade de corpos de prova de *Pinus elliottii* com falha por fendilhamento durante os testes de embutimento. A quantidade de corpos de prova com falha por fendilhamento foi diferente em função do ângulo da grã e da temperatura. A maior quantidade foi em ângulos da força em relação à grã da madeira entre 0° e 45° e para temperaturas superiores a 40 °C. A 75°, o número de corpos de prova com falha por fendilhamento foi inferior aos demais ângulos, apresentando somente um corpo de prova com esse tipo de falha para temperaturas a 80, 100, 140 e 160 °C.

As falhas por fendilhamento podem ser associadas ao esforço de tração normal às fibras da madeira, variando de acordo com o ângulo entre a força e a grã (SCHWEIGLER *et al.*, 2016). Nos ângulos entre 0 e 45°, a madeira pode ser mais solicitada à tração normal. A degradação ou as alterações químicas da lignina e da hemicelulose devidas à elevação da temperatura podem ter contribuído para o aumento no número de corpos de prova que apresentaram falhas por fendilhamento. A lignina é responsável por unir as fibras da madeira e pode ter relação com a resistência a tração normal às fibras (BODIG; JAYNE, 1993). A hemicelulose, a qual é associada por interação física e ligações covalentes com a lignina, também pode ser relacionada à tração normal (WINANDY; ROWELL, 2005; IPT, 1998; SILVA, 2016). Acima do ângulo de 60°, principalmente nos ângulo de 75° e 90° e antes da falha por fendilhamento, ocorre um forte adensamento das fibras na região de contato do

pino e a madeira e, posteriormente, o rompimento por tração normal às fibras. Como a lignina tem função de unir as fibras e esse polímero sofre influência da temperatura, o rompimento por tração normal às fibras pode ter sido provocado pelo descolamento das fibras devido a modificações causadas na lignina. A análise dos resultados das falhas por fendilhamento indicam que sejam realizados estudos mais aprofundados sobre a influência da degradação dos polímeros da madeira na resistência mecânica da madeira.

Tabela 14. Quantidade de corpos de prova fendilhados de *Pinus elliottii*.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	3	4	0	5	0	0	0
40	8	8	9	1	0	0	0
50	8	9	10	6	0	0	0
60	10	10	10	10	3	0	0
80	10	10	10	8	7	1	0
100	10	9	10	7	3	1	0
120	10	10	10	9	7	0	0
140	9	10	10	10	7	1	0
160	10	9	10	9	4	1	0
180	10	8	3	7	2	0	0

Na Tabela 15, é apresentada a quantidade de corpos de prova de *Eucalyptus saligna* que durante os testes de embutimento apresentaram falha por fendilhamento. Observa-se uma tendência de aumento dessa quantidade com o acréscimo de temperatura. Entre os ângulos de 0 e 60°, a quantidade de falhas por fendilhamento foi maior que aquelas ocorridas nos ângulos de 75 e 90°. O número de corpos de prova de *Eucalyptus saligna* com falhas por fendilhamento no ângulo de 75° de inclinação da grã entre as temperaturas de 120 e 160 °C foi superior a 50%. No ângulo de 90°, para ambas as espécies, todos os corpos de prova apresentaram esmagamento das fibras da madeira na direção normal.

As causas das falhas por fendilhamento nos corpos de prova de *Eucalyptus saligna* podem ser as mesmas já discutidos para *Pinus elliottii*. Constata-se que nos corpos de prova de *Eucalyptus saligna*, ocorreram mais falhas por fendilhamento nos ângulo de 60°, em todas as

temperaturas, e no ângulo de 75°, para temperatura superior a 120 °C. Essa diferença entre espécies pode estar associada à quantidade de lignina contida na madeira de cada espécie. Nas coníferas, a quantidade desse polímero é maior que nas folhosas (KLOCK *et al.*, 2005). Portanto, nesses ângulos, é possível que o rompimento por tração normal às fibras tenha relação com a lignina. A proporção desse polímero na madeira pode ter influenciado a quantidade de corpos de prova que apresentaram falhas por fendilhamento. Isto deve ser investigado em pesquisas futuras complementares, relacionando a quantidade de lignina com as falhas por fendilhamento em corpos de prova.

Tabela 15. Quantidade de corpos de prova de *Eucalyptus saligna* com falha por fendilhamento.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	5	3	9	10	9	0	0
40	4	9	7	8	5	0	0
50	3	7	10	10	5	1	0
60	6	9	10	9	2	1	0
80	6	8	6	7	8	2	0
100	7	8	9	10	8	2	0
120	10	10	9	10	9	5	0
140	10	10	10	10	10	6	0
160	10	10	10	10	10	5	0
180	10	10	8	1	4	0	0

4.5 ADERÊNCIA ENTRE AS RESISTÊNCIAS AO EMBUTIMENTO EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS

Nas figuras 39a e 39b são apresentados os valores característicos das resistências ao embutimento experimentais e teóricas das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. Os valores teóricos foram calculados de acordo com a norma americana (NDS:2015) [equações (7) e (8)] e a norma europeia (EN 1995-1-1:2004) [equações (9), (10), (11) e (12)]. Observa-se que não houve aderência entre os valores experimentais e teóricos, para ambas as espécies. Os valores experimentais foram 43 e 60% inferiores aos valores teóricos da norma americana, e 45 e

65% inferiores aos valores teóricos da norma europeia, para o *Pinus elliottii* e para o *Eucalyptus saligna*, respectivamente.

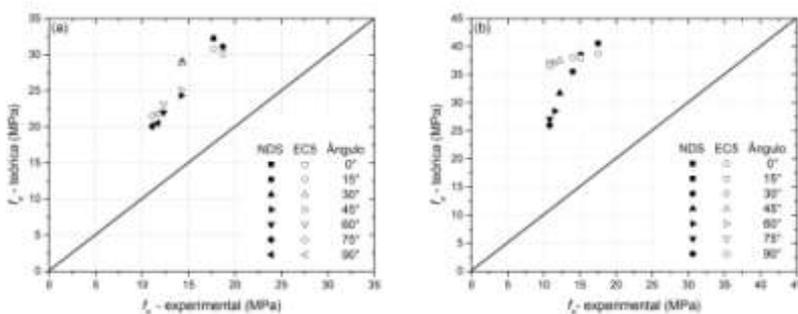


Figura 39. Resistência ao embutimento experimental e teóricas de acordo com as normas: (a) *Pinus elliottii* e (b) *Eucalyptus saligna*.

Para o *Eucalyptus saligna*, a diferença entre os valores teóricos calculados segundo a norma europeia e os valores experimentais aumenta com o ângulo entre a força e a grã da madeira. A menor diferença ocorre para o ângulo de 0° (55%) e a maior para o ângulo de 75° (71%). Para o *Pinus elliottii*, observa-se que a diferença entre os valores teóricos e experimentais não aumenta com o ângulo.

A não aderência entre valores experimentais e teóricos indica a inadequação das equações propostas nas normas americana e europeia para a previsão da resistência ao embutimento das espécies estudadas, sendo desaconselhado o seu uso para tal fim. Recomenda-se que estudos complementares sejam realizados para determinação das equações para estimar as resistências ao embutimento para madeira de florestas plantadas no Brasil.

4.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS RESISTÊNCIAS AO EMBUTIMENTO

Na Tabela 16, são apresentados os valores médios das resistências ao embutimento, os testes de comparação das médias e os desvios-padrão para as madeiras de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna*. Os testes de comparação de médias realizados para a verificação da influência da temperatura na resistência ao embutimento indicaram poucas diferenças estatisticamente significativas entre as resistências ao embutimento à temperatura ambiente (25 °C) e aquelas obtidas em outras temperaturas. As amostras com diferenças estatísticas estão com desta-

que em amarelo na Tabela 16. As diferenças ocorreram de forma diferente nas duas espécies. Para o *Pinus elliottii*, as diferenças estatisticamente significativas entre a resistência ao embutimento à 25 °C e as resistências ao embutimento em outras temperaturas ocorreram nos ângulos de 0, 30 e 75°. Já para o *Eucalyptus saligna* as diferenças significativas entre a resistência ao embutimento à 25 °C e as demais temperaturas ocorreram nos ângulos 0, 30, 45 e 60°.

Para o *Pinus elliottii*, as resistências ao embutimento paralelas a 80 e 100 °C foram significativamente superiores as resistências à 25 °C. Para o ângulo de 30°, as diferenças estatisticamente significativas foram entre as resistências ao embutimento à 25 °C e à 120 °C. Já para o ângulo de 75°, as diferenças estatisticamente significativas foram entre as resistências obtidas à 25 e à 100 °C e entre as resistências obtidas à 25 e à 140 °C. À 80 e 100 °C, o teor de umidade da madeira de *Pinus elliottii* era de 3% e 0,9%, respectivamente (Figura 31). Nessas temperaturas ocorreram acréscimos significativos da resistência ao embutimento para os ângulos da grã de 0 e 75°. Esses resultados podem ser explicados pela diminuição do teor de umidade da madeira, o qual favorece um acréscimo na resistência da madeira.

Para o *Eucalyptus saligna*, a resistência ao embutimento paralela a 80 °C é significativamente superior àquela obtida a 25 °C. Para os ângulos de 30, 45 e 60°, as resistências ao embutimento a 180 °C foram significativamente inferiores à resistência obtida a 25 °C. A 180 °C, sabe-se que os polímeros sofrem degradação devido ao efeito da temperatura e isso favorece a diminuição da resistência da madeira (BACK e SALMÉN, 1982; IRVINE, 1984; GOODRICH *et al.*, 2010).

O aumento significativo da resistência ao embutimento devido à elevação da temperatura em alguns ângulos da grã e em ambas as espécies corroboram com os resultados de Carrasco *et al.* (2016). Eles observaram um acréscimo de 19% na resistência à compressão paralela a 100 °C em relação à resistência obtida a 20 °C. Piazza *et al.* (2005) apud Carrasco *et al.* (2016) comentam que o aumento aparente da resistência da madeira é devido à diminuição do teor de umidade. Portanto, os resultados na presente pesquisa podem indicar que o aumento de resistência devido à diminuição do teor de umidade foi maior que a redução de resistência devido à temperatura de transição vítrea da madeira.

A influência da temperatura nas resistências ao embutimento é diferente para cada ângulo da grã e os resultados obtidos vão de encontro aos resultados da literatura para a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular (MANRIQUEZ, 2012; MANRIQUEZ e MORAES, 2008; MORAES, ROGAUNNE, *et al.*, 2005; SCHNEID e MORAES,

2017). Schneid e Moraes (2017) encontraram, para ângulos da grã de 0, 60 e 90°, diferenças estatisticamente significativas entre as resistências ao embutimento a 25 °C e outras temperaturas para espécie *Eucalyptus grandis*. Moraes *et al.* (2005), ao estudarem as resistências ao embutimento paralela e perpendicular de corpos de prova *Pinus sylvestris* expostos durante 120 min a temperaturas entre 20 e 240 °C, relatam que as resistências diminuem com a temperatura, porém de forma não linear. Os mesmos autores mencionam a ocorrência de um mínimo relativo a 80 °C e um máximo relativo em 140 °C. O ponto de mínimo representava uma redução de 30% em relação à resistência obtida a 20 °C. Manriquez (2012), ao determinar as resistências ao embutimento de corpos de prova de *Pinus taeda* expostos à temperatura entre 20 e 230 °C, observou reduções à 110 °C de 37% na resistência ao embutimento paralela e de 33% na resistência ao embutimento perpendicular. Esse mesmo autor avaliou as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras do *Eucalyptus saligna* entre 20 e 230 °C e observou diferença estatística significativa entre 20 °C e as demais temperaturas. A maior redução para a direção paralela foi de 33% a 70 °C e para a perpendicular foi de 43% a 100 °C.

Tabela 16. Valores das resistências ao embutimento médias, desvios padrão e teste de comparação das médias.

θ (°C)	$f_{e, 0, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 15, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 30, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 45, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 60, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 75, \theta, m}$ (MPa)		$f_{e, 90, \theta, m}$ (MPa)								
	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s	Média	S	Média	s							
<i>Pinus elliottii</i>																					
25	19,4	a	2,0	20,3	ab	1,9	16,5	ab	2,6	16,5	a	2,7	14,1	ab	2,1	12,7	a	1,8	13,2	ab	2,3
40	20,4	ab	2,3	18,4	A	2,4	17,5	abc	1,9	15,0	a	4,5	13,2	ab	1,9	13,9	ab	2,4	12,2	ab	1,6
50	20,1	ab	3,2	19,6	ab	2,6	17,7	abc	1,4	15,9	a	4,3	12,1	a	4,5	13,8	ab	2,4	12,5	ab	1,8
60	23,1	ab	3,3	21,0	ab	2,4	19,1	bc	2,5	15,8	a	2,3	16,3	ab	3,6	15,0	ab	1,9	13,5	ab	1,0
80	24,7	b	4,4	21,7	ab	1,3	18,9	abc	2,3	17,5	a	3,1	16,2	ab	2,3	15,3	ab	1,9	14,1	b	1,4
100	24,7	b	4,9	23,6	b	3,7	19,0	abc	3,2	16,6	a	3,4	16,2	ab	3,4	16,8	b	2,8	14,4	b	1,3
120	22,7	ab	3,2	21,4	ab	2,8	20,8	c	3,1	16,7	a	2,4	15,2	ab	3,4	15,1	ab	2,6	12,7	ab	0,9
140	24,3	ab	3,2	21,1	ab	3,5	18,7	abc	2,4	15,2	a	2,1	14,9	ab	2,5	16,5	b	3,2	14,2	b	1,5
160	22,6	ab	3,0	21,8	ab	3,3	18,0	abc	3,3	15,3	a	3,2	17,0	b	3,2	14,8	ab	3,3	12,4	ab	1,7
180	23,4	ab	4,6	20,8	ab	2,7	15,4	a	1,5	13,5	a	2,3	13,4	ab	3,5	12,6	a	1,9	11,2	a	2,1
<i>Eucalyptus saligna</i>																					
25	21,0	abc	4,1	17,2	ab	2,4	16,4	b	2,9	13,8	b	1,9	13,2	b	2,0	11,9	ab	1,3	12,8	a	2,3
40	20,8	abc	2,8	20,0	b	2,5	15,8	ab	1,7	12,7	ab	0,7	12,7	ab	1,5	12,3	ab	1,2	12,4	a	1,6
50	20,9	abc	3,5	19,8	b	1,8	15,1	ab	1,1	12,7	ab	0,8	11,5	ab	0,8	12,0	ab	1,2	13,4	a	1,8
60	20,0	ab	1,5	17,4	ab	2,1	15,3	ab	2,2	13,1	b	1,0	12,3	ab	1,4	12,3	ab	1,2	11,5	a	1,0
80	25,0	d	4,6	19,2	b	1,9	16,3	b	1,6	12,8	b	1,5	12,0	ab	1,2	12,1	ab	1,0	11,8	a	1,4
100	23,4	cd	3,2	17,8	ab	2,1	16,2	b	2,0	13,3	b	1,3	12,5	ab	1,2	12,3	ab	0,5	13,0	a	1,3
120	22,5	abc	3,4	17,5	ab	1,6	16,4	b	1,9	13,3	b	2,3	12,7	ab	0,9	13,0	ab	1,6	13,2	a	0,9
140	20,1	abc	3,9	16,8	ab	2,2	14,6	ab	1,8	12,4	ab	1,2	12,9	b	1,9	12,1	b	0,9	13,3	a	1,5
160	18,7	a	1,5	15,1	a	3,1	14,3	ab	1,2	12,0	ab	1,5	11,7	ab	1,2	12,4	b	1,4	12,3	a	1,7
180	23,6	bcd	5,4	18,3	ab	2,9	13,2	a	2,2	10,7	a	1,1	10,7	a	2,1	10,6	a	1,2	11,3	a	2,1

Onde θ é a temperatura, $f_{e, \alpha, \theta, m}$ é a resistência ao embutimento média para temperatura (°C) e ângulo da grã (°); s é o desvio-padrão. Médias seguidas de mesma letra em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Na Tabela 17, são apresentadas as temperaturas nas quais ocorreram os valores mínimos de resistência ao embutimento para cada ângulo da grã em ambas as espécies. Esses valores mínimos das resistências ocorreram em temperaturas diferentes para o *Pinus elliottii* e para o *Eucalyptus saligna*. Para o *Pinus elliottii*, o valor mínimo das resistências ao embutimento ocorreu em temperaturas consideradas baixas (25, 40 e 50 °C) para os ângulos de 0, 15 e 60°. Para os demais ângulos (30, 45, 75 e 90°), os valores mínimos foram a 180 °C. Já para o *Eucalyptus saligna*, os valores mínimos das resistências ocorreram entre 160 e 180 °C.

Tabela 17. Temperaturas de ocorrência de resistências ao embutimento mínimas.

α (°)	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
	Min (°C)	Min (°C)
0	25	160
15	40	160
30	180	180
45	180	180
60	50	180
75	180	180
90	180	180

Onde α é o ângulo de inclinação da grã.

4.7 MODELO DE HANKINSON PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO AJUSTADO PARA TEMPERATURAS ENTRE 25 E 180 °C

Nas figuras 40 e 41, são apresentados os dados das resistências ao embutimento médias em cada temperatura e ângulo da grã para as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. Para esses dados foram ajustadas curvas ao modelo de Hankinson (Equação 15). Os ajustes dessas curvas foram realizados por meio dos testes de *pairing*, os quais são apresentadas nas tabelas 18 e 19. A partir dos testes de *pairing*, foi possível obter os limites do intervalo do expoente “n” com nível de significância de 95% e o valor do expoente “n” que possui melhor ajuste, o qual foi avaliado por meio do coeficiente de correlação (R).

Para o *Pinus elliottii*, observa-se que “n = 2”, tradicionalmente usado na fórmula de Hankinson (Equação 15), está contido em todos os intervalos do expoente que tem nível de significância de 95% e é o único valor que pode ser utilizado em todas as temperaturas. Entre 25 e 180

°C, os expoentes “n” do termo trigonométrico variam entre 2,0 e 1,6, com coeficientes de correlação entre 72,05 e 83,92% (Tabela 18).

Para a madeira de *Eucalyptus saligna*, os resultados dos ajustes dos dados experimentais ao modelo de Hankinson são apresentados na Tabela 19. Os intervalos do expoente “n” para os quais o modelo de Hankinson tem nível de significância de 95% não possuem o valor “n = 2” em nenhuma das temperaturas. O expoente $n = 1,5$ é o único válido estatisticamente em todas as temperaturas e portanto, esse é o valor mais adequado a ser usado para o ajuste do modelo de Hankinson.

Tabela 18. Resultado do teste de *pairing* para o expoente “n” dos termos trigonométricos da equação de Hankinson para o *Pinus elliottii*.

Temperatura (°C)	Intervalo de “n”	“n” ajustado	R (%)
25	$1,9 \leq n \leq 2,2$	2,0	77,25
40	$1,8 \leq n \leq 2,2$	1,9	74,16
50	$1,8 \leq n \leq 2,7$	2,0	73,57
60	$1,8 \leq n \leq 2,2$	1,8	77,36
80	$1,6 \leq n \leq 2,1$	1,7	80,58
100	$1,7 \leq n \leq 2,2$	1,7	72,05
120	$2,0 \leq n \leq 2,5$	2,1	78,60
140	$1,5 \leq n \leq 2,0$	1,6	77,31
160	$1,9 \leq n \leq 2,5$	1,9	72,58
180	$1,5 \leq n \leq 2,1$	1,6	83,92

Onde n é o expoente dos termos trigonométricos e R é o coeficiente de correlação.

Tabela 19. Resultado do teste de *pairing* para o expoente “n” dos termos trigonométricos da equação de Hankinson para o *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Intervalo de “n”	“n” ajustado	R (%)
25	$1,4 \leq n \leq 1,8$	1,6	75,90
40	$1,5 \leq n \leq 1,9$	1,7	87,70
50	$1,2 \leq n \leq 1,6$	1,6	87,81
60	$1,5 \leq n \leq 1,9$	1,6	89,00
80	$1,1 \leq n \leq 1,7$	1,4	90,79
100	$1,1 \leq n \leq 1,6$	1,3	89,66
120	$1,2 \leq n \leq 1,6$	1,4	85,80
140	$1,2 \leq n \leq 1,5$	1,4	79,65
160	$1,3 \leq n \leq 1,6$	1,4	79,19
180	$1,0 \leq n \leq 1,5$	1,3	86,53

Onde n é expoente dos termos trigonométricos e R é o coeficiente de correlação.

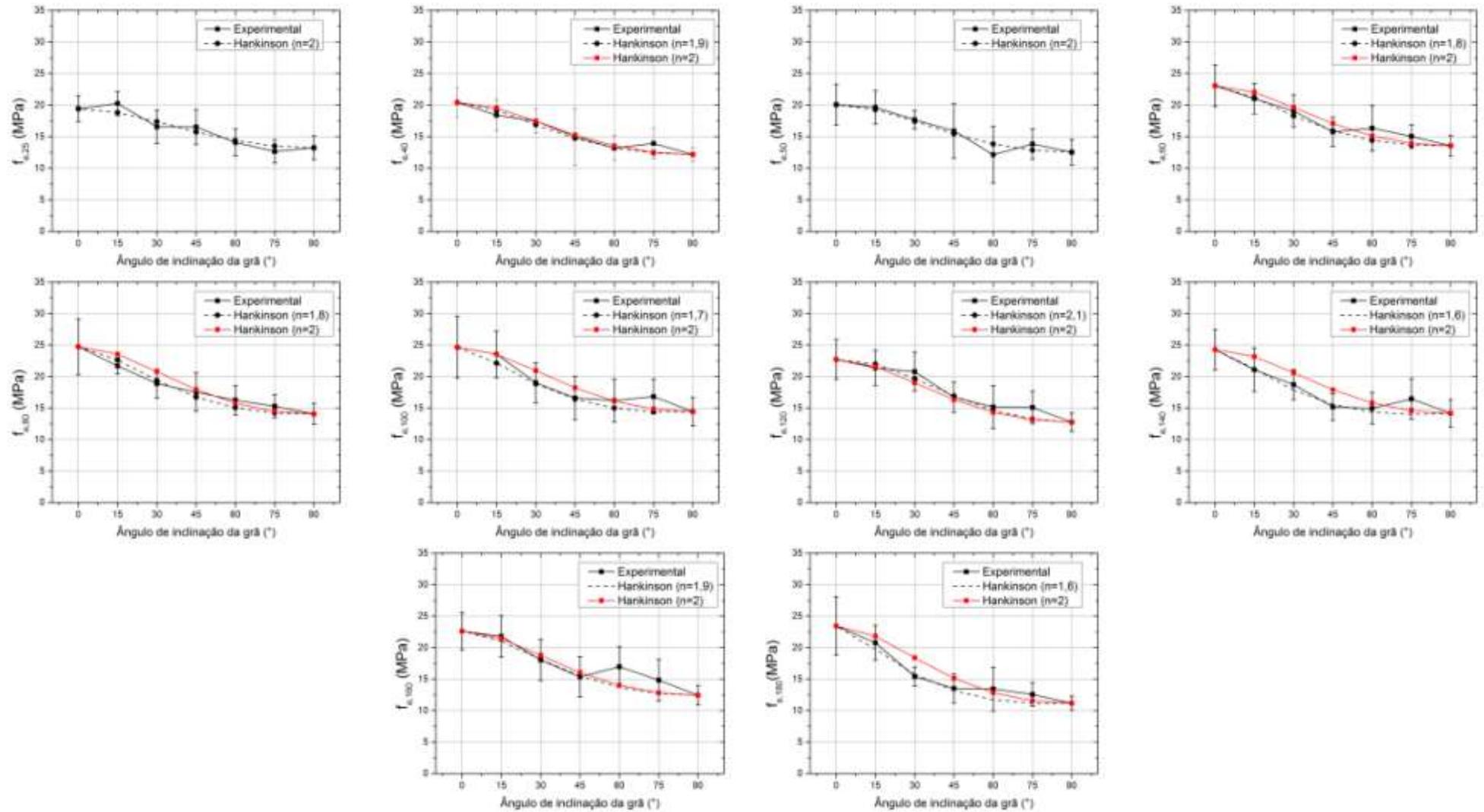


Figura 40. Resistências ao embutimento experimental e estimada pela equação de Hankinson para o *Pinus elliottii*.

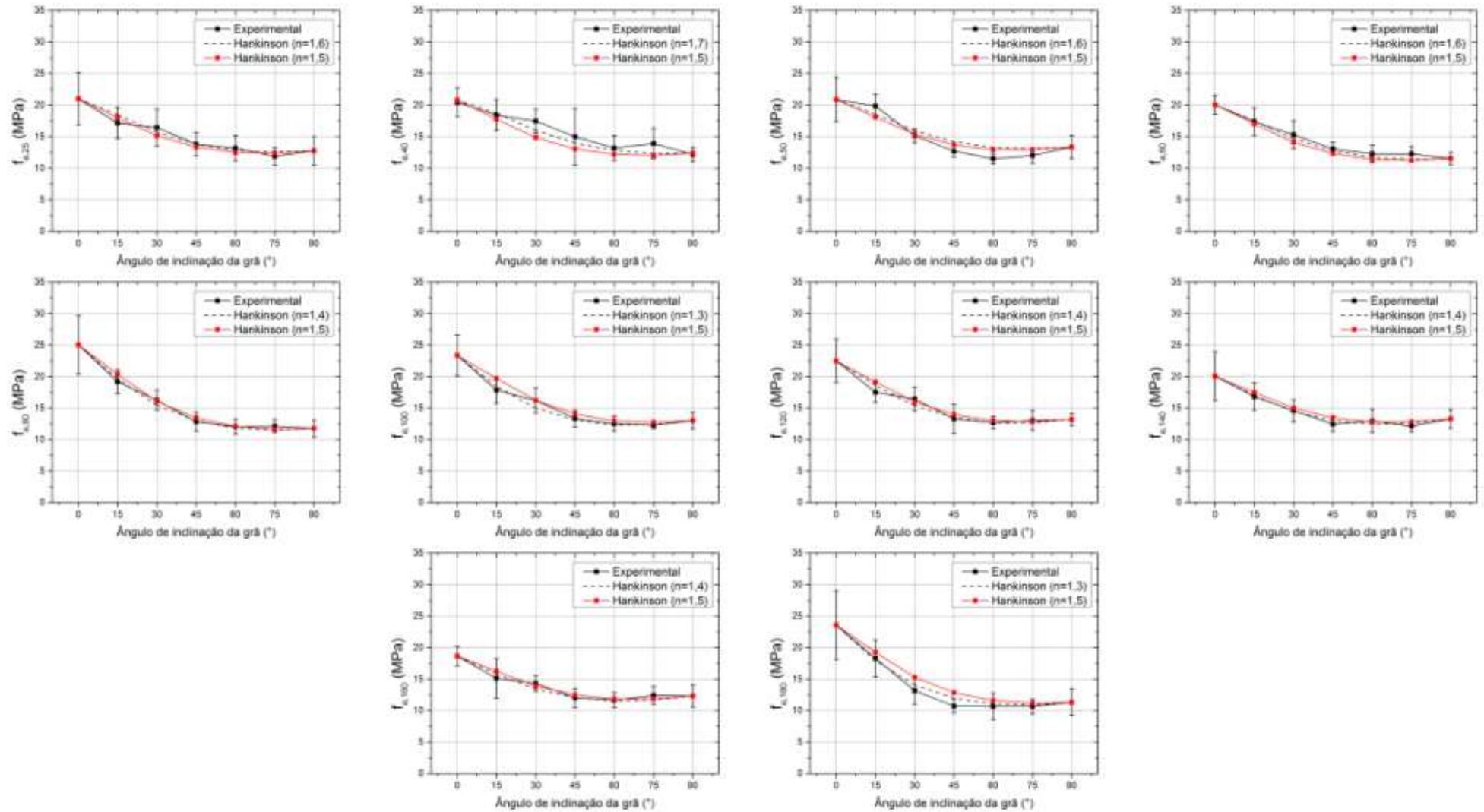


Figura 41. Resistências ao embutimento experimental e estimada pela equação de Hankinson para o *Eucalyptus saligna*.

4.8 VALORES DAS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS AO EMBUTIMENTO

Na Tabela 20 são apresentados os resultados das resistências características ao embutimento para cada combinação de temperatura e de ângulo da grã para madeira de *Pinus elliottii*. A 25 °C, a resistência ao embutimento paralela à grã foi de 17,7 MPa e a perpendicular foi de 11,7 MPa. Nessa mesma temperatura (25 °C), a resistência ao embutimento para o ângulo de 15° teve um aumento em relação à direção paralela (0°). Nas demais temperaturas, a resistência diminuiu com o aumento do ângulo.

Tabela 20. Resistências características ao embutimento do *Pinus elliottii*.

θ (°C)	$f_{e0,0,k}$	$f_{e15,0,k}$	$f_{e30,0,k}$	$f_{e45,0,k}$	$f_{e60,0,k}$	$f_{e75,0,k}$	$f_{e90,0,k}$
25	17,7	18,7	14,3	14,2	12,3	11,1	11,7
40	18,5	16,3	15,8	11,2	11,5	11,9	11,2
50	17,3	17,4	16,5	12,3	8,3	11,8	10,8
60	20,3	19,0	16,9	13,8	13,3	13,5	12,2
80	21,0	20,6	16,9	14,9	14,3	13,7	12,7
100	20,5	20,4	16,3	13,7	13,3	14,5	12,5
120	20,0	19,0	18,1	14,6	12,3	12,9	11,5
140	21,6	18,1	16,7	13,4	12,8	13,7	12,3
160	20,1	19,0	15,3	12,6	14,3	12,0	11,1
180	19,5	18,4	14,1	11,6	10,5	11,0	10,2

Na Tabela 21, são apresentados os resultados das resistências características ao embutimento para cada combinação de temperatura e de ângulo da grã para madeira de *Eucalyptus saligna*. A resistência característica ao embutimento diminuiu conforme o aumento do ângulo da grã, exceto para a temperatura de 50 °C, onde a resistência ao embutimento paralela foi menor que a 15°.

Os resultados encontrados na literatura foram semelhantes aos do presente trabalho para a espécie *Pinus elliottii*, mas o mesmo não é verificado para o *Eucalyptus saligna*. No presente trabalho, os valores característicos das resistências ao embutimento à 25 °C para o *Eucalyptus saligna* foram de 17,5 MPa na direção paralela e 10,8 MPa na direção perpendicular. Já Manriquez (2012) obteve para madeira de *Eucalyptus saligna* valores característicos de resistências ao embutimento

paralela e perpendicular à 20 °C iguais a 50,8 MPa e 23,1 MPa, respectivamente. A diferença entre as médias das resistências da presente pesquisa e as obtidas por Manriquez (2012) para o *Eucalyptus saligna* pode ser explicada pela diferença entre a massa específica aparente, pois no presente trabalho os valores ficaram entre 559 kg/m³ (paralelo) e 557 kg/m³ (perpendicular) e no trabalho de Manriquez (2012) a massa específica foi de 796 kg/m³ (paralelo) e 799 kg/m³ (perpendicular).

Tabela 21. Resistências características ao embutimento do *Eucalyptus saligna*.

θ (°C)	$f_{e0,\theta,k}$	$f_{e15,\theta,k}$	$f_{e30,\theta,k}$	$f_{e45,\theta,k}$	$f_{e60,\theta,k}$	$f_{e75,\theta,k}$	$f_{e90,\theta,k}$
25	17,5	15,1	14,0	12,2	11,5	10,8	10,8
40	18,4	17,8	14,4	12,1	11,5	11,3	11,0
50	17,9	18,3	14,2	12,0	10,8	11,0	11,8
60	18,8	15,5	13,4	12,2	11,1	11,3	10,7
80	21,1	17,6	14,9	11,6	11,0	11,2	10,6
100	20,6	16,0	14,5	12,2	11,5	11,8	11,9
120	19,6	16,1	14,8	11,3	11,9	11,7	12,4
140	16,8	15,0	13,1	11,4	11,4	11,4	12,0
160	17,4	12,5	13,3	10,7	10,7	11,2	10,8
180	19,0	15,8	11,3	9,8	8,9	9,7	9,5

4.9 FATORES DE MODIFICAÇÃO PARA A RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO CARACTERÍSTICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E ÂNGULO DA GRÃ

Os resultados apresentados nesta seção referem-se aos fatores de modificação para a resistência ao embutimento característica em função da temperatura e do ângulo da grã para as madeiras de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna*. A partir dos valores dos fatores de modificação experimentais, foram ajustados modelos para os fatores de modificação em função da temperatura e do ângulo da grã baseados na fórmula de Hankinson, conforme Equação 17. Esses resultados são apresentados na seção 4.11.1 para o *Pinus elliottii* e na seção 4.11.2 para o *Eucalyptus saligna*.

$$k = \frac{k_{fe,0}(\theta)}{\left(\frac{1}{k_{fe,90}(\theta)}\right) \cdot \text{sen}\alpha^n + \text{cos}\alpha^n} \quad (17)$$

sendo k é o fator de modificação, α o ângulo da grã em ($^\circ$) e n é o expoente do termo trigonométrico para cada espécie, os quais foram definidos na seção 4.7.

Os modelos propostos podem ser usados em modelagem numérica para prever a capacidade de carga das ligações, por meio de uma função contínua da modificação da resistência ao embutimento em relação ao valor da resistência de embutimento paralelo ($\alpha = 0^\circ$) a 25°C . A seguir, serão apresentados para cada espécie os modelos de regressão, os testes ANOVA das variáveis, os valores estimados dos parâmetros dos modelos e os erros relativos percentuais.

4.9.1 Fatores de modificação para o *Pinus elliotii*

Na Figura 42a, apresentam-se os fatores de modificação experimentais por meio do gráfico de superfície. A partir desses valores experimentais, foram ajustados os modelos de regressões polinomiais para os fatores de modificação das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular em função da temperatura. O modelo com melhor ajuste do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo para a espécie *Pinus elliotii* foi a Equação 18. Na Tabela 22, são apresentados os resultados da ANOVA desse modelo, mostrando que o modelo foi significativo, pois o p-valor foi menor que 0,05.

$$k_{fe,0}(\theta) = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2\theta^3, \quad (18)$$

sendo $k_{fe,0}(\theta)$ o fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo, θ a temperatura, em $^\circ\text{C}$, e β_n os parâmetros do modelo.

Tabela 22. ANOVA do modelo de regressão para o fator de modificação da resistência paralelo do *Pinus elliotii* em função da temperatura.

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Modelo	2	0,0380755	0,01903770	7,21	0,02
Resíduos	7	0,0184845	0,00264065		
Total	9	0,0565600			

Em que: G.L. é o grau de liberdade, S.Q. é a soma de quadrados e Q.M são os quadrados médios.

Os parâmetros β estimados para o modelo de regressão polinomial (Equação 18) e os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 23. A hipótese nula (H_0) é que os parâmetros β não são significativos. Quando o p-valor de cada parâmetro β for menor que 0,05, rejeita-se a hipótese nula, significando que o parâmetro β é significativo para o modelo de regressão múltipla.

Tabela 23. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo do *Pinus elliottii* em função da temperatura.

Parâmetros	Estimativa	Desvio-padrão	T	p-valor
β_0	0,91	$5,56 \times 10^{-2}$	16,40	0,00
β_1	$3,30 \times 10^{-3}$	$9,39 \times 10^{-4}$	3,51	0,01
β_2	$-7,01 \times 10^{-8}$	$-2,50 \times 10^{-8}$	-2,80	0,03

O modelo com melhor ajuste do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular para a espécie *Pinus elliottii* foi expresso pela Equação 19. Na Tabela 24, são apresentados os resultados da ANOVA desse modelo, mostrando que o modelo foi significativo ($p < 0,05$).

$$k_{fe,90}(\theta) = \beta_0 + \beta_1\theta^2 + \beta_2\theta^3, \quad (19)$$

sendo $k_{fe,90}(\theta)$ o fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo, θ a temperatura em °C e β_n os parâmetros do modelo.

Tabela 24. ANOVA do modelo de regressão do fator de modificação da resistência perpendicular do *Pinus elliottii* em função da temperatura.

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Modelo	2	0,01158100	0,00579051	5,21	0,04
Resíduos	7	0,00777898	0,00111128		
Total	9	0,01936000			

Em que: G.L. é o grau de liberdade, S.Q. é a soma de quadrados e Q.M são os quadrados médios.

Os parâmetros β para o modelo de regressão ajustado (Equação 19) e os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 25. Todos os parâmetros β são significativos para o modelo de regressão.

Tabela 25. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular do *Pinus elliottii* em função da temperatura.

Parâmetros	Estimativa	Desvio-padrão	t	p-valor
β_0	0,63	0,02	27,43	0,00
β_1	$1,71 \times 10^{-5}$	$6,60 \times 10^{-6}$	2,59	0,04
β_2	$-1,04 \times 10^{-7}$	$3,65 \times 10^{-8}$	-2,85	0,02

No modelo de regressão para o *Pinus elliottii*, foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual 0,84. A partir deste modelo de regressão foi possível elaborar um gráfico de superfície, o qual apresentado na Figura 42b.

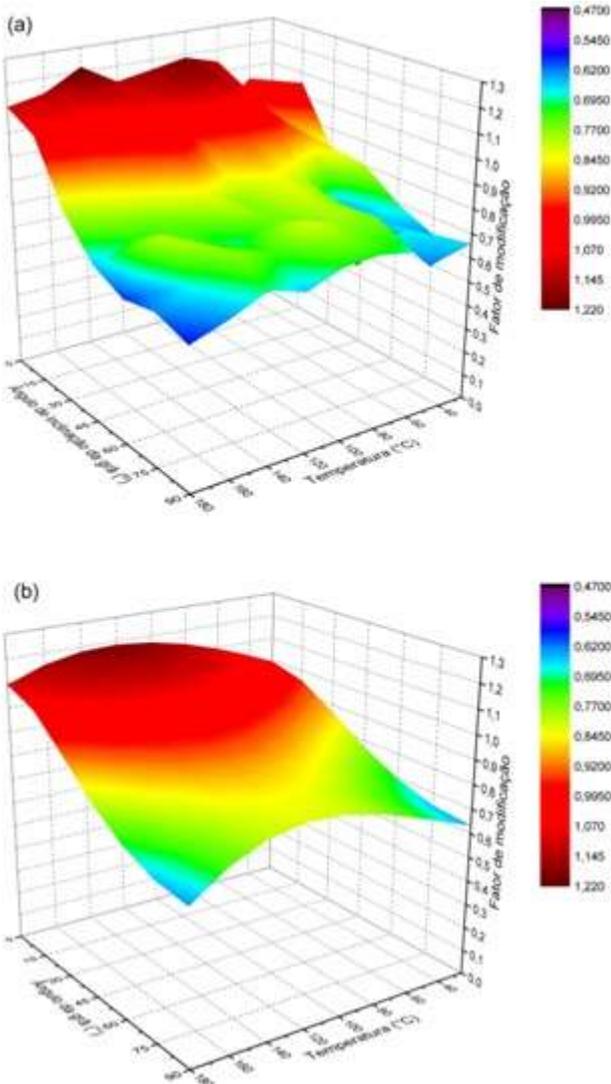


Figura 42. Gráficos dos fatores de modificação característicos do *Pinus elliottii*: (a) valores experimentais e (b) valores estimados.

A comparação entre os fatores de modificação experimentais (Figura 42a) e estimados pelo modelo de regressão (Figura 42b) mostrou que ocorreu um distanciamento desses fatores em algumas combinações de temperatura e de ângulo da grã. Isso foi observado na Tabela 26,

onde são apresentados os erros relativos percentuais dos coeficientes de modificação característicos para a madeira de *Pinus elliottii*. Os valores positivos dos erros representam que os dados estimados são superiores aos experimentais. O maior erro foi observado para o ângulo de 60° e a temperatura de 50 °C (-63,2%).

Tabela 26. Erro relativo percentual dos fatores de modificação característicos do *Pinus elliottii*.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	0,7%	9,4%	-7,2%	3,7%	-0,2%	-3,2%	4,0%
40	0,7%	-8,5%	-2,1%	-29,3%	-13,2%	-2,8%	-6,3%
50	-8,9%	-4,9%	-1,5%	-22,1%	-63,2%	-7,6%	-14,6%
60	4,5%	1,3%	-1,7%	-12,2%	-5,9%	1,9%	-6,0%
80	4,1%	5,2%	-6,7%	-9,6%	-4,8%	-2,8%	-9,0%
100	-1,0%	1,5%	-14,4%	-24,1%	-17,0%	-1,5%	-15,2%
120	-4,7%	-7,2%	-4,2%	-17,4%	-28,3%	-15,1%	-26,6%
140	3,2%	-11,5%	-11,7%	-26,0%	-20,0%	-5,3%	-14,8%
160	-1,4%	-3,4%	-17,0%	-25,8%	-0,5%	-10,9%	-17,2%
180	0,7%	-0,2%	-15,9%	-22,6%	-19,2%	-4,6%	-9,2%

Onde θ é a temperatura em °C e α é o ângulo de inclinação da grã em °.

4.9.2 Fatores de modificação para o *Eucalyptus saligna*

Na Figura 43a, apresentam-se os fatores de modificação experimentais por meio do gráfico de superfície. A partir desses valores experimentais, foram ajustados os modelos de regressões polinomiais para os fatores de modificação das resistências ao embutimento paralelo e perpendicular em função da temperatura. O modelo com melhor ajuste do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo para a espécie *Eucalyptus saligna* foi a Equação 20. Na Tabela 27, são apresentados os resultados da ANOVA desse modelo, mostrando que o modelo foi significativo, pois o p-valor foi menor que 0,05.

$$k_{fe,0}(\theta) = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2\theta^2 + \beta_3\theta^3 + \beta_4\theta^4, \quad (20)$$

sendo $k_{fe,0}(\theta)$ o fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo, θ a temperatura em °C e β_n os parâmetros do modelo.

Tabela 27. ANOVA do modelo de regressão para o fator de modificação da resistência paralelo do *Eucalyptus salign* em função da temperatura.

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Modelo	2	0,05029680	0,01257420	8,37	0,02
Resíduos	7	0,00751324	0,00150265		
Total	9	0,05781000			

Em que: G.L. é o grau de liberdade, S.Q. é a soma de quadrados e Q.M são os quadrados médios.

Os parâmetros β estimados para o modelo de regressão polinomial (Equação 21) e os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 28. A hipótese nula (H_0) é que os parâmetros β não são significativos. Quando o p-valor de cada parâmetro β for menor que 0,05, rejeita-se a hipótese nula, significando que o parâmetro β é significativo para o modelo de regressão polinomial.

Tabela 28. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo em função da temperatura do *Eucalyptus saligna*.

Parâmetros	Estimativa	Desvio-padrão	t	p-valor
β_0	1,30	0,1947	6,67	0,00
β_1	$-2,32 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$	-2,17	0,08
β_2	$5,72 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-4}$	2,98	0,03
β_3	$-4,80 \times 10^{-6}$	$1,37 \times 10^{-6}$	-3,50	0,02
β_4	$1,28 \times 10^{-8}$	$3,37 \times 10^{-9}$	3,80	0,01

O modelo com melhor ajuste do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular para a espécie *Eucalyptus saligna* foi expresso pela Equação 22. Na Tabela 29, são apresentados os resultados da ANOVA desse modelo, mostrando que o modelo foi significativo ($p < 0,05$).

$$k_{fe,0}(\theta) = \beta_0 + \beta_1\theta^3 + \beta_2\theta^4, \quad (21)$$

sendo $k_{fe,0}(\theta)$ o fator de modificação da resistência ao embutimento paralelo, θ a temperatura em °C e β_n os parâmetros do modelo.

Tabela 29. ANOVA do modelo de regressão do fator de modificação da resistência perpendicular do *Eucalyptus saligna* em função da temperatura.

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Modelo	2	0,01728380	0,005761260	6,55	0,03
Resíduos	7	0,00527621	0,000879369		
Total	9	0,02256000			

Em que: G.L. é o grau de liberdade, S.Q. é a soma de quadrados e Q.M são os quadrados médios.

Os parâmetros β para o modelo de regressão ajustado (Equação 22) e os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 30. Todos os parâmetros β são significativos para o modelo de regressão.

Tabela 30. Valores dos parâmetros do modelo do fator de modificação da resistência ao embutimento perpendicular do *Eucalyptus saligna* em função da temperatura.

Parâmetros	Estimativa	Desvio-padrão	t	p-valor
β_0	0,62	$1,48 \times 10^{-2}$	41,65	0,00
β_1	$1,53 \times 10^{-7}$	$3,91 \times 10^{-8}$	3,92	0,01
β_2	$-9,27 \times 10^{-10}$	$2,21 \times 10^{-10}$	-4,20	0,00

No modelo de regressão para o *Eucalyptus saligna*, foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,87. A partir deste modelo de regressão foi possível elaborar um gráfico de superfície, o qual apresentado na Figura 43b.

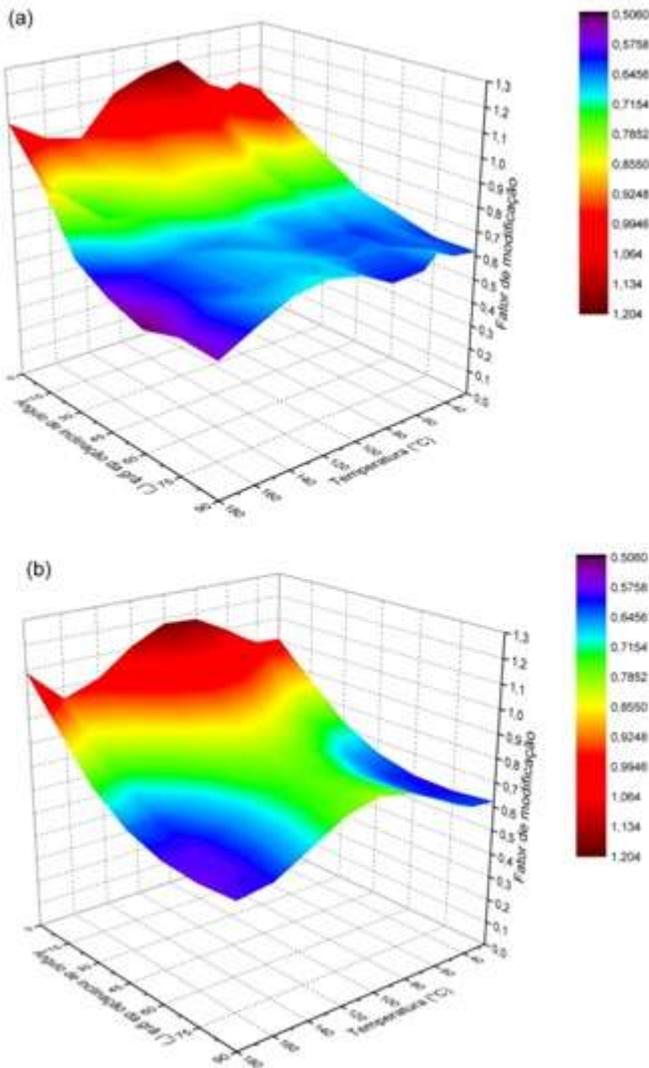


Figura 43. Gráficos dos fatores de modificação característicos do *Eucalyptus saligna*: (a) valores experimentais e (b) valores estimados.

A comparação entre os fatores de modificação experimentais (Figura 43a) e estimados pelo modelo de regressão (Figura 43b) mostrou que ocorreu um distanciamento entre os fatores de modificação experimentais e estimados em algumas combinações de temperatura e

de ângulo da grã. Isso foi observado na Tabela 31, onde são apresentados os erros relativos percentuais dos fatores de modificação característicos para a madeira de *Eucalyptus saligna*. O maior erro é observado para o ângulo de 90° e temperatura de 80 °C (-26,9%). Os erros observados para o *Eucalyptus saligna* foram inferiores ao do *Pinus elliottii*, indicando que o modelo para essa espécie foi melhor ajustado aos dados experimentais.

Os modelos para os fatores de modificação propostos para ambas às espécies devem ser utilizados com cautela na previsão da capacidade de carga das ligações. Testes adicionais devem ser realizados com um maior número de amostras e em mais níveis de temperatura.

Tabela 31. Erro relativo percentual dos fatores de modificação característicos do *Eucalyptus saligna*.

θ (°C)	α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90
25	-0,7%	-0,6%	8,3%	7,2%	7,5%	1,6%	-0,7%
40	3,8%	14,2%	10,1%	5,6%	6,1%	5,2%	-0,1%
50	-2,7%	13,2%	5,2%	0,3%	-3,7%	-2,0%	1,9%
60	-2,3%	-6,8%	-4,9%	-2,9%	-7,0%	-5,0%	-14,1%
80	2,7%	-1,5%	-2,3%	-18,3%	-17,5%	-15,9%	-26,9%
100	-0,1%	-12,5%	-7,1%	-14,8%	-16,4%	-13,8%	-17,3%
120	0,6%	-5,7%	0,7%	-18,1%	-7,1%	-10,0%	-8,0%
140	-4,9%	-2,9%	-1,5%	-4,8%	-0,7%	-1,4%	0,6%
160	3,9%	-15,8%	7,5%	-1,6%	3,6%	8,3%	2,2%
180	-0,7%	-1,2%	-15,0%	-14,7%	-15,8%	-3,9%	-7,7%

Onde θ é a temperatura em °C e α é o ângulo de inclinação da grã em °.

4.10 COEFICIENTE DE RIGIDEZ DE EMBUTIMENTO INICIAL

Na Figura 44, são apresentados os coeficientes de rigidez de embutimento inicial em função da temperatura para as espécies *Pinus elliottii* (Figura 44a) e *Eucalyptus saligna* (Figura 44b). O coeficiente de rigidez de embutimento é pouco influenciado pela temperatura, mas tende a aumentar com o aumento da temperatura de forma não linear, sendo mais evidente para o *Pinus elliottii*.

Na Figura 45, são apresentados os coeficientes de rigidez de embutimento em relação ao ângulo da grã para o *Pinus elliottii* (Figura

45a) e para o *Eucalyptus saligna* (Figura 45b). Observa-se que os valores diminuem com o aumento do ângulo de inclinação da grã. A 25 °C, o coeficiente de rigidez de embutimento para o *Pinus elliottii* foi maior para ângulo de 15° e menor para o ângulo de 75°. Já para o *Eucalyptus saligna*, o maior e o menor coeficientes de rigidez de embutimento foram para os ângulos de 0 e 75°, respectivamente. Schweigler *et al.* (2016), avaliando a rigidez inicial em função do ângulo da grã em corpos de prova de LVL, relatam que a rigidez de embutimento determinada após ciclos de carga e descarga produzem dados mais confiáveis que o coeficiente de rigidez determinada em testes sem ciclos, devido a menor variabilidade dos valores. No presente trabalho, o coeficiente de rigidez de embutimento foi determinada na parte elástica inicial da curva resistência ao embutimento \times deslocamento, pois não foram realizados ciclos de carga e descarga.

Os valores médios e os desvios padrão da rigidez de embutimento em todas as temperatura e ângulos da grã para as das duas espécies são apresentados no Apêndice E (Tabela 33).

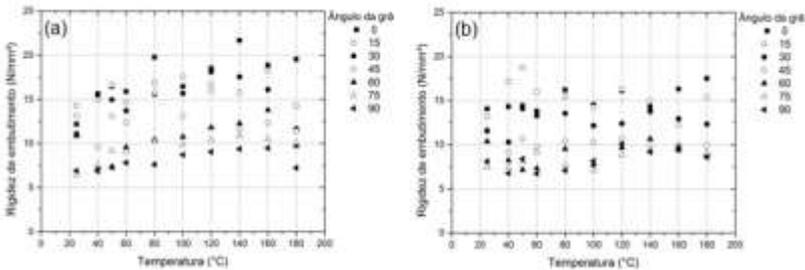


Figura 44. Coeficientes de rigidez de embutimento inicial em função da temperatura: (a) *Pinus elliottii* e (b) *Eucalyptus saligna*.

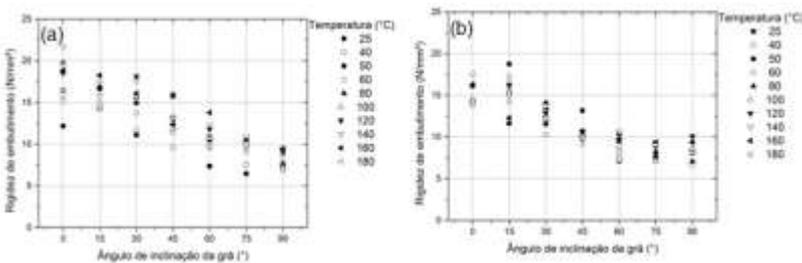


Figura 45. Coeficientes de rigidez de embutimento inicial em função do ângulo da grã: (a) *Pinus elliottii* e (b) *Eucalyptus saligna*.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na presente pesquisa limitam-se a amostra estudada, a qual é caracterizada por ser madeira com idade aproximada de 13 anos de uma espécie de conífera e de uma folhosa, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente. Neste trabalho, foram realizados testes de embutimento em corpos de prova de madeira entre temperaturas de 25°C e 180 °C, com ângulos da grã entre 0° e 90° e pino metálico de 10 mm de diâmetro. A extrapolação desses resultados para outras situações deve ser realizada com cautela. Os dados permitem concluir que:

- a) a metodologia da norma americana para determinação da força de embutimento foi mais satisfatória que a da norma europeia nesta pesquisa, pois os valores de resistência ao embutimento apresentaram menores coeficientes de variação e os deslocamentos médios do pino para a força de embutimento foram mais homogêneos nos diferentes níveis de temperatura e ângulo da grã;
- b) a temperatura e o ângulo entre a força e a grã da madeira influenciam na resistência ao embutimento, sendo que quanto maior o ângulo entre a força e a grã da madeira, menor é a influência da temperatura na resistência ao embutimento;
- c) os fatores de modificação obtidos para a resistência ao embutimento característica em função da temperatura e do ângulo entre a força e a grã puderam ser representados por modelos matemáticos significativos baseados no modelo de Hankinson. No modelo matemático para a madeira de *Pinus elliottii* adotou-se o valor de $n = 2$ e, para a madeira de *Eucalyptus saligna*, o valor adotado foi 1,5. Nesses modelos, os coeficientes de determinação foram de 84% e 87% para o *Pinus elliottii* e para o *Eucalyptus saligna*, respectivamente;
- d) os modelos matemáticos propostos para os fatores de modificação na presente pesquisa são preliminares e devem ser utilizados com cautela na modelagem de ligações, observando que são válidos para as madeiras e pino metálico usados nessa pesquisa;
- e) somente o ângulo entre o esforço e a grã da madeira influencia no coeficiente inicial de rigidez de embutimento.

Trabalhos futuros devem ser realizados para dar continuidade às pesquisas sobre a resistência e coeficiente inicial de rigidez de embutimento à temperaturas elevadas e com diferentes ângulos entre a força e a grã da madeira. Recomenda-se que trabalhos sejam desenvolvidos nos seguintes âmbitos:

- avaliar a influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento em outras espécies, principalmente de folhosas com diferentes classes de resistências;
- avaliar a influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento com as mesmas espécies utilizados na presente pesquisa, porém com madeira adulta;
- avaliar a influência de tempos de aquecimento diferentes da madeira em testes de embutimento;
- validar os modelos matemáticos propostos para a estimação da resistência ao embutimento em função da temperatura e do ângulo da grã por meio de resultados experimentais de ligações do tipo pino.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 7190**: Norma de projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 107 p.
- ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012 / ABRAF**. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013.
- ACR. **Anuario estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina 2016**. Associação Catarinense de Empresas Florestais. Lages, p. 108. 2016.
- ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. Universidade Federal de São Paulo. São Carlos, p. 132. 2014.
- ALMEIDA, D. H. D.; DIAS, A. A. Comparison between test methods to determine wood embedment strength parallel to the grain. **Revista Árvore**, 40, n. 4, 2016. 741-748.
- ALVEZ, S. S.; FIGUEIREDO, J. L. A model for pyrolysis of wet wood. **Chemical Engineering Science**, 44, n. 12, 1989. 2861-2869.
- ASTM. **ASTM D5764-97a**: Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products. Philadelphia: [s.n.], 2013. 5p p.
- AUDEBERT, M. et al. Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire. **Fire Safety Journal**, 56, 2013. 52-64.
- AUDEBERT, M. et al. Experimental and numerical analysis of timber connections in tension perpendicular to grain in fire. **Fire safety journal**, 63, 2014. 125-137.
- AUSTRUY, C. Fire resistance of timber connections. **perso.crans.org/austry/rapport%20latex/rapportlatex.pdf**, 2007. Acesso em: 22 julho 2014.
- BACK, E. L.; SALMÉN, L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. **Tappi Journal**, 65, n. 7, 1982. 107-110.
- BARDET, S.; BEAUCHÊNE, J.; THIBAUT, B. Influence of basic density and temperature on mechanical properties perpendicular to grain of ten wood tropical species. **Forest Science**, 60, 2003. 49-59.
- BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce. **Wood Holzforschung**, 57, 2003. 539-546.
- BIRD, R. B.; STEWART, W.; LIGHTFOOT, E. **Fenômenos de transporte**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

BLERON, L.; DUCHANOIS, G. Angle to the grain embedding strength concerning dowel type fasteners. **Forest Products Journal**, 56, n. 6, 2006. 44-50.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Krieger Publishing, 1993. 712 p.

CACHIM, P. B.; FRASSEN, J. Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model. **Fire safety journal**, 44, 2009. 840-853.

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. **Ciência Florestal**, 26, n. 2, 2016. 389-400.

CHUO, T. C. B. **Fire performance of connetions in laminated veneer lumber**. University of Canterbury. [S.l.]. 2007.

CHUI, Y. H., SMITH I., CHEN Z.. Influence of fastener size on lateral strength of steel-to-wood screw joints. **Forest Prod. J**, 56, 2006, 49-54.

CORREIA, N. F. **Comportamento de ligações em estruturas de madeira sob influência de temperaturas elevadas**. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2009.

DHIMA, D. **Verification expérimentale de la résistance au feu des assemblages d'éléments en bois**. Paris. 1999.

DIAS, A. A.; ASSUNÇÃO, C. H. S. D.; ALMEIDA, D. H. **Comparação de critérios de dimensionamento de ligações por pinos em estruturas de madeira**. Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira. Natal: [s.n.]. 2014.

EHLBECK, J.; WERNER, H. **Tragfähigkeit von Laubholzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmittein**. Universität Karlsruhe. [S.l.]. 1992.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 26891**: timber structures - joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussel: [s.n.], 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1 Eurocode 5**: Desing of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for bulding. Brussel: [s.n.], 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2 Eurocode 5**: Desing of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire desing. Brussels: [s.n.], 2004.

- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 383**: timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. Brussel: [s.n.], 2007.
- FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, 9, n. 4, 2009. 157-174.
- FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood handbook**. Helsinki: [s.n.], 2003. 66 p.
- FPL. **Wood Handbook—Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.
- FPL. **Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190**. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.
- FRANKE, S.; MAGNIERE, N. **Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections**. International Network on Timber Engineering Research. United Kingdom: [s.n.]. 2014.
- FRANKE, S.; MAGNIÈRE, N. **The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards**. RILEM. [S.l.]: [s.n.]. 2014.
- FRANKE, S.; QUENNEVILLE, P. **Embedding behaviour of lvl and radiata pine lumber**. Wood Conference on timber engineering. Riva del Gard: [s.n.]. 2010.
- FREDLUND, B. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. **Fire safety Journal**, 20, 1993. 39-49.
- FRÜHWALD, E. Effect of high-temperature drying on properties of Norway spruce and Larch. **Holz als Roh-und Werkstoff**, 65, 2007. 411-418.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112 p.
- GARCIA, A. B.; ITAGAKI, N. Evaluation of embedding strength on Uruguayan wood to apply the European yield theory for double shear bolted joint. **J Wood Sci**, 60, 2014. 86-95.
- GEHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. **Wood and Fiber**, 14, n. 1, 1982. 4-36.
- GERHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. **Wood and Fiber**, 14, n. 1, 1982. 4-36.

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; KOČETOV-MIŠULIĆ, T. EMBEDMENT TEST OF WOOD FOR DOWEL-TYPE FASTENERS. **Wood Research**, 57, n. 4, 2012. 639-650.

GOODRICH, T. et al. High-temperature mechanical properties and thermal recovery of balsa wood. **J Wood Sci**, 56, 2010. 437-443.

GREEN, D. W.; EVANS, J. W.; PELLERIN, R. **Moisture content and the flexural properties of lumber**: species differences. International Timber Engineering Conference. London: [s.n.]. 1991.

HALLER, P. **Progress in timber joint development and modeling**. 5^o World Conference on Timber Engineering. [S.l.]: [s.n.]. 1998. p. 337-344.

HART, C. A. **The drying of wood**. North Carolina Agriculture Extension Service. Raleigh, p. 24. 1966.

HUBNER, U.; BOGENSPERGER, T.; SCHICKHOFER, G. **Embedding strength of European hardwoods**. International Council for research and innovation in building and construction. St. Andrews: [s.n.]. 2008.

IBÁ. **Relatório Ibá 2015**. Industria Brasileira de Árvores. São Paulo, p. 80. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION. **NCh 1198**: Diseño e cálculo de estructuras en maderas. Santiago: [s.n.], 2006.

IPT. **Madeira**: Uso sustentável na construção civil. 2^o Ed. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2009. 103 p.

IRVINE, G. The glass transition of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. **Tappi Journal**, 67, n. 5, 1984. 116-121.

JASSENS, M. **Thermo-physical properties for wood pyrolysis models**. Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast: [s.n.]. 1984. p. 607-618.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for Bridge and Structural Engineering. Zurich: [s.n.]. 1949. p. 249-262.

KARLSEN, G. G. **Wooden Structures**. Moscow: Mir Publishers, 1967.

KENNEDY, S. et al. **Design equations for embedment strength of wood for threaded fasteners in the canadian timber design code**. Word Conference of Timber Engineering. Quebec: [s.n.]. 2014.

KHELIFA, M. et al. Analysis of the behavior of multiple dowel timber connections in fire. **Fire safety journal**, 68, 2014. 119-128.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, v. 1, 1968. 592 p.

- LAPLANCHE, K. **Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois: approche expérimentale et modélisation**. Université Blaise Pascal-Clermont II. [S.l.]. 2006.
- LAU, P. H. **Fire resistance of connections in laminated veneer lumber (LVL)**. University of Canterbury. [S.l.]. 2006.
- LE GOVIC, C. **Les assemblages dans la construction en bois**. [S.l.]: Centre Technique du Bios et de l'Ameublement, 1995.
- LLANA, D. F. et al. **Influence of Temperature and Moisture Content in Non-destructive values of Scots pine (Pinus sylvestris L.)**. 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, Wisconsin, USA: [s.n.]. 2013. p. 451-458.
- LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, n. 18, 2002. 77-107.
- LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Influência do ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira sobre a resistência ao cisalhamento. **Engenharia Civil**, 37, 2010. 5-16.
- MANRIQUEZ, M. J. **Coefficiente de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 259. 2012.
- MANRIQUEZ, M. J.; MORAES, P. D. **Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento do paricá**. XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira. Londrina: [s.n.]. 2008.
- MARAVEAS, C.; MIAMIS, K.; MATTHAIYOU, C. E. Performance of Timber Connections Exposed to Fire: A Review. **Fire Technology**, 2013.
- MOLINA, J. C. et al. Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004). **REM: Int. Eng. J.**, 79, n. 1, 2017. 9-17.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3ª edição. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- MORAES, P. D. D. et al. Influence of temperature on the embedding strength. **Holz als Roh- und Werkstoff**, 63, 2005. 297-302.
- MORAES, P. D.; CORREIA, N. D. F.; RODRIGUES, J. P. C. Behavior of bolted timber joints subjected to high temperatures. **Eur. J. Wood Products**, 70, 2012. 225-232.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2014. 194 p.

MORSING, N. Desiccation of wood: the influence of hygrothermal treatment on compression of Beech perpendicular to the grain. **Technical University of Denmark**, n. 79, 2000. 1-145.

MOSS, P. J. et al. Fire performance of bolted connections in laminated veneer lumber. **Fire and Materials**, 33, 2009. 223-243.

MOSS, P.; FRAGIACOMO, M.; AUSTRUY, C. Experimental Testing and Analytical Prediction of the Behaviour of Timber Bolted Connections Subjected to Fire. **Fire Technology**, 46, 2010. 129–148.

NDS. **National Design specification for wood construction**. Leesburg: American Wood Council, 2015.

NOREM, J. Load-bearing capacity of nailed joints exposed to fire. **Fire Materials**, 20, 1996. 133-140.

OLSSON, A. M.; SALMÉN, L. **Humidity and temperature affecting hemicellulose softening in wood**. International Conference of Coast Action. Denmark: [s.n.]. 1997. p. 269-2779.

OSTMAN, B. A. Wood tensile strength at temperature and moisture contents simulating fire conditions. **Wood Science and Technology**, 19, 1985. 103-116.

PEDERSEN, M. U. **Dowel Type Timber Connections: Strength modelling**. [S.l.]: DANMARKS, 2002.

PEDRESCHI, R.; GOMES, F. C.; MENDES, L. M. Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. **Cerne**, 11, n. 3, 2005. 283-293.

PENG, L. et al. Fire resistance performance of unprotected wood–wood–wood and wood–steel–wood connections: A literature review and new data correlations. **Fire Safety Journal**, 45, 2010. 392-399.

PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria. **Revista árvore**, 37, n. 3, 2013. 567-576.

PERRÉ, P.; DEGIOVANNI, A. Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. **International Journal of heat and mass transfer**, Orlando, 33, n. 11, 1990. 2463-2478.

PESCADOR, W.; MANRÍQUEZ, M.; MORAES, P. D. **Influência da Temperatura sobre a Resistência ao Arrancamento do Paricá**. Encontro Brasileiro de Madeiras e Estruturas de Madeira. Londrina: [s.n.]. 2008.

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

- PINHEIRO, P. C. C.; SÈYE, O. **Influência da temperatura da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus**. Congresso anual da associação brasileira de metalurgia e materiais. Belo Horizonte: [s.n.]. 1998.
- RACHER, P. et al. Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connections. **Engineering structures**, 32, 2010. 1148-1157.
- RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G. Effect of moisture content dowel-bearing strength. **Wood and fiber science**, 33, n. 1, 2001.
- RAMSKILL, T. E. **Effect of cracking on Lag Bolt Performance**. Virginia Polytechnic Institute and State University. [S.l.], p. 280. 2002.
- RICE, R. W.; SHEPARD, R. The thermal conductivity of plantation grown white pine (*Pinus strobus*) and red pine (*Pinus resinosa*) at two moisture content levels. **Forest Products Journal**, 54, n. 1, 2004.
- SALMÉN, L. **Temperature and water induced softning behaviour of wood fiber based material**. The Royal Institute of Technology. Estocolmo. 1982.
- SANDHAAS, C. et al. **Embedment tests parallel-to-grain and ductility in tropical hardwood species**. World conference on timber engineering. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 10.
- SANDHAAS, C. et al. Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species. **Eur. J. Wood Prod**, 2012. 599–608.
- SANTOS, A. D. S. et al. Panorama do Comércio de Madeira Serrada na Microrregião Geográfica de Florianópolis-SC. **Floresta e Ambiente**, 21, n. 1, 2014. 19-29.
- SANTOS, C. L. et al. BEARING PROPERTIES OF PORTUGUESE PINE WOOD BENEATH A LATERALLY LOADED DOWEL. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 20, 2008. 45-51.
- SANTOS, C. L. et al. A Comparison Between the EN 383 and ASTM D5764 Test Methods for Dowel-Bearing Strength Assessment of Wood: Experimental and Numerical Investigations. **Strain**, 46, 2010. 159–174.
- SANTOS, R. G. M. **Comportamento de ligações parafusadas simples em estruturas de madeira sob ação da temperatura**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2012.
- SAWATA, K.; YASUMURA, M. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. **J Wood Sci**, 2002. 138-146.
- SCHNEID, E. et al. **Análise de ligações parafusadas em estruturas de madeira sob ação de temperaturas elevadas**. XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Natal: [s.n.]. 2014.

SCHWEIGLER, M. et al. Load-to-grain angle dependence of the embedment behavior Load-to-grain angle dependence of the embedment behavior. **Construction and Building Materials**, n. 126, 2016. 1020–1033.

WHALE, L.R.J.; SMITH, I., **The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5**, In: Proceedings of CIB-W18, Paper 19-7-6, 1986.

SMITH, I., WHALE, L.R.J., ANDERSON, C., HILSON, B.O., RODD P.D. Design properties of laterally loaded nailed or bolted joints. **Can. J. Civ. Eng.** 15(4), 1988, 633-643.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SIAU, J. F. **Transport process in wood**. New York: Springer wood since, 1984. 245 p.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

SOBRAL, L. **Acertando o alvo 2: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no estado de São Paulo**. Belém: Imazon, 2002. 72 p.

SZÜCS, C. A. **Estudo do comportamento da madeira a esforços inclinados**. Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. [S.l.]: [s.n.]. 1992. p. 53-60.

THIAM, M.; MILOTA, M. R.; LEICHTI, R. J. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of Western hemlock lumber. **Forest Products Journal**, 52, n. 4, 2002. 64-68.

VALLE, A. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 194. 1999.

WHALE, L. R. J.; SMITH, I.; HILSON, B. O. **Behaviour of Nailed and Bolted Joints under Short-Term Lateral Load - Conclusions from Some Recent Research**. Proceedings of CIBW18. Florence: [s.n.]. 1986.

WILKINSON, T. L. Dowel Bearing Strength. **Forest Products Laboratory**, 1991. 1-9.

ZHOU, T.; GUAN, Z. W. Review of existing and newly developed approaches to obtain timber embedding strength. **Prog Struct Eng Mater**, 2006.

ZITTO, M. A. S.; KÖHLER, J.; PITER, J. C. Embedding strength in joints of fast-growing argentinean *Eucalyptus grandis* with dowel-type fasteners, 70, 2012. 433-440.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A - Definição do tamanho da amostra

a. Amostra e corpos de prova

A amostra foi composta por 252 corpos de prova de *Eucalyptus grandis* com massa específica aparente média de 718 kg/m³. Essa amostra foi dividida a partir da combinação de 6 níveis de temperatura e 7 ângulos de inclinação da grã. Em cada combinação, foram utilizados 6 corpos de prova. Esses corpos de prova possuem massa específica homogênea verificada por meio da ANOVA para 95% de confiança.

Os corpos de prova foram confeccionados seguindo os critérios estabelecidos na norma ASTM D5764-97a. Para a realização dos testes de embutimento foram utilizados parafusos com rosca parcial 8.8 e com diâmetro de 10 mm.

b. Procedimento experimental

Os procedimentos experimentais foram os mesmos apresentados neste trabalho na seção 3 (Materiais e métodos). Esses procedimentos experimentais foram: aquecimento dos corpos de prova, testes de embutimento, determinação da força de embutimento de acordo com a norma ASTM D5764-97a, determinação da resistência ao embutimento média.

c. Tamanho da amostra

A definição do tamanho da amostra foi realizada utilizando-se a Equação 24, com nível de confiança de 95% e erro máximo da estimativa de 10%. Os resultados para o tamanho da amostra são apresentados no Tabela 32.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right)^2, \quad (22)$$

sendo n o número de corpos de prova calculado da amostra, $Z_{\alpha/2} = 1,96$ o valor crítico que corresponde ao grau de confiança, σ o desvio padrão e E é o erro máximo da estimativa.

O estudo sobre o tamanho da amostra mostram que o número de corpos de prova necessário para a obtenção dos valores médios de resistência ao embutimento com 95% de confiança dependem da combinação entre a temperatura e o ângulo de inclinação da grã. Dessa forma, para a definição do tamanho da amostra utilizou-se como critério a média aritmética do número de corpos de prova entre todas as combinações.

Tabela 32. Dados utilizados para calcular o tamanho da amostra dos ensaios de resistência ao embutimento.

α (°)	θ (°C)	$f_{e,ab}$ (MPa)	σ (MPa)	C.V. (%)	E (10%)	n
0	25	44,0	4,5	10,1%	4,4	4
0	60	31,0	7,6	24,4%	3,1	23
0	80	31,6	4,4	14,1%	3,2	8
0	100	30,2	4,8	15,9%	3,0	10
0	120	33,4	5,0	14,9%	3,3	9
0	140	33,6	5,6	16,8%	3,4	11
15	25	41,8	7,6	18,3%	4,2	13
15	60	26,7	2,7	10,0%	2,7	4
15	80	26,9	2,1	7,8%	2,7	2
15	100	27,0	2,4	8,9%	2,7	3
15	120	26,9	4,0	15,0%	2,7	9
15	140	30,3	1,6	5,2%	3,0	1
30	25	29,8	7,6	25,5%	3,0	25
30	60	22,6	2,8	12,6%	2,3	6
30	80	22,2	1,6	7,1%	2,2	2
30	100	18,8	3,3	17,7%	1,9	12
30	120	23,5	3,7	15,7%	2,4	9
30	140	22,7	3,0	13,3%	2,3	7
45	25	27,7	5,7	20,5%	2,8	16
45	60	19,8	3,1	15,7%	2,0	9
45	80	20,9	1,8	8,7%	2,1	3
45	100	18,7	1,7	9,2%	1,9	3
45	120	21,8	7,8	35,7%	2,2	49
45	140	20,6	3,6	17,6%	2,1	12
60	25	27,6	3,6	12,9%	2,8	6
60	60	19,8	4,4	22,3%	2,0	19
60	80	20,4	3,6	17,8%	2,0	12
60	100	19,0	3,0	15,9%	1,9	10
60	120	19,6	4,5	23,0%	2,0	20
60	140	19,9	2,7	13,5%	2,0	7
75	25	26,5	6,2	23,4%	2,6	21
75	60	19,2	4,0	20,9%	1,9	17
75	80	18,8	1,8	9,5%	1,9	3
75	100	16,9	2,0	11,5%	1,7	5
75	120	18,1	1,7	9,1%	1,8	3
75	140	19,0	2,2	11,4%	1,9	5
90	25	26,8	4,1	15,2%	2,7	9
90	60	19,4	3,8	19,4%	1,9	14
90	80	17,1	2,9	16,9%	1,7	11
90	100	17,4	2,4	13,7%	1,7	7
90	120	19,9	3,9	19,8%	2,0	15

Continuação da Tabela 29

α (°)	θ (°C)	$f_{e,\alpha\theta}$ (MPa)	σ (MPa)	C.V. (%)	E (10%)	n
90	140	19,5	3,8	19,7%	2,0	15
média						10

Onde: α =ângulo de inclinação das fibras da madeira; θ =temperatura; $f_{e,\alpha\theta}$ = resistência média ao embutimento em relação ao ângulo de inclinação e temperatura; σ = desvio-padrão; C.V. = coeficiente de variação; $Z_{\alpha/2}$ = valor crítico que corresponde ao grau de confiança; E = erro máximo da estimativa; n = número de corpos de prova calculado.

APÊNDICE B - Ensaios preliminares de aquecimento dos corpos de prova

Os ensaios preliminares de aquecimento consistiram em medir a temperatura e registrar o tempo transcorrido para atingir a temperatura desejada no interior do corpo de prova. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com massa específica média igual aos utilizados nos testes de embutimento. Para cada temperatura e espécie foi utilizado 1 corpo de prova, totalizando uma amostra de 18 corpos de prova.

Em cada corpo de prova, foi instalado um termopar tipo K em um furo de 3 mm de diâmetro, cuja extremidade localizava-se no centro do corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 46. Após, a estufa elétrica era aquecida na temperatura desejada e, com a temperatura no interior da estufa estabilizada, os corpos de prova eram inseridos. Os dados de temperatura e de tempo foram registrados por um sistema de aquisição de dados onde foram conectados os termopares.

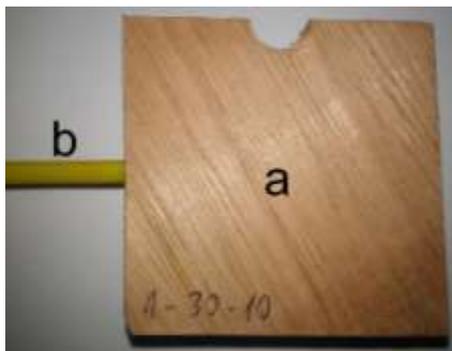


Figura 46. Instrumentação para a medição da temperatura: (a) corpo de prova; (b) termopar.

A evolução da temperatura durante o aquecimento dos corpos de prova de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus saligna* são apresentadas nas figuras 47 e 48. A partir desses dados, foram determinados os tempos de aquecimento necessários para o interior do corpo de prova atingir a temperatura do forno. Convencionou-se que o tempo de aquecimento seria aquele no qual a diferença entre a temperatura do interior da estufa e do corpo de prova fosse de 5%, conforme indicado nas figuras 47 e 48.

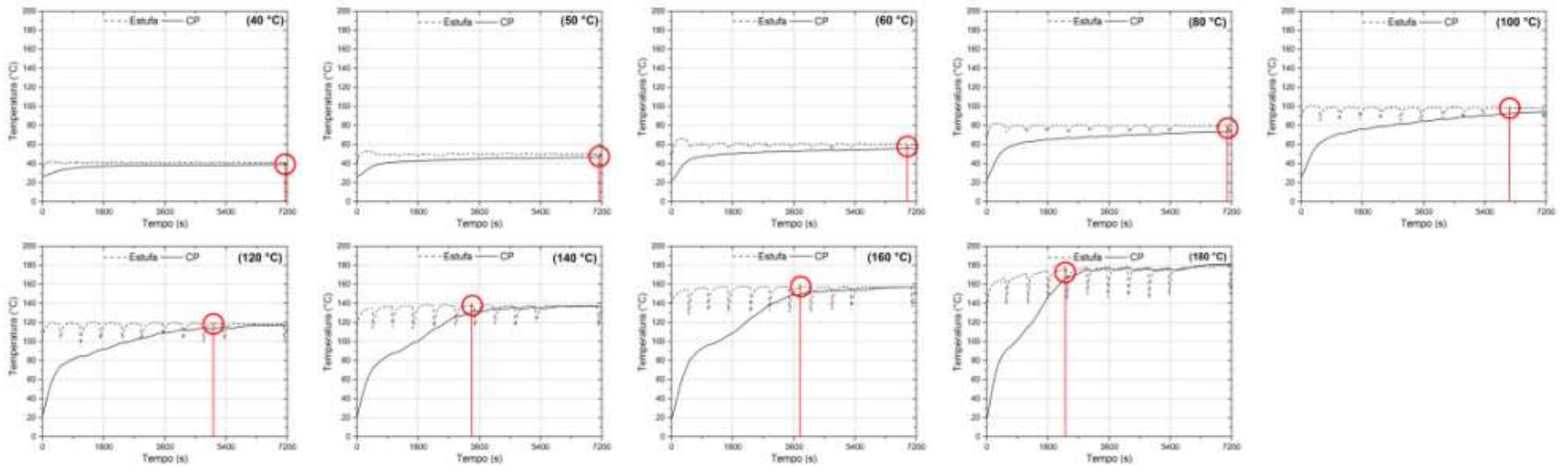


Figura 47. Tempo de aquecimento dos corpos de prova *Pinus elliottii*.

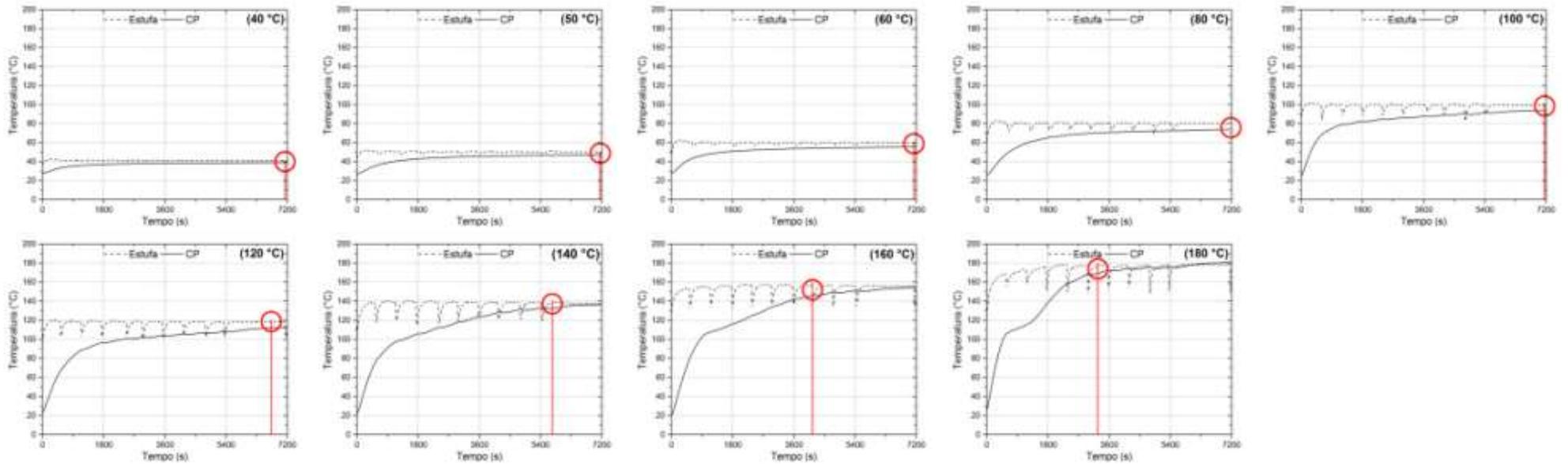


Figura 48. Tempo de aquecimento dos corpos de prova *Eucalyptus saligna*.

APÊNDICE D – Curvas força x deslocamento dos testes de embutimento

Nas figuras 49 a 62, são apresentadas as curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento do *Pinus elliottii* e do *Eucalyptus saligna*. Essas curvas foram utilizados para obter os resultados apresentados nas Figuras 33 e 34.

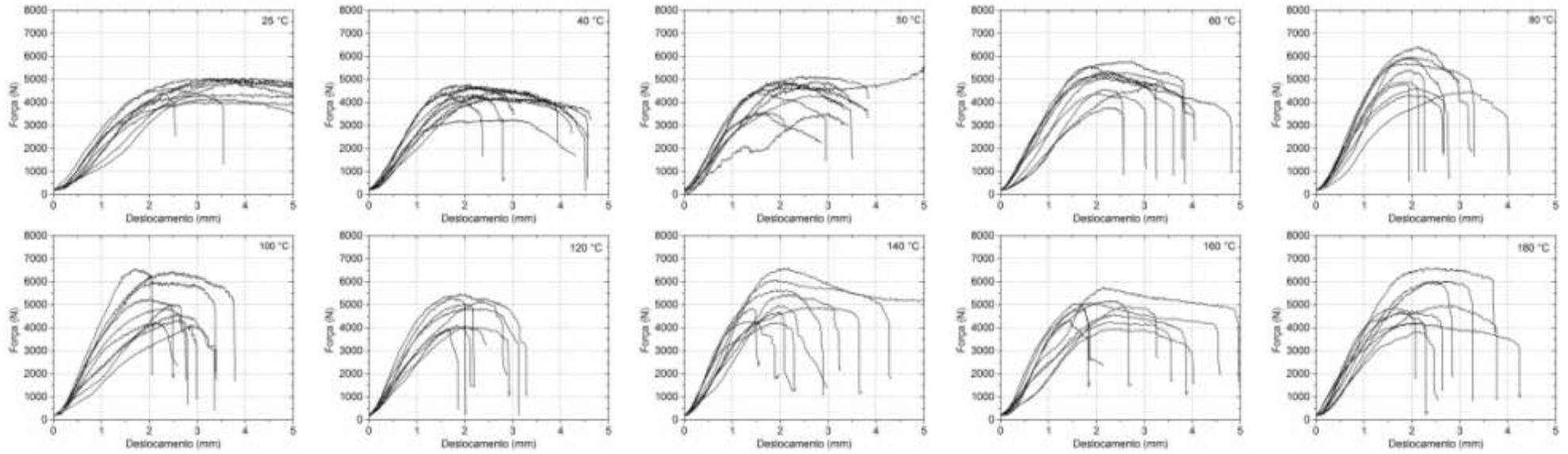


Figura 49. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento paralelo do *Pinus elliottii*.

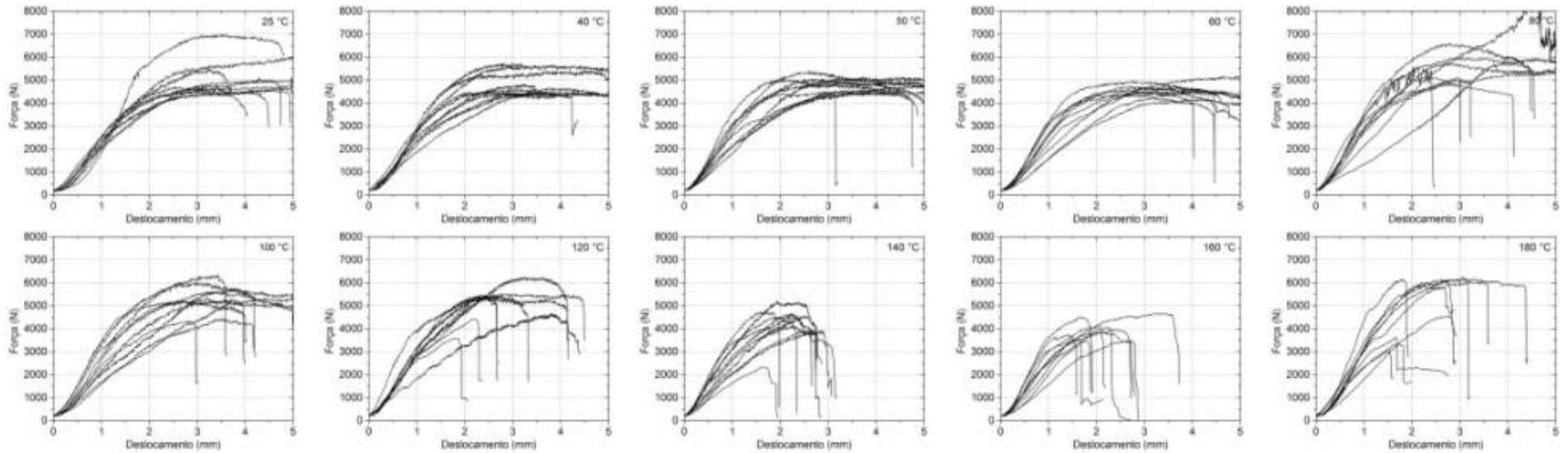


Figura 50. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento paralelo do *Eucalyptus saligna*.

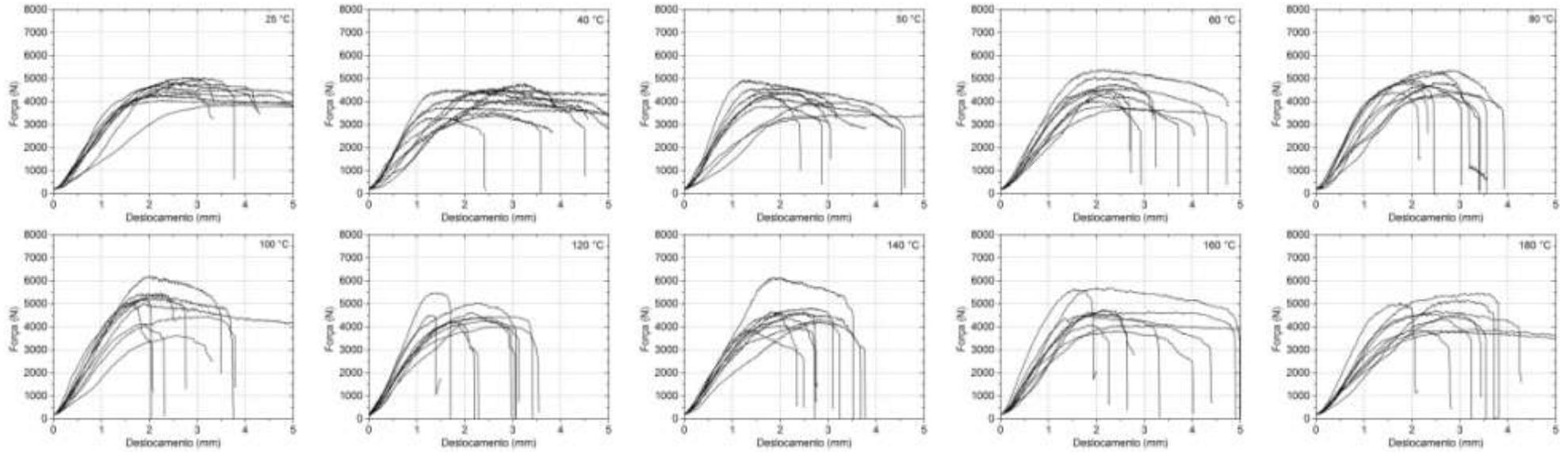


Figura 51. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 15° do *Pinus elliottii*.

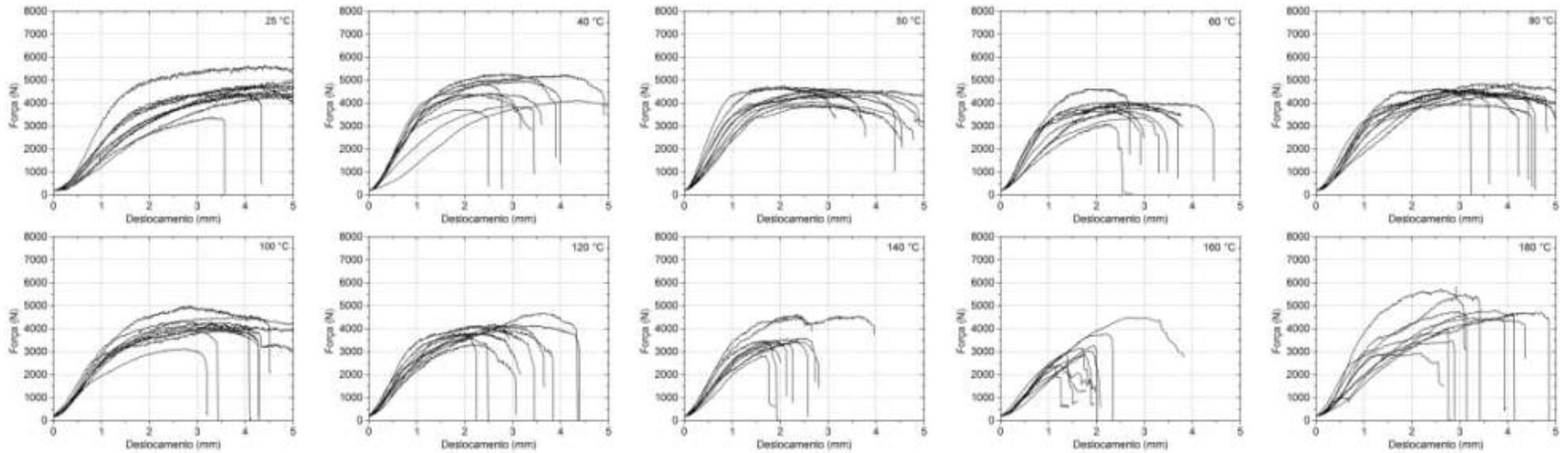


Figura 52. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 15° do *Eucalyptus saligna*.

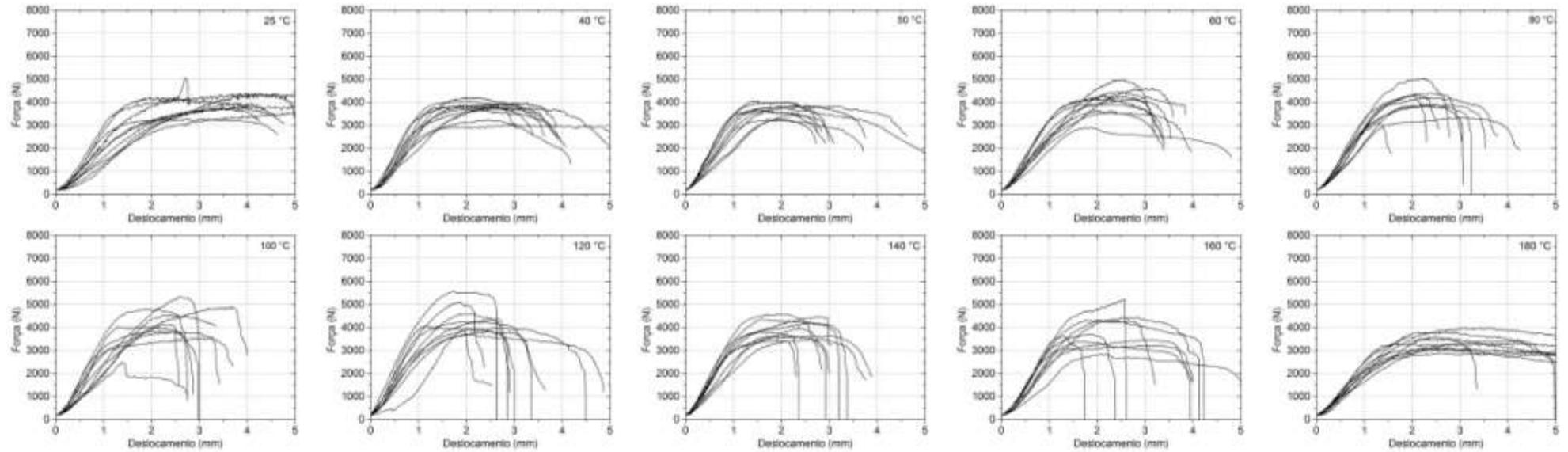


Figura 53. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 30° do *Pinus elliottii*.

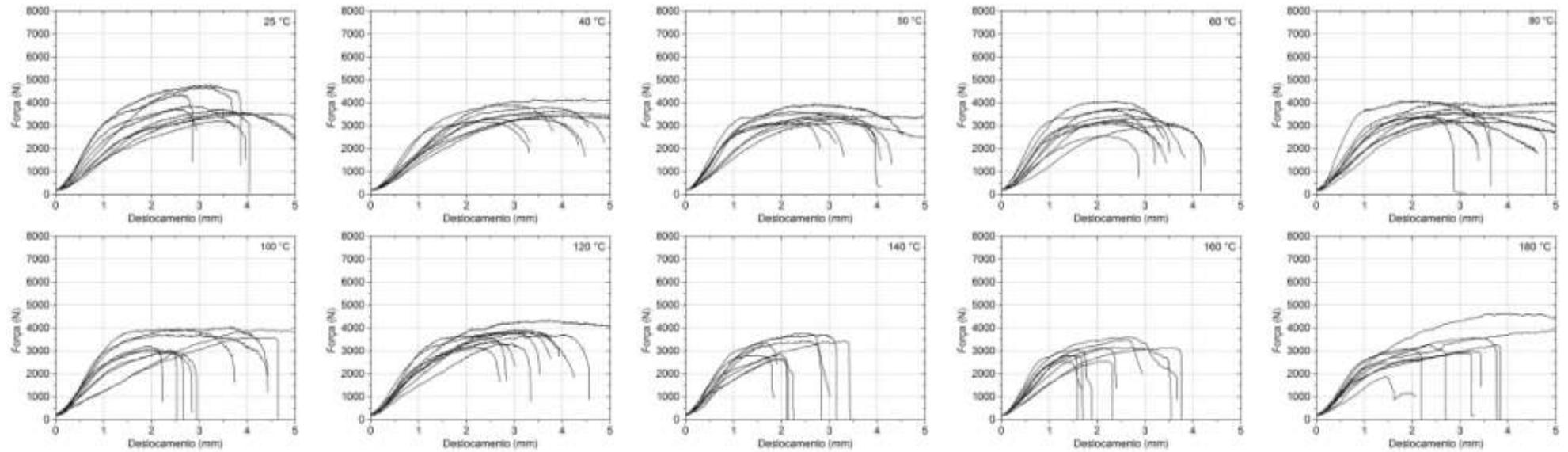


Figura 54. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 30° do *Eucalyptus saligna*.

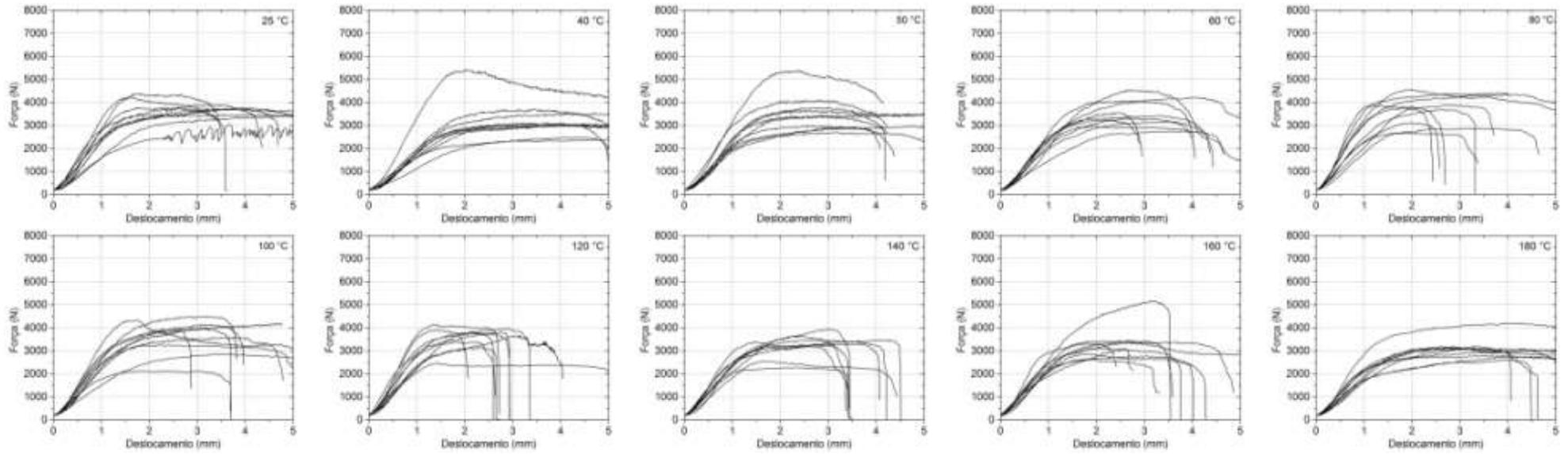


Figura 55. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 45° do *Pinus elliottii*.

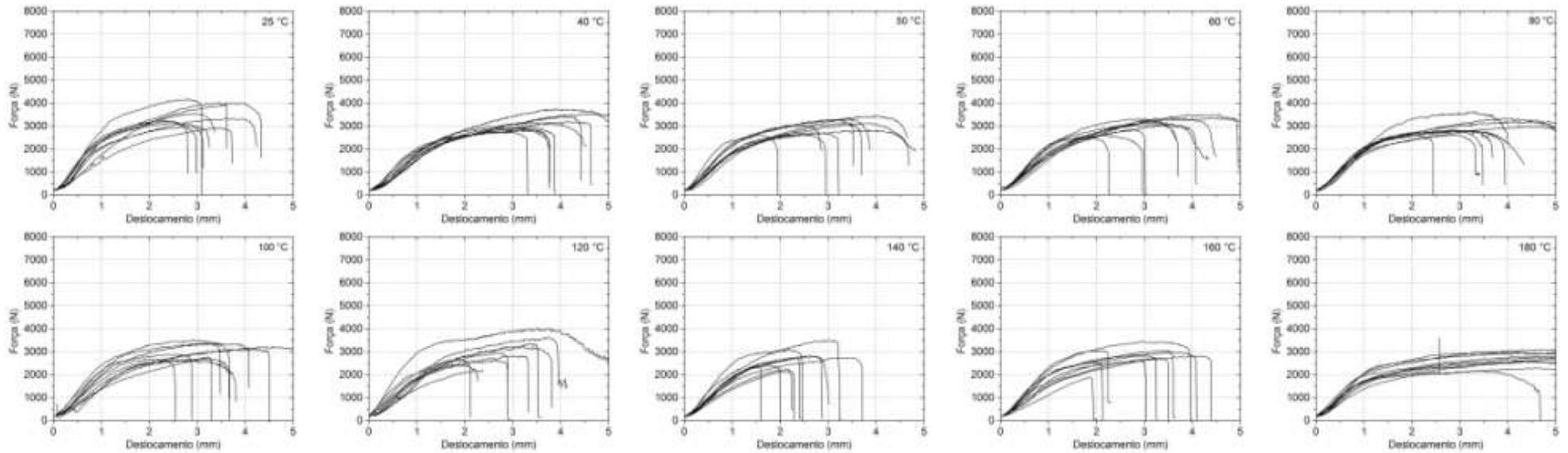


Figura 56. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 45° do *Eucalyptus saligna*.

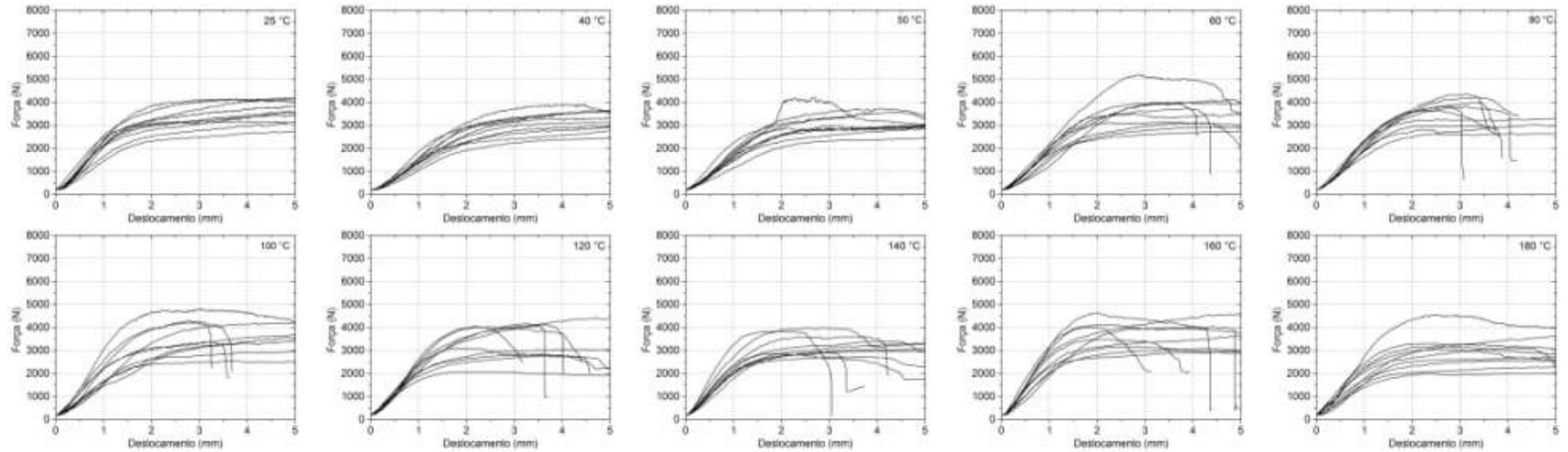


Figura 57. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 60° do *Pinus elliottii*.

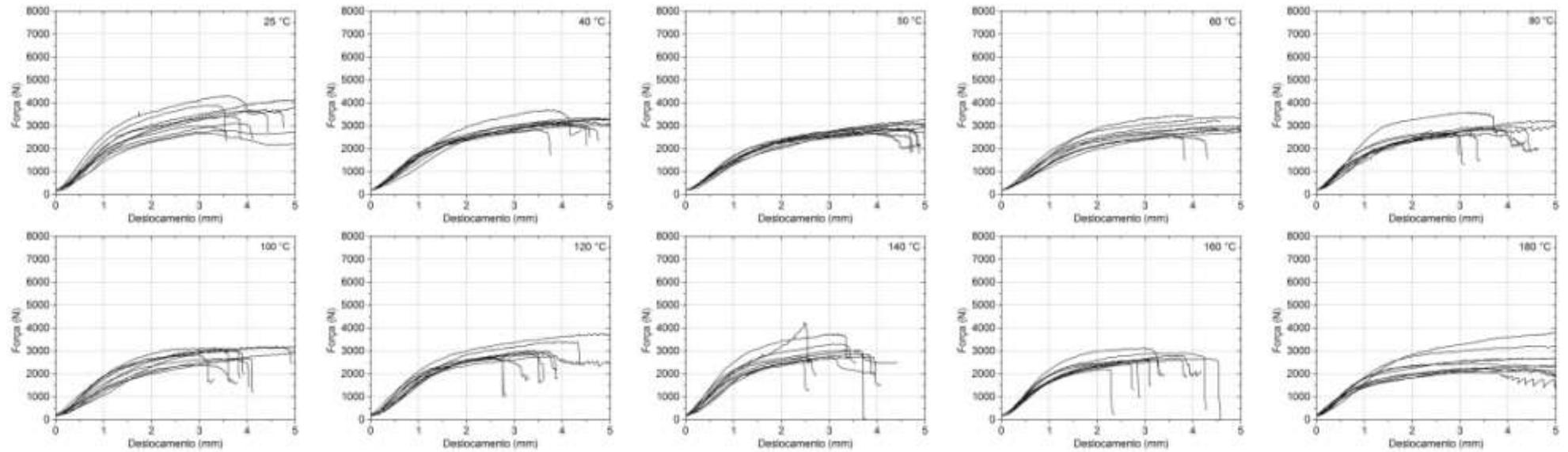


Figura 58. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 60° do *Eucalyptus saligna*.

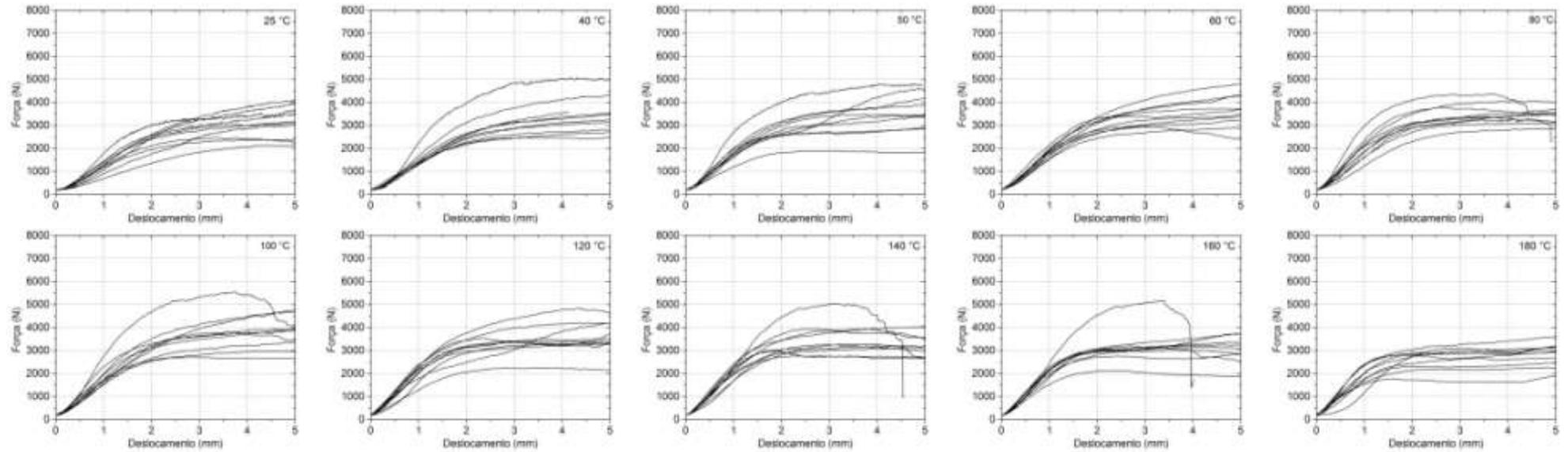


Figura 59. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 75° do *Pinus elliottii*.

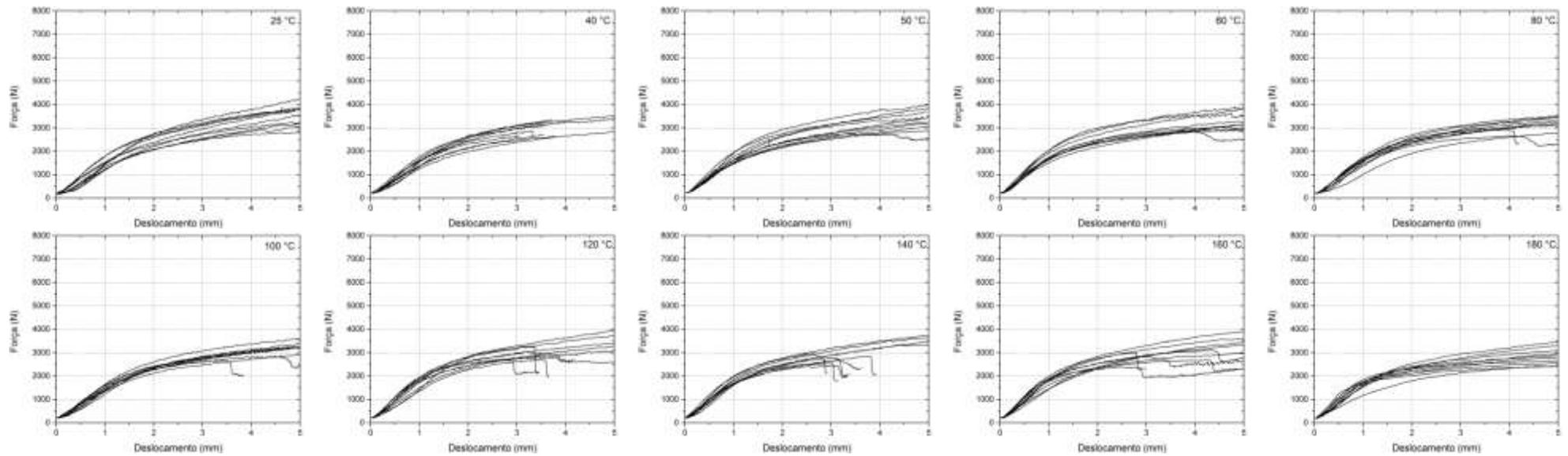


Figura 60. Curvas força \times deslocamento dos testes de embutimento com inclinação da grã de 75° do *Eucalyptus saligna*.

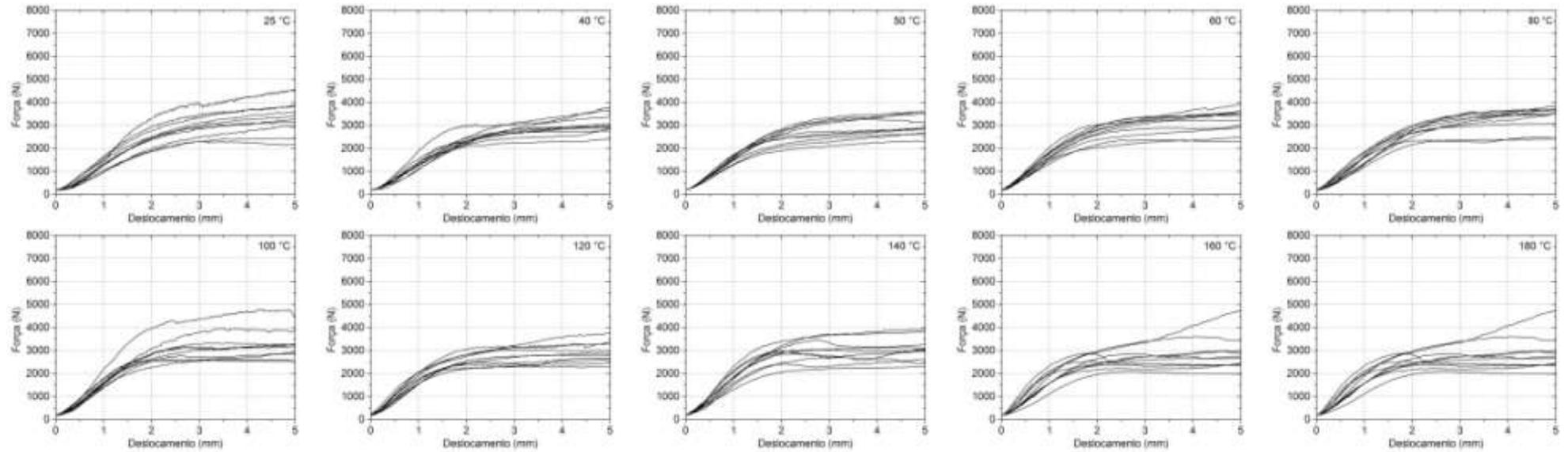


Figura 61. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento perpendicular do *Pinus elliottii*.

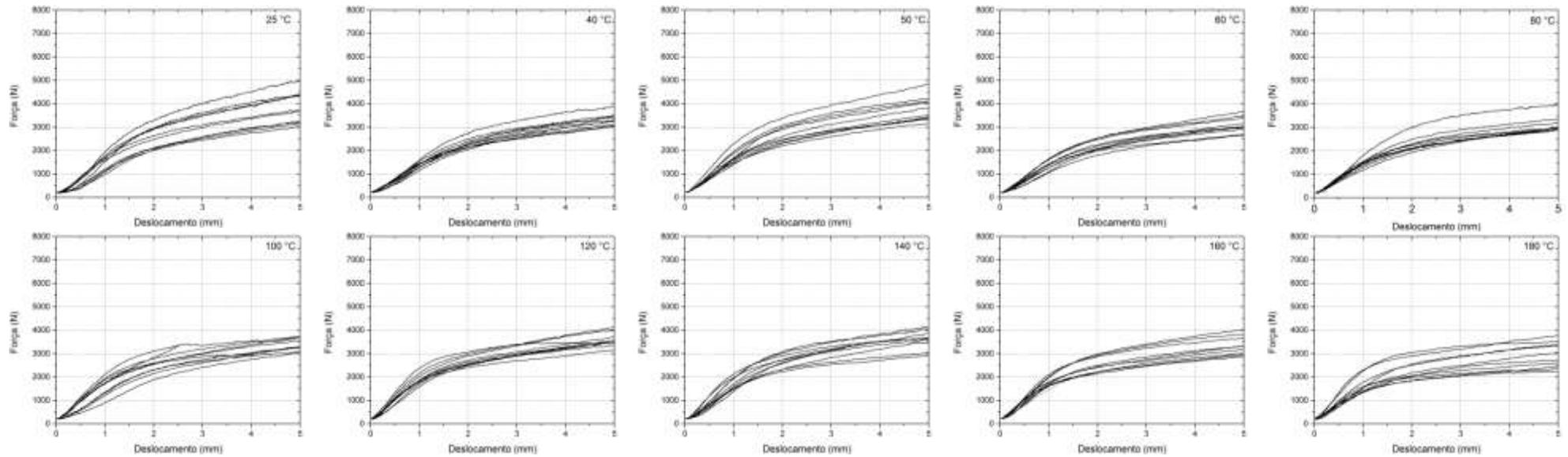


Figura 62. Curvas força × deslocamento dos testes de embutimento perpendicular do *Eucalyptus saligna*.

APÊNDICE E – Coeficientes de rigidez de embutimento médio

Tabela 33. Coeficientes iniciais de rigidez de embutimento médio e os desvios-padrão.

θ (°C)	$K_{i,0}$ (N/mm ³)		$K_{i,15}$ (N/mm ³)		$K_{i,30}$ (N/mm ³)		$K_{i,45}$ (N/mm ³)		$K_{i,60}$ (N/mm ³)		$K_{i,75}$ (N/mm ³)		$K_{i,90}$ (N/mm ³)	
	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s
<i>Pinus elliottii</i>														
25	12,2	2,5	14,3	3,2	11,1	3,5	13,2	3,2	10,9	2,1	6,5	1,9	6,9	1,7
40	15,2	2,9	15,0	4,1	15,7	3,4	9,6	3,8	7,4	1,6	7,5	2,7	6,9	1,2
50	16,5	4,3	16,6	6,1	15,0	4,0	13,1	3,1	7,4	3,3	9,2	2,8	7,3	1,0
60	15,9	2,9	14,6	3,2	13,7	3,1	12,4	2,7	9,6	1,3	9,1	1,1	7,8	1,2
80	19,8	3,8	16,9	3,9	15,6	2,3	15,8	5,2	10,4	1,8	10,3	3,0	7,6	1,1
100	16,5	6,8	17,6	4,3	15,7	4,6	13,2	3,4	10,8	3,4	9,9	3,1	8,7	1,4
120	18,5	4,8	16,7	2,2	18,1	3,8	16,0	3,4	11,8	2,3	10,4	1,9	9,1	1,3
140	21,7	5,3	15,8	2,6	17,6	2,9	11,6	4,7	12,3	2,9	10,9	1,7	9,4	1,9
160	18,9	4,7	18,3	3,4	16,1	2,9	12,4	2,9	13,8	3,1	10,5	2,1	9,5	2,3
180	19,5	3,9	14,3	3,5	11,6	2,8	11,4	2,6	9,7	2,5	10,1	2,2	7,2	0,7
<i>Eucalyptus saligna</i>														
25	14,1	2,9	11,6	3,5	11,6	3,8	13,2	3,5	10,4	1,8	7,5	1,2	8,1	1,7
40	14,3	3,1	17,2	4,8	10,3	2,8	9,2	1,4	8,2	1,0	7,4	0,7	6,8	0,6
50	14,4	3,5	18,8	5,2	14,1	3,7	10,7	2,0	7,2	0,6	8,1	1,0	8,4	1,4
60	13,8	3,9	16,0	4,4	13,3	3,7	9,8	1,6	7,3	1,3	9,2	1,0	6,7	1,0
80	16,2	4,4	15,5	3,7	13,5	4,8	10,4	0,7	9,5	1,5	7,6	1,0	7,1	1,1
100	14,5	4,9	14,3	2,3	12,2	4,5	10,3	2,3	7,7	1,7	7,1	0,7	8,2	1,7
120	16,1	4,3	16,3	4,1	12,4	3,2	10,7	2,7	9,7	1,2	8,8	1,6	10,1	1,3
140	14,3	4,5	14,9	2,8	13,8	3,3	9,9	2,3	10,7	1,8	9,3	0,9	9,2	1,8
160	16,3	4,6	12,3	2,3	12,9	4,0	10,0	2,5	9,7	1,4	9,4	1,5	9,4	1,3
180	17,5	4,7	15,4	5,3	12,3	2,9	9,9	1,6	8,8	1,3	9,1	1,8	8,6	2,4

Onde θ é a temperatura, $K_{i,\alpha}$ é a rigidez de embutimento inicial para cada ângulo de inclinação da grã e s é o desvio-padrão.

APÊNDICE F - Coeficientes de modificação característicos

Tabela 34. Coeficientes de modificação característicos para as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*.

θ (°C)	<i>Pinus elliottii</i>							<i>Eucalyptus saligna</i>						
	α (°)							α (°)						
	0	15	30	45	60	75	90	0	15	30	45	60	75	90
25	1,00	1,06	0,81	0,80	0,69	0,63	0,66	1,00	0,86	0,80	0,70	0,66	0,61	0,62
40	1,05	0,92	0,90	0,63	0,65	0,67	0,63	1,05	1,02	0,82	0,69	0,65	0,65	0,63
50	0,98	0,98	0,93	0,69	0,47	0,67	0,61	1,02	1,04	0,81	0,68	0,62	0,63	0,67
60	1,15	1,07	0,96	0,78	0,75	0,76	0,69	1,07	0,89	0,77	0,70	0,63	0,64	0,61
80	1,19	1,17	0,96	0,84	0,81	0,78	0,72	1,20	1,00	0,85	0,66	0,63	0,64	0,61
100	1,16	1,15	0,92	0,77	0,75	0,82	0,71	1,18	0,92	0,83	0,70	0,66	0,67	0,68
120	1,13	1,08	1,03	0,83	0,70	0,73	0,65	1,12	0,92	0,85	0,64	0,68	0,67	0,71
140	1,22	1,03	0,94	0,76	0,73	0,78	0,70	0,96	0,85	0,75	0,65	0,65	0,65	0,69
160	1,14	1,07	0,86	0,71	0,81	0,68	0,63	0,99	0,71	0,76	0,61	0,61	0,64	0,62
180	1,10	1,04	0,80	0,65	0,59	0,62	0,58	1,08	0,90	0,65	0,56	0,51	0,55	0,54

Onde θ é a temperatura; α é o ângulo da grã.