

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRAS

PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO PARA A
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO
EMBUTIMENTO

São Carlos
2014

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO PARA A
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO
EMBUTIMENTO

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Madeira

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A447p Almeida, Diego Henrique de
Proposta de método de ensaio para determinação da
resistência da madeira ao embutimento / Diego Henrique
de Almeida; orientador Antonio Alves Dias. São Carlos,
2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Estruturas de madeira. 2. Ligações. 3.
Parafusos. 4. Pinos metálicos. 5. Resistência ao
embutimento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**.

Título da dissertação: "Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento".

Data da defesa: 30/06/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Eduardo Chahud**
(Universidade FUMEC)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu pai Salomão, à minha mãe Terezinha, ao meu irmão Tiago e à minha irmã Ingrid.

AGRADECIMENTOS

A DEUS que me proporciona muitas oportunidades e me ampara em todos os momentos desta vida.

Aos meus amados pais Salomão e Terezinha, minhas inspirações e exemplos, minha base e meus amores.

Aos meus irmãos Tiago e Ingrid, meus melhores amigos.

Ao Prof. Dr. Antonio Alves Dias, pela orientação deste trabalho, pelos valiosos ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr pelo companheirismo e amizade.

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior e ao Prof. Dr. Julio Cesar Molina pela amizade e pelas oportunidades oferecidas no LaMEM desde o ano de 2011.

Aos amigos e às amigas do LaMEM: Sabrina, Raquel, Ricardo, Jairo, Lorena, Fabiane, Felipe, Márcio, Amós, Luciano, Marília, Neto, Fatí, Glória, Gorett, Leandro e Juliano.

Aos técnicos do LaMEM: Bragatto, Jaime, Sílvio, Arnaldo, Roberto, Cido, Tânia e Marina.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Ita Construtura pela doação das madeiras de Lyptus.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC/ MINAS), Campus de Poços de Caldas pela possibilidade da prática docente no ensino superior.

A todos que de uma maneira ou de outra me ajudaram a vencer mais esta importante etapa da minha vida!

RESUMO

ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Os pontos com maior fragilidade em estruturas de madeira são as ligações, pois nelas ocorrem as maiores concentrações de tensões. Dentre os tipos de conectores mais utilizados nas ligações temos os pinos metálicos, no quais se enquadra o parafuso comum. Para o dimensionamento de ligações por pinos metálicos, dois parâmetros são utilizados: a resistência ao escoamento do aço e a resistência da madeira ao embutimento. O objetivo deste trabalho foi comparar os métodos de ensaio de documentos normativos (ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007, ASTM D5764:2007, EUROCODE 5:2004, NDS:2001 e LRFD:1996) com a finalidade de estabelecer uma proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento. Foram realizados ensaios na direção paralela e na direção normal às fibras para seis espécies de madeira (Paricá, *Pinus elliottii*, *Pinus oocarpa*, Jatobá, *Lyptus* e Cupiúba), utilizando vários diâmetros (8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm) para os pinos metálicos. Baseado na análise dos resultados obtidos foi proposta a adoção do método de ensaio baseado na EN 383:2007. Os resultados experimentais para a resistência ao embutimento tem maior aprovação com o parâmetro resistência à compressão paralela às fibras, atualmente adotado pela ABNT NBR 7190:1997. Além disso, esse método recomenda dimensões que facilitam a confecção dos corpos de prova, principalmente na direção normal às fibras.

Palavras chaves: Estruturas de madeira; Ligações; Parafusos; Pinos metálicos; Resistência ao embutimento.

ABSTRACT

ALMEIDA, D. H. **Proposed test method for determining of the embedment strength of wood.** 2014. 130 f. Master's Dissertation (Master's in Structural Engineering) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

Main fragility in timber structures occurs in the connections, because to stress concentrations. Most of connections use bolts laterally loaded, a metal dowel-type fastener. Two parameters are used for design of the connections with metal dowel-type in timber structures: yield strength of metal dowel and embedment strength of wood. The aim of this study was to compare the test methods of Codes (ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007, ASTM D5764:2007, EUROCODE 5:2004, NDS:2001 and LRFD:1996) in order to establish a proposed test method for the determination of the embedment strength of wood. The tests were performed applying load in the direction parallel and in the direction perpendicular to the grain for six species of wood (Paricá, *Pinus elliottii*, *Pinus oocarpa*, Jatobá, *Lyptus* and Cupiúba) using several diameters (8 mm, 10 mm, 12 mm and 16 mm) for the metal dowels. Based on the analysis of the results, is proposed adopting the test method based on EN 383:2007. The experimental results for the embedment strength has better fit with the strength parameter currently used by ABNT NBR 7190:1997, compression parallel to the grain. In addition, this method recommends dimensions that facilitate the specimens preparation, mainly in the direction perpendicular to the grain.

Keywords: Bolts; Connections; Embedment strength; Metal dowels-type; Timber structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ligações por conectores metálicos. Fonte: Duarte (2004).	25
Figura 2: Parafusos comuns com porca.	26
Figura 3: Diagrama força de embutimento x deformação específica de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).	28
Figura 4: Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).	29
Figura 5: Corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento (a) na direção paralela e (b) na direção perpendicular em relação às fibras. Fonte: EN 383: 2007 (Adaptada).	30
Figura 6: Diagrama tensão de embutimento x deslocamento. Fonte: ASTM D5764: 2007 (Adaptada).	31
Figura 7: Diagrama tensão x deslocamento. Fonte: ASTM D5764: 2007.	32
Figura 8: Corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento segundo a norma americana. Fonte: ASTM D5764: 2007 (Adaptada).	33
Figura 9: Detalhe do LVDT utilizado para determinação do deslocamento entre o pino metálico e corpo de prova.	40
Figura 10: Determinação de $F_{e0} = 10,8$ kN; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.	43
Figura 11: Determinação de $F_{e0} = 14,6$ kN; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.	44
Figura 12: Determinação de $F_{e0} = 4,4$ kN; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.	44
Figura 13: Determinação do $F_{e90} = 17,4$ kN; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.	45
Figura 14: Determinação de $F_{e90} = 4,2$ kN; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.	45
Figura 15: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Paricá.	56
Figura 16: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Pinus elliottii.	57
Figura 17: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Pinus oocarpa.	57
Figura 18: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Jatobá.	58
Figura 19: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Lyptus.	58
Figura 20: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Cupiúba.	59
Figura 21: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} - Paricá.	61
Figura 22: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} - Pinus elliottii.	62

Figura 23: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Pinus oocarpa.....	62
Figura 24: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Jatobá.	63
Figura 25: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Lyptus.	63
Figura 26: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Cupiúba.....	64
Figura 27: Corpo de prova proposto para o ensaio de resistência ao embutimento paralelo às fibras.	65
Figura 28: Corpo de prova proposto para o ensaio de resistência ao embutimento normal às fibras.	66
Figura 29: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; d = 8 mm.	71
Figura 30: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; d = 10 mm.	71
Figura 31: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; d = 12 mm.	72
Figura 32: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; d = 16 mm.	72
Figura 33: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; d = 8 mm.	73
Figura 34: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; d = 10 mm.	73
Figura 35: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; d = 12 mm.	74
Figura 36: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; d = 16 mm.	74
Figura 37: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; d = 8 mm.	75
Figura 38: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; d = 10 mm.	75
Figura 39: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; d = 12 mm.	76
Figura 40: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; d = 16 mm.	76
Figura 41: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; d = 8 mm.....	77
Figura 42: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; d = 10 mm.....	77
Figura 43: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; d = 12 mm.....	78
Figura 44: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; d = 16 mm.....	78
Figura 45: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; d = 8 mm.....	79
Figura 46: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; d = 10 mm.....	79
Figura 47: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; d = 12 mm.....	80
Figura 48: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; d = 16 mm.....	80
Figura 49: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; d = 8 mm.	81
Figura 50: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; d = 10 mm.	81
Figura 51: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; d = 12 mm.	82
Figura 52: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; d = 16 mm.	82

Figura 53: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 8$ mm.....	83
Figura 54: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 8$ mm.	83
Figura 55: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 10$ mm.....	84
Figura 56: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 10$ mm.	84
Figura 57: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 12$ mm.....	85
Figura 58: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 12$ mm.	85
Figura 59: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 16$ mm.....	86
Figura 60: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 16$ mm.	86
Figura 61: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.	87
Figura 62: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.	87
Figura 63: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.	88
Figura 64: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.	88
Figura 65: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.	89
Figura 66: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.	89
Figura 67: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 16$ mm.	90
Figura 68: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 16$ mm.	90
Figura 69: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.	91
Figura 70: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.....	91
Figura 71: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.	92
Figura 72: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.....	92
Figura 73: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.	93
Figura 74: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.....	93
Figura 75: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 16$ mm.	94
Figura 76: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 16$ mm.....	94
Figura 77: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.....	95
Figura 78: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.	95
Figura 79: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.....	96
Figura 80: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.	96
Figura 81: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.....	97
Figura 82: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.	97
Figura 83: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.....	98
Figura 84: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.	98

Figura 85: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 8 mm.....	99
Figura 86: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 8 mm.	99
Figura 87: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 10 mm.....	100
Figura 88: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 10 mm.	100
Figura 89: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 12 mm.....	101
Figura 90: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 12 mm.	101
Figura 91: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 16 mm.....	102
Figura 92: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; d = 16 mm.	102
Figura 93: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 8 mm.	103
Figura 94: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 8 mm.	103
Figura 95: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 10 mm.	104
Figura 96: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 10 mm.	104
Figura 97: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 12 mm.	105
Figura 98: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 12 mm.	105
Figura 99: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 16 mm.	106
Figura 100: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; d = 16 mm.	106
Figura 101: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 8 mm.	107
Figura 102: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 8 mm.....	107
Figura 103: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 10 mm.	108
Figura 104: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 10 mm.....	108
Figura 105: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 12 mm.	109
Figura 106: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 12 mm.....	109
Figura 107: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 16 mm.	110
Figura 108: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; d = 16 mm.....	110
Figura 109: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 8 mm.....	111
Figura 110: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 8 mm.	111
Figura 111: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 10 mm.....	112
Figura 112: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 10 mm.	112
Figura 113: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 12 mm.....	113
Figura 114: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 12 mm.	113
Figura 115: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 16 mm.....	114
Figura 116: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; d = 16 mm.	114

Figura 117: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 8 mm.	115
Figura 118: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 8 mm.	115
Figura 119: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 10 mm.	116
Figura 120: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 10 mm.	116
Figura 121: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 12 mm.	117
Figura 122: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 12 mm.	117
Figura 123: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 16 mm.	118
Figura 124: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 16 mm.	118
Figura 125: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 8 mm.....	119
Figura 126: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 8 mm.....	119
Figura 127: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 10 mm.....	120
Figura 128: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 10 mm.....	120
Figura 129: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 12 mm.....	121
Figura 130: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 12 mm.....	121
Figura 131: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 16 mm.....	122
Figura 132: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; d = 16 mm.....	122
Figura 133: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 8 mm.....	123
Figura 134: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 8 mm.....	123
Figura 135: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 10 mm.....	124
Figura 136: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 10 mm.....	124
Figura 137: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 12 mm.....	125
Figura 138: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 12 mm.....	125
Figura 139: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 16 mm.....	126
Figura 140: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; d = 16 mm.....	126
Figura 141: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 8 mm.....	127
Figura 142: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 8 mm.	127
Figura 143: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 10 mm.	128
Figura 144: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 10 mm.	128
Figura 145: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 12 mm.	129
Figura 146: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 12 mm.	129
Figura 147: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 16 mm.	130
Figura 148: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; d = 16 mm.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de α_e para diferentes diâmetros de pinos (d).	34
Tabela 2: Espécies de madeira utilizadas na pesquisa.	39
Tabela 3: Parâmetros utilizados para cálculo de f_{e0} e f_{e90} para cada uma das normas.	41
Tabela 4: Força de embutimento na direção paralela às fibras (F_{e0}), em kN.	46
Tabela 5: Força de embutimento na direção normal às fibras (F_{e90}), em kN.	47
Tabela 6: Espessura dos corpos de prova (t) e dos diâmetros dos pinos (d) para ensaios de embutimento paralelo às fibras, em mm.	48
Tabela 7: Espessura dos corpos de prova (t) e dos diâmetros dos pinos (d) para ensaios de embutimento normal às fibras, em mm.	49
Tabela 8: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa.	50
Tabela 9: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras (f_{e90}), em MPa.	51
Tabela 10: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Paricá.	52
Tabela 11: Propriedades mecânicas e densidade aparente - <i>Pinus elliottii</i>	52
Tabela 12: Propriedades mecânicas e densidade aparente - <i>Pinus oocarpa</i>	53
Tabela 13: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Jatobá.	53
Tabela 14: Propriedades mecânicas e densidade aparente - <i>Lyptus</i>	54
Tabela 15: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Cupiúba.	54
Tabela 16: Resistência ao embutimento calculada - ABNT NBR 7190:1997.	55
Tabela 17: Resistência ao embutimento calculada - EUROCODE 5:2004.	55
Tabela 18: Resistência ao embutimento calculada - NDS:2001.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI – American National Standard for Wood Products

AFPA – American Forest and Paper Association

ASTM – American Society for Testing and Materials

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EN – Norma Europeia

EUROCODE – Comissão Europeia de Normas Técnicas

LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

LRFD – Load and Resistance Factor Design

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

NDS – American National Design and Specification for Wood Construction

NBR – Norma Brasileira Registrada

SET – Departamento de Engenharia de Estruturas

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

- α – ângulo de incidência de carga em relação às fibras da madeira
- α_e – coeficiente em função do diâmetro do pino metálico
- CV – coeficiente de variação
- CP – corpo de prova
- d – diâmetro do pino metálico
- ε – deformação específica
- E_{c0} – módulo de elasticidade da madeira em esforços de compressão na direção paralela às fibras
- f_{c0} – resistência da madeira à compressão na direção paralela às fibras
- f_{c90} – resistência da madeira à compressão na direção normal às fibras
- f_e – resistência da madeira ao embutimento
- f_{e0} – resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras
- f_{e90} – resistência da madeira ao embutimento na direção normal às fibras
- $f_{e\alpha}$ – resistência característica da madeira ao embutimento para forças em qualquer direção das fibras
- $f_{e,est}$ – resistência da madeira ao embutimento estimada
- F_e – força de embutimento do pino metálico no corpo de prova
- F_{5mm} – força de embutimento que provoca a deformação de 5 mm do corpo de prova
- $F_{e5\%}$ – força que causa a deformação residual igual a 5% em relação ao diâmetro do pino metálico
- $F_{e2\%}$ – força que provoca a deformação específica residual de 2%
- $F_{m\acute{a}x}$ – máxima força de embutimento resistida pelo corpo de prova
- $f_{h,\alpha,k}$ – resistência característica da madeira ao embutimento para forças em qualquer direção
- $f_{h,0,k}$ – resistência característica da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras
- $f_{h,90,k}$ – resistência característica da madeira ao embutimento na direção normal às fibras
- f_{v0} – resistência da madeira ao cisalhamento na direção paralela às fibras
- kg – quilograma
- k_{90} – fator que leva em consideração a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico
- MPa – mega pascal.

m – metro

m³ – metro cúbico

mm – milímetro

ρ_{ap} – densidade aparente da madeira

ρ_k – densidade aparente característica da madeira

ρ – densidade da madeira

t – espessura do corpo de prova

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Objetivo do Trabalho Proposto.....	24
1.2. Justificativas do Trabalho Proposto.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Métodos de Ensaio Normalizados para Determinação da Resistência da Madeira ao Embutimento.....	27
2.1.1. ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira.....	27
2.1.2. EN 383:2007 –Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners.....	29
2.1.3. ASTM D5764:2007 –Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products.....	31
2.2. Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada.....	33
2.2.1. ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira.....	33
2.2.2. EUROCODE 5:2004 – Design of Timber Structures –Part 1-1: General – Common Rules and Rules for buildings.....	34
2.2.3. NDS:2001 – American National Design and Specification for Wood Construction.....	35
2.2.4. LRFD:1996 – Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC).....	35
2.3. Trabalhos Técnico-Científicos a Respeito da Resistência da Madeira ao Embutimento.....	36
2.4. Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1. Materiais.....	39
3.2. Métodos.....	39
3.2.1. Ensaio de Embutimento.....	39
3.2.2. Propriedades Mecânicas e Densidade Aparente das Madeiras.....	41
3.2.3. Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada.....	41
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	43
4.1. Ensaio de Embutimento.....	43
4.1.1. Obtenção da Força Resistente ao Embutimento.....	43

4.1.2.	Resistência da Madeira ao Embutimento	50
4.2.	Propriedades Mecânicas e Densidade Aparente das Madeiras	51
4.3.	Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada.....	55
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
5.1.	Resistência ao Embutimento Paralelo às Fibras	56
5.2.	Resistência ao Embutimento Normal às Fibras	61
6.	PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO DE EMBUTIMENTO	65
6.1.	Dimensões dos Corpos de Prova.....	65
6.2.	Critério de Resistência ao Embutimento.....	66
6.3.	Aplicação da Força	66
7.	CONCLUSÕES	67
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A ABNT NBR 7190:1997		71
APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A EN 383:2007.....		83
APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A ASTM D5764:2007.....		107

1. INTRODUÇÃO

A utilização da madeira como elemento estrutural requer conhecimento prévio de suas propriedades, principalmente, as físicas e as mecânicas, pois são essas que interferem diretamente no dimensionamento de estruturas de madeira.

Para a construção de estruturas de madeira é necessário realizar ligações entre os diversos elementos estruturais. Essas ligações podem ocorrer em estruturas treliçadas ou então em grandes estruturas, sendo que, em ambas, existe a necessidade do dimensionamento dessas ligações que forneçam compatibilidade com as solicitações mecânicas impostas, sempre levando em consideração a segurança.

Dentre os tipos de ligações utilizadas, podemos citar as ligações com pinos metálicos, ligações coladas, ligações com cavilhas de madeira, ligações com anéis metálicos, ligações com barras rosqueadas ou, então, uma composição entre os diversos tipos de ligações.

Os pinos metálicos, que são exemplificados pelos pregos e parafusos, são os conectores mais utilizados na construção civil em madeiras, pois podem ser empregados em várias configurações de ligações, além da facilidade de utilização e do baixo custo para sua aquisição.

Na ligação com pinos metálicos dois mecanismos envolvem o seu dimensionamento: o embutimento do pino na madeira e a flexão do pino. A resistência da madeira ao embutimento pode ser definida como um estado múltiplo de tensões que ocorre na interface entre o pino metálico e o furo da peça de madeira.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fornece no seu documento normativo ABNT NBR 7190:1997 – “Projeto de Estruturas de Madeira” o método para determinação da resistência da madeira ao embutimento com pino metálico, sendo este diferente dos encontrados em outros documentos normativos importantes, pois, são utilizadas em países com tradição na construção com madeiras.

Neste trabalho será realizado um estudo experimental utilizando os documentos normativos ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007, ASTM D5764:2007, EUROCODE 5:2004, NDS:2001 e LRFD:1996 com o objetivo de estabelecer uma proposta para determinação da resistência da madeira ao embutimento que possa ser incorporada à norma ABNT NBR 7190 em futuras revisões.

1.1. Objetivo do Trabalho Proposto

O objetivo geral deste trabalho é comparar os métodos de ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento dos documentos normativos ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007, ASTM D5764:2007, EUROCODE 5:2004, NDS:2001 e LRDF:1996, com a finalidade de estabelecer uma proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento.

1.2. Justificativas do Trabalho Proposto

Os critérios de dimensionamento de ligações com pinos metálicos da norma ABNT NBR 7190:1997, principalmente nos casos em que o embutimento é crítico, têm conduzido a um aumento do número de conectores, em relação ao critério da norma vigente antes de 1997. Uma das razões desse aumento é a resistência ao embutimento definida na norma ABNT NBR 7190:1997, a partir da resistência à compressão ou então determinada experimentalmente permitindo-se pequenas deformações.

Observam-se diferenças entre as formas de determinação da resistência ao embutimento da atual norma brasileira e as normas de outros países com tradição na construção com madeira. Assim, inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de verificar os procedimentos experimentais para a determinação da resistência ao embutimento nos principais documentos normativos de outros países, com posterior realização de experimentação à luz desses documentos, com a finalidade de estabelecer a resistência ao embutimento de forma mais realista.

Nesse contexto, a finalidade de realizar este trabalho é estabelecer uma proposta de um método de ensaio para a determinação da resistência ao embutimento, com a possibilidade de ser incorporada em futuras revisões da norma ABNT NBR 7190.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ligações entre elementos estruturais de madeira devem ser consideradas pontos vitais para o dimensionamento de uma estrutura de madeira, sendo nelas as maiores preocupações em relação à segurança. A ocorrência de falha em uma ligação pode colocar em risco toda a edificação e, também, a segurança das pessoas que utilizam a mesma.

A realização do dimensionamento de uma ligação também está relacionada à escassez de peças estruturais com grandes dimensões, para utilização em grandes estruturas, necessitando utilizar peças menores ligadas que suportem às ações impostas nela. As ligações também podem ser realizadas em peças pequenas, por exemplo, para construção de uma treliça (OLIVEIRA, 2001; CORREIA, 2002; ALMEIDA, 2011).

Duarte (2004) disserta a respeito de três tipos básicos de ligações entre peças de madeira: ligações por conectores metálicos, ligações por contato e ligações coladas. Numa estrutura, pode-se encontrar apenas um tipo de ligação ou então uma combinação entre elas.

A ligação por conectores metálicos é aquela que o elemento de ligação penetra as peças de madeira (Figura 1). Dentre os conectores metálicos utilizados nas ligações em estruturas de madeira podemos citar: pregos e parafusos (ALMEIDA, 1987; ALMEIDA, 1990; OLIVEIRA, 2001; CORREIA, 2002; ALMEIDA, 2011), chapas de dentes estampados (BARALDI, 1996), anéis metálicos (DUARTE, 2004; BRITO, 2010), além da utilização em conjunto de diferentes modelos de conectores respeitando as solicitações impostas na estrutura.



Figura 1: Ligações por conectores metálicos. Fonte: Duarte (2004).

Os pregos e parafusos são pinos metálicos mais utilizados na construção de estruturas de madeira devido à diversidade de modelos existentes no mercado, facilidade de utilização, baixo custo para aquisição, utilização em diversas geometrias de ligações e, também, por não obterem mudanças de propriedades mecânicas nas diversas condições ambientais onde podem ser empregados (CALIL JUNIOR, et al., 2003; DUARTE, 2004).

No dimensionamento de ligações por pinos metálicos entre elementos estruturais de madeira são considerados basicamente dois modos de ruptura: flexão do pino metálico ou embutimento do pino metálico na madeira.

Então, para realização do dimensionamento das ligações em estruturas de madeira é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira, como, por exemplos, a resistência ao embutimento e à compressão, ambas nas direções paralela e normal em relação às fibras da madeira, como também, a resistência ao escoamento do aço do pino metálico.

Os parafusos geralmente são classificados de duas maneiras: comuns e auto-atarraxantes. Os parafusos comuns são aqueles que ultrapassam todas as peças estruturais de madeira no momento da ligação possuindo em uma de suas extremidades uma cabeça e na outra uma rosca onde serão utilizadas porcas e arroelas para sua fixação e atrito entre as peças de madeira, favorecendo a ligação (Figura 2).



Figura 2: Parafusos comuns com porca.

Nos itens seguintes são apresentados detalhes de métodos de ensaios das normas brasileira, europeia e americana, enfatizando a forma de determinação da resistência da madeira ao embutimento, e trabalhos técnico-científicos que enfocam o tema embutimento.

2.1. Métodos de Ensaios Normalizados para Determinação da Resistência da Madeira ao Embutimento

A seguir serão apresentados os critérios para a determinação da resistência da madeira ao embutimento por meio de ensaios mecânicos obtidos em documentos normativos e por meio de parâmetros para estimativa dessa propriedade.

2.1.1. ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define em seu documento normativo ABNT NBR 7190:1997 a resistência da madeira ao embutimento (f_e) como a razão entre a força aplicada que causa a deformação específica residual 2‰ ($F_{e2‰}$) e a área de embutimento do pino (produto entre o diâmetro do pino metálico (d) e a espessura da peça de madeira (t)) de acordo com a Equação 1.

$$f_e = \frac{F_{e2‰}}{t \cdot d} \quad (1)$$

Observa-se que essa deformação específica residual, também pode ser considerada como um deslocamento relativo residual igual a 2,8% do diâmetro do pino.

Para realização dos ensaios deve ser estimada a resistência ($f_{e,est}$) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada da mesma amostra a ser selecionada. Conhecida a resistência da madeira ao embutimento estimada, o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga até 50% da carga de ruptura estimada, de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

O gráfico da Figura 3 ilustra a forma de obtenção da resistência da madeira ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento (F_e) x deformação específica (ϵ). Este gráfico é gerado a partir do terceiro ciclo de carregamento até a ruptura do corpo de prova.

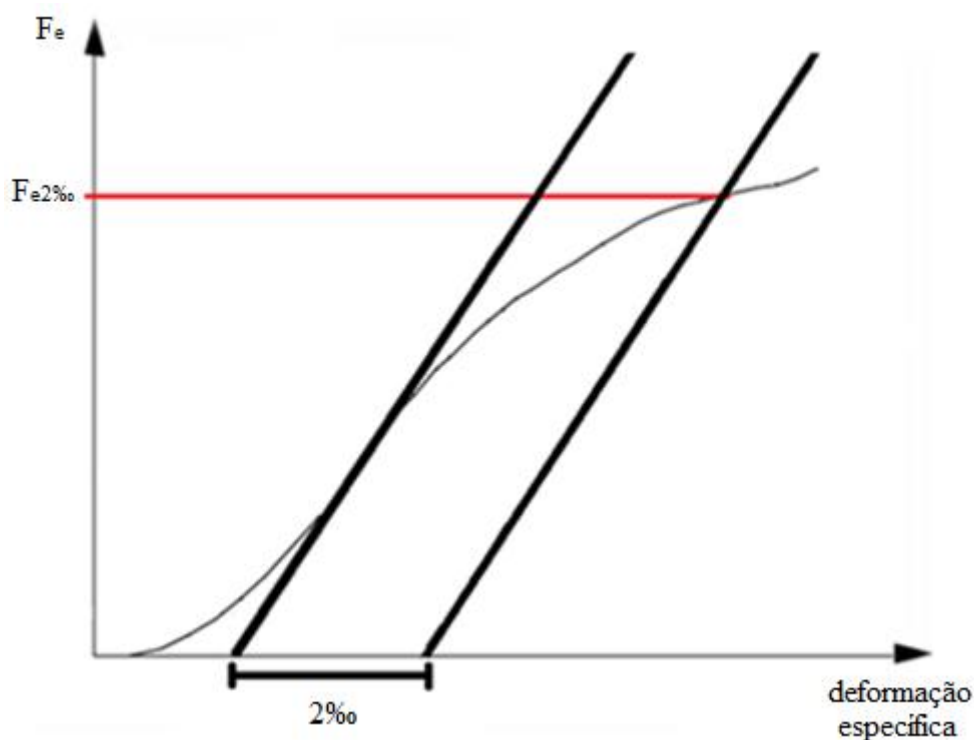


Figura 3: Diagrama força de embutimento x deformação específica de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).

A deformação específica utilizada pela norma brasileira é a razão entre o deslocamento do pino metálico e a base de referência que é igual a 14 d. Este procedimento é único, não sendo encontrado algo semelhante nos outros documentos normativos consultados. Nas normas de países com grande tradição no uso da madeira na construção, usualmente é adotado o deslocamento entre o pino metálico e a madeira, para a determinação dos parâmetros de resistência.

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o corpo de prova (CP) para ensaios na direção paralela às fibras deve possuir forma prismática, de seção retangular com 8 d de largura e 2 d de espessura correspondentes, com comprimento ao longo das fibras de 18 d. Para a resistência ao embutimento na direção normal às fibras da madeira, o corpo de prova deve possuir as mesmas dimensões anteriores, tomando-se o eixo maior na direção normal em relação às fibras da madeira (Figura 4).

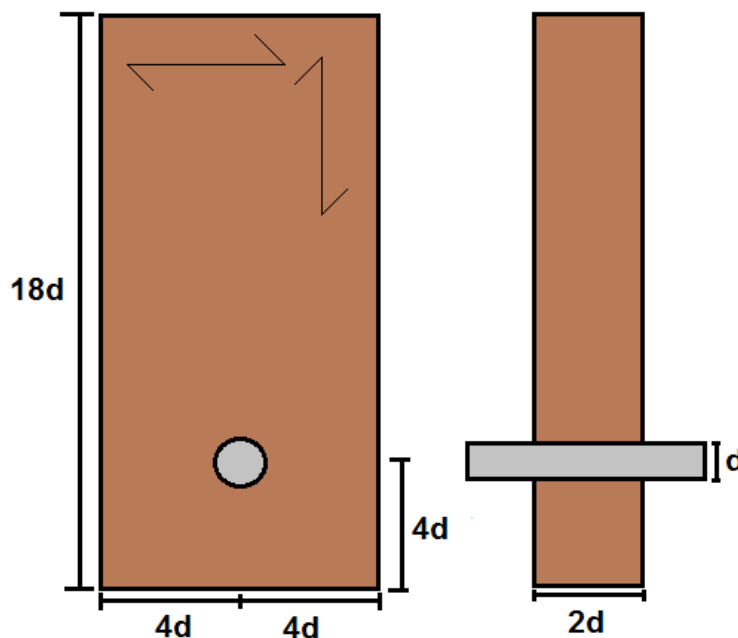


Figura 4: Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).

É importante salientar que essa geometria dificulta a confecção do corpo de prova no caso do embutimento na direção normal às fibras, em virtude da necessidade de se obter peças com largura igual a 18 d.

2.1.2. EN 383:2007 –Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners

O EN 383: 2007 é o documento normativo proposto pelo EUROCODE 5:2004 – “Design of Timber Structures – Parte 1: General – Common rules and rules for building” – para determinação da resistência da madeira ao embutimento. De acordo com esse documento, a resistência da madeira ao embutimento (f_e) é igual ao valor da máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e o corpo de prova (F_{5mm}), dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso (d) e a espessura da peça (t), conforme mostrado nas Equação 2.

$$f_e = \frac{F_{m\acute{a}x} \text{ ou } F_{5mm}}{t \cdot d} \quad (2)$$

A configuração dos corpos de prova para realização dos ensaios de embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras, segundo a EN 383: 2007, podem ser observadas na Figura 5.

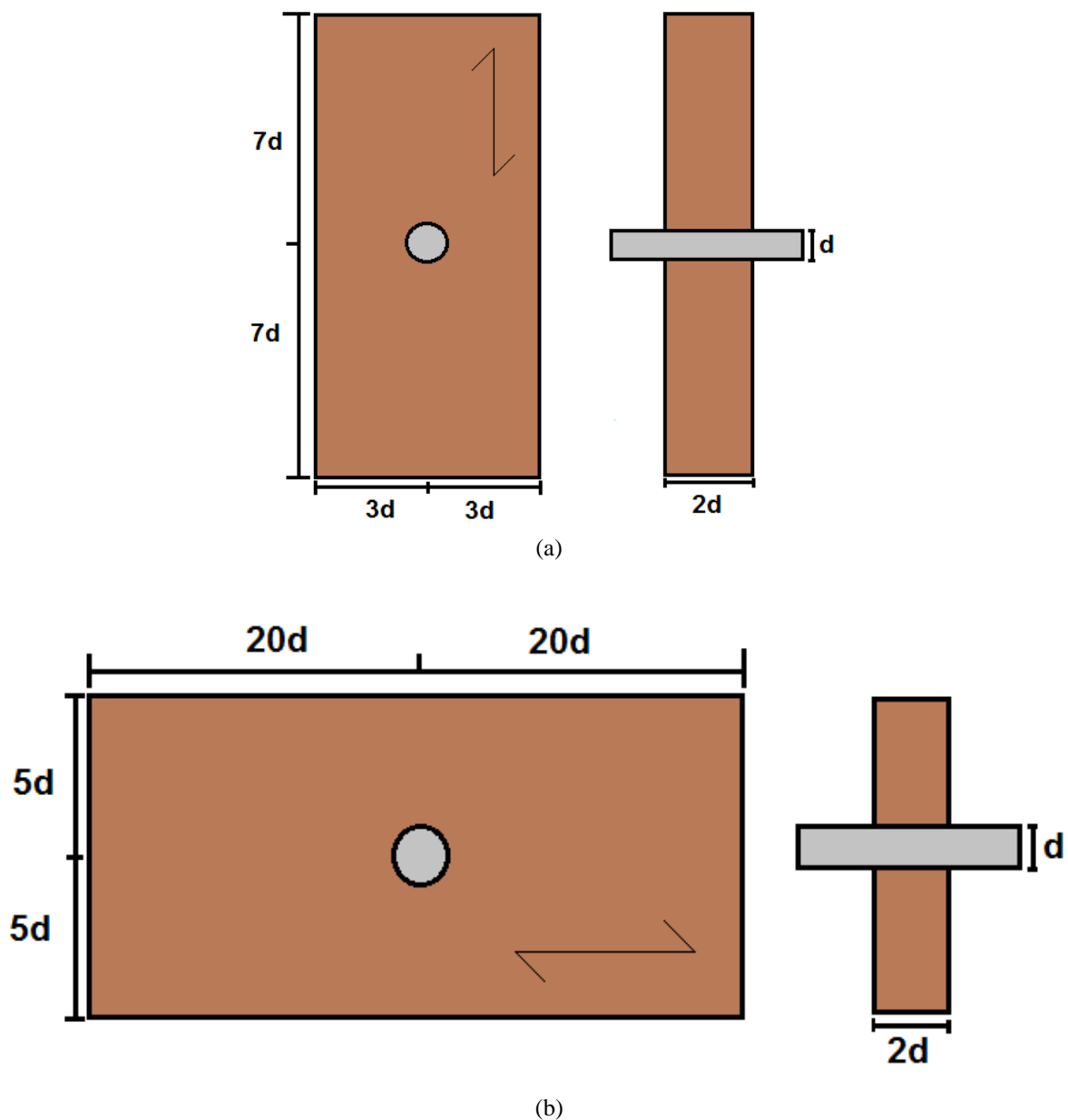


Figura 5: Corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento (a) na direção paralela e (b) na direção perpendicular em relação às fibras. Fonte: EN 383: 2007 (Adaptada).

Para realização dos ensaios deve ser estimada a resistência ($f_{e,est}$) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada da mesma amostra a ser estudada. Estimada a resistência da madeira ao embutimento deve ser aplicado um ciclo

de carregamento, até 40% desse valor, mantendo-o por 30 segundos, seguido de um descarregamento até o valor de 10%, mantendo-o por 30 segundos. Em seguida, deve ser aplicado um carregamento até ocorrer a ruptura do corpo de prova ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira.

O gráfico da Figura 6 ilustra a forma de obtenção da resistência da madeira ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento x deformação. Este gráfico é gerado a partir do segundo ciclo de carregamento até a ruptura do corpo de prova.

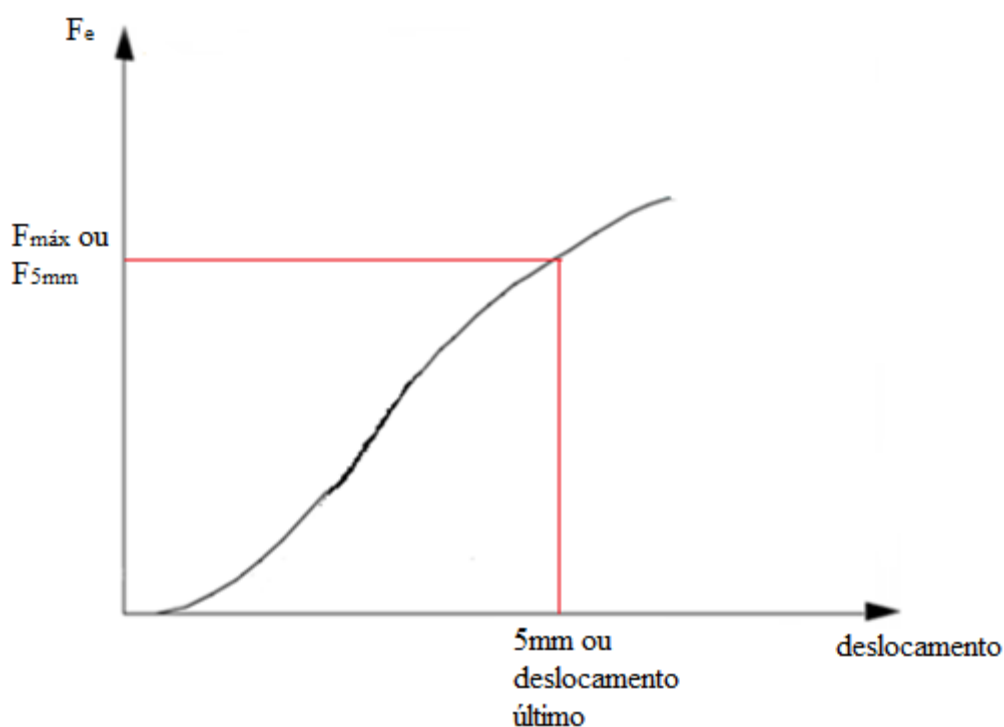


Figura 6: Diagrama tensão de embutimento x deslocamento. Fonte: ASTM D5764: 2007 (Adaptada).

2.1.3. ASTM D5764:2007 –Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products

De acordo com o documento normativo ASTM D5764:2007, a resistência da madeira ao embutimento é determinada a partir do quociente entre a força que causa o deslocamento residual igual a 5% em relação ao diâmetro do pino metálico ($F_{e5\%}$), e a área resistente ao embutimento dada pelo produto entre o diâmetro do pino (d) e a espessura da peça de madeira (t) (Equação 3).

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t \cdot d} \quad (3)$$

O procedimento experimental recomendado pela ASTM D5764: 2007 não prevê a estimativa de uma força de ruptura do corpo de prova e a realização de ciclos de carregamento. O gráfico da Figura 7 ilustra a forma de obtenção da resistência ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento x deformação, utilizando o critério da ASTM D5764: 2007.

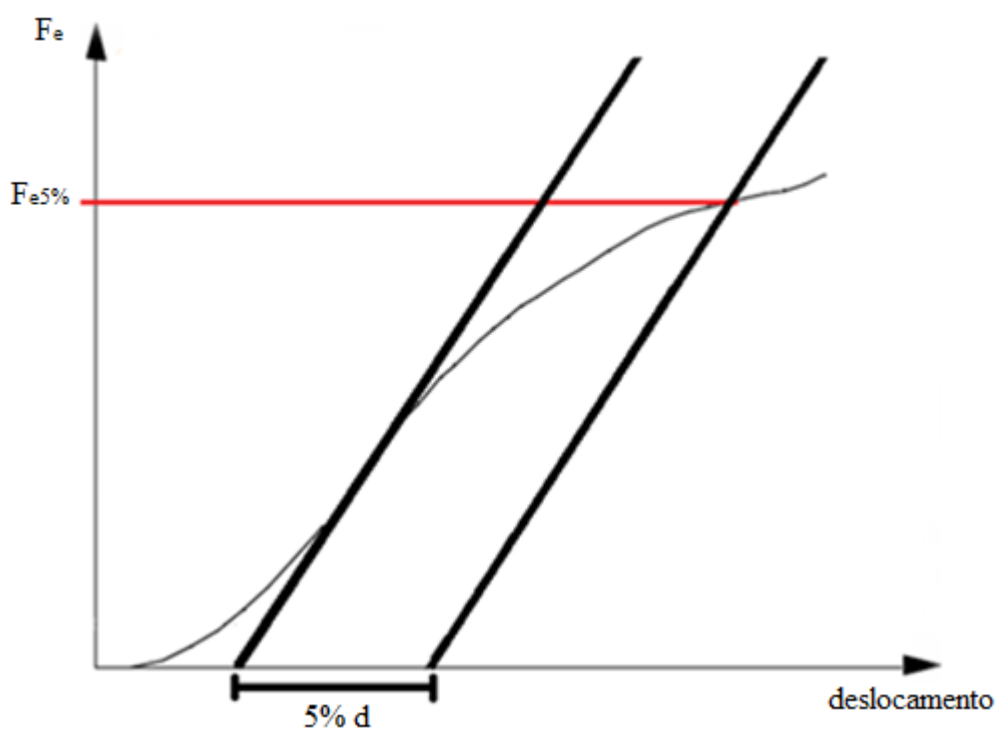


Figura 7: Diagrama tensão x deslocamento. Fonte: ASTM D5764: 2007.

Os corpos de prova para realização dos ensaios devem possuir o formato de um paralelepípedo retangular com um furo em sua face, com as dimensões que seguem na Figura 8, para a força aplicada nas direções paralela ou normal em relação às fibras da madeira.

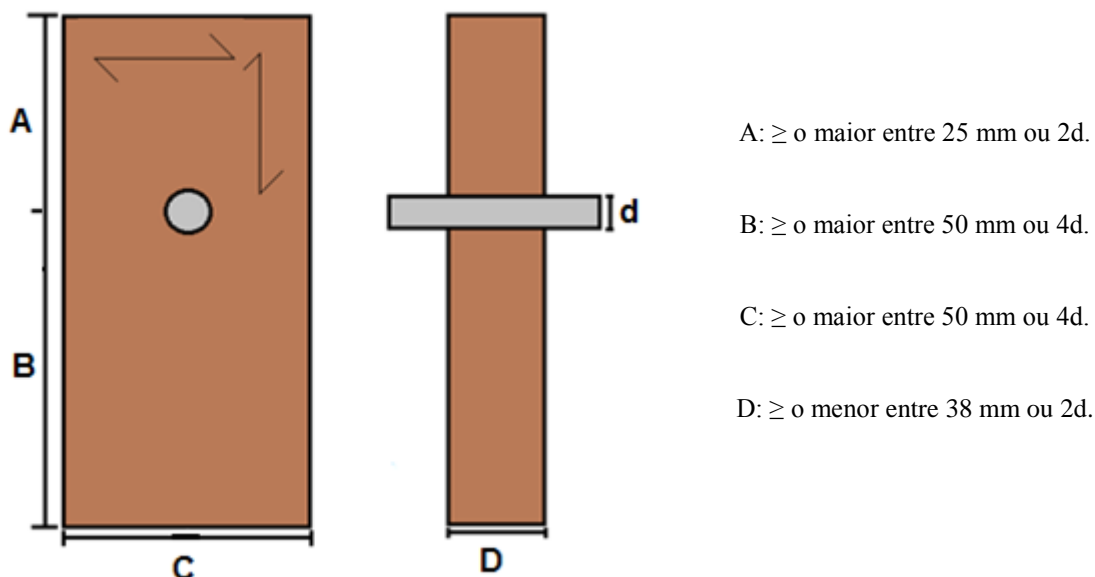


Figura 8: Corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento segundo a norma americana. Fonte:ASTM D5764: 2007 (Adaptada).

2.2. Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada

A seguir serão apresentados os equacionamentos utilizados para a determinação da resistência da madeira ao embutimento a partir de outros parâmetros, que podem ser utilizados no caso de ausência de ensaios experimentais específicos.

2.2.1. ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, a partir da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), podem ser obtidas as resistências ao embutimento na direção paralela (f_{e0}) e na direção normal (f_{e90}), conforme mostrado nas Equações 4 e 5, respectivamente. Nesse último caso, também é utilizado o parâmetro α_e dado pela Tabela 1 em função do diâmetro do pino metálico.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (4)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (5)$$

Tabela 1: Valores de α_e para diferentes diâmetros de pinos (d).

d (cm)	≤ 0,62	0,95	1,25	1,60	1,90	2,20	2,50	3,10	3,80	4,40	5,00	≥ 7,50
α_e	2,50	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,10	1,07	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, a resistência da madeira ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha}$), inclinada de um ângulo α em relação às fibras, pode ser calculada pela equação de Hankinson (Equação 6), com base nas resistências ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras.

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{e90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (6)$$

2.2.2. EUROCODE 5:2004 – Design of Timber Structures –Part 1-1: General – Common Rules and Rules for buildings

A resistência característica ao embutimento, segundo o EUROCODE 5:2004, para ligações com parafusos que possuam até 3 cm de diâmetro, com forças aplicadas formando um ângulo α com a direção das fibras ($f_{h,\alpha,k}$), pode ser determinada pela Equação 7.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

A resistência ao embutimento na direção paralela às fibras é calculada levando em consideração a densidade aparente característica (ρ_k) e o diâmetro do pino metálico (d) (Equação 8).

$$f_{h,0k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (8)$$

Os valores de k_{90} são calculados para madeiras menos densas e mais densas em função do diâmetro do pino metálico, utilizando as Equações 9 e 10, respectivamente. As

unidades utilizadas para o diâmetro do pino metálico e para a densidade aparente são, respectivamente, milímetro e megapascal.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (9)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (10)$$

2.2.3. NDS:2001 – American National Design and Specification for Wood Construction

O documento normativo NDS:2001 recomenda as Equações 10 e 11 para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento, nas direções paralela (f_{e0}) e normal (f_{e90}) em relação às fibras, respectivamente, levando em consideração a densidade aparente (ρ) e o diâmetro do pino metálico (d) como parâmetros. As unidades utilizadas para o diâmetro do pino metálico e para a densidade aparente são, respectivamente, milímetro e megapascal.

$$f_{e0} = 0,07725 \cdot \rho \quad (11)$$

$$f_{e90} = 212 \cdot (0,001 \cdot \rho)^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (12)$$

2.2.4. LRFD:1996 – Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC)

Em seu suplemento sobre ligações em estruturas de madeira, o documento normativo LRFD:1996 (American Forest & Paper Association e American Wood Council) apresenta valores de resistência ao embutimento para algumas espécies de madeira dos Estados Unidos. Os valores apresentados pela LRFD:1996 são calculados de acordo com os equacionamentos propostos pela norma NDS:2001.

2.3. Trabalhos Técnico-Científicos a Respeito da Resistência da Madeira ao Embutimento

O embutimento do pino metálico na madeira é caracterizado pelo deslocamento da ligação na direção de uma determinada força aplicada, e contribuições para o estudo deste fenômeno vem sendo realizadas para melhor entendimento das ligações em estruturas de madeira.

Um dos primeiros estudos realizados a respeito deste assunto foi conduzido por Johansen (1949). Segundo ele a resistência da ligação por pinos metálicos dependia particularmente da resistência da madeira ao embutimento, bem como da resistência do pino à flexão.

A resistência ao embutimento é influenciada pelas características geométricas do corpo de prova, ressaltando que este deve ter altura e largura suficiente para evitar o aparecimento de pequenas fissuras. Quanto à espessura, o valor deve ser, de modo que a deformação ao longo do comprimento do pino seja desprezível (SMITH, 1982).

Segundo Valle et al. (2000) a resistência de embutimento calculada pelo quociente entre a força de embutimento e a área resistente à esta solicitação não é uma propriedade somente do material, sendo este valor dependente de outros fatores, tais como: diâmetro do pino metálico, do tratamento superficial do aço, do ângulo entre a força e a direção das fibras e do métodos de introdução do pino na madeira, com ou sem pré-furação.

De acordo com Almeida (1987) a força que pode causar o embutimento do pino metálico na peça de madeira pode ocorrer de duas maneiras: no momento da cravação do pino no ato da construção da ligação ou, então, a partir de uma ação externa. Almeida (1987) define a resistência da madeira ao embutimento como decorrente do aparecimento de um estado múltiplo de tensão na parede do furo da peça de madeira, devido à pressão de contato aplicada pelo pino metálico à parede do furo, tendendo a embutir o pino na madeira.

Almeida (1990) afirma, a partir da análise dos modos de ruptura dos corpos de prova, que a resistência da madeira ao embutimento está diretamente relacionada com a sua resistência à tração normal às fibras, tornando a espessura da peça de madeira um parâmetro muito importante na resistência ao embutimento.

Os procedimentos laboratoriais para determinação da resistência da madeira ao embutimento são diferentes de acordo com cada documento normativo. Valle (1999), Stamato (2002) e Almeida (2011) utilizando as diretrizes das normas ABNT NBR 7190:1997 e EN 383: 2007 encontraram valores médios de resistência ao embutimento maiores utilizando o método europeu quando comparado com o método descrito na norma brasileira, em várias direções em relação às fibras. Isso acontece porque a norma brasileira considera um procedimento gráfico com deformação específica residual 2% enquanto a norma europeia simplesmente estabelece um deslocamento igual a 5 mm, caso a ruptura do corpo de prova não ocorra antes.

Oliveira (2001) determinou o valor médio de resistência à compressão superior ao valor médio de resistência ao embutimento, para todas as espécies de madeira e pinos metálicos utilizados, além disso, ele também concluiu que, pelo fato da ABNT NBR 7190:1997 igualar os valores das duas resistências, acarreta numa diminuição da resistência do pino metálico, o que influencia no número de conectores utilizados na ligação. Stamato (2002), Almeida (2011), Nascimento et al. (2012) e Almeida et al. (2013) trabalhando com madeiras dos gêneros *Pinus*, *Eucalyptus* e *Schizolobium* também encontraram valores superiores para a resistência à compressão quando comparada com a resistência ao embutimento.

Valle (1999) determinou a resistência da madeira ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras e corpos de prova retirados de vigas de Madeira Laminada Colada (MLC) de Eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*) calculando por intermédio das equações recomendadas pelas normas ABNT NBR 7190:1997 e EUROCODE 5:2004 e experimentalmente de acordo com a ABNT NBR 7190:1997 e EN 383: 2007. De acordo com a autora, os valores calculados nas direções paralela e normal em relação às fibras foram superiores aos valores determinados experimentalmente, para ambas as normas. Para os ângulos iguais a 30°, 45° e 60° foi utilizada a fórmula de Hankinson que, segundo a autora, é um bom estimador do comportamento de resistência ao embutimento pelo critério experimental da ABNT NBR 7190:1997.

Santos et al. (2008) utilizaram madeira de Pinho Marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) para avaliar a resistência ao embutimento nas direções paralela e normal utilizando as recomendações para ensaios experimentais dos documentos normativos EN 383: 2007 e ASTM D5764: 2007. Na direção paralela às fibras, ambos os documentos normativos

forneceram valores de resistência da madeira ao embutimento muito próximos, porém, na direção normal, os resultados encontrados foram diferentes. Além disso, também calcularam as resistências ao embutimento a partir dos equacionamentos propostos pela norma europeia (EUROCODE 5:2004) e americana (NDS:2001), sendo os valores de resistência ao embutimento calculados inferiores aos encontrados experimentalmente.

2.4. Conclusões da Revisão Bibliográfica

A resistência ao embutimento é convencionada de diferentes formas pelas normas citadas no trabalho. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, a resistência da madeira ao embutimento determinada pela razão entre a força que causa a deformação específica residual de 2‰ e área resistente ao embutimento. A EN 383: 2007 recomenda que a resistência ao embutimento seja obtida a partir do valor mínimo entre a força que provoca o deslocamento de 5 mm entre o pino metálico e a peça de madeira e a força máxima resistida pela corpo de prova. A ASTM D5764: 2007 define a resistência ao embutimento de modo gráfico a partir da força que provoca uma deformação residual igual 5% do diâmetro do pino metálico.

A norma brasileira utiliza a deformação específica como parâmetro para determinação da resistência ao embutimento, diferentemente do que preconizam os documentos normativos europeu e americano que utilizam o deslocamento relativo entre o pino metálico e a madeira.

As características do corpo de prova padronizado pela norma ABNT NBR 7190:1997 para determinação da resistência da madeira ao embutimento na direção normal às fibras, com comprimento de 18 d nesta direção, dificulta a sua confecção, por necessitar obter peças com largura igual a 18 d.

Os documentos normativos EUROCODE 5:2004 e NDS:2001 levam em consideração a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento. Por sua vez, ABNT NBR 7190:1997 iguala a resistência ao embutimento na direção paralela com a resistência à compressão na mesma direção e, para o cálculo da resistência ao embutimento na direção normal às fibras, recomenda, além da utilização da resistência à compressão paralela às fibras, adotar um coeficiente relacionado ao diâmetro do pino metálico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são fornecidas as informações referentes aos materiais e métodos utilizados neste trabalho.

3.1. Materiais

Nesta pesquisa foram utilizadas madeiras de 6 espécies, exóticas e nativas, relacionadas na Tabela 2. A escolha destas espécies baseou-se no fato da finalidade de abrangência das diferentes classes de resistência definidas pela ABNT NBR 7190:1997. Para cada espécie, procurou-se utilizar peças homogêneas para diminuição da variabilidade das propriedades da madeira. Todos os corpos de prova foram confeccionados com as peças de madeira com teor de umidade da ordem de 12%.

Tabela 2: Espécies de madeira utilizadas na pesquisa.

Nome Popular	Nome Científico	Exótica/Nativa
Paricá	<i>Schizolobium amazonicum</i> Herb	Nativa
Pinus elliottii	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	Exótica
Pinus oocarpa	<i>Pinus oocarpa</i> <i>shiede</i>	Exótica
Jatobá	<i>Hymenaea</i> spp	Nativa
Lyptus	<i>Eucalyptus grandis</i> / <i>Eucalyptus urophylla</i>	Exótica
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	Nativa

Os pinos metálicos, com 120 mm de comprimento, e com diâmetros iguais a 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm, foram obtidos de barras de aço 6 metros de comprimento. Os pinos metálicos com diâmetros de 10 mm, 12 mm e 16 mm foram adotados nesta pesquisa, pois, são os mais utilizados na construção de estruturas de madeira e, além disso, com o objetivo de verificar as procedimentos de ensaios das normas com um pino mais flexível, também foi utilizado o pino metálico com 8 mm de diâmetro.

3.2. Métodos

3.2.1. Ensaio de Embutimento

Para os ensaios de embutimento na direção paralela às fibras, os corpos de prova foram confeccionados de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EN 383: 2007 e ASTM D5764: 2007.

No caso de embutimento na direção normal, foram feitos apenas os corpos de prova recomendados pelas normas EN 383: 2007 e ASTM D5764: 2007, em virtude da dificuldade de confeccionar o corpo de prova sugerido pela ABNT NBR 7190:1997, como comentado anteriormente.

Para a realização do estudo dos métodos de ensaio, foram realizados ensaios em três corpos de prova para cada uma das combinações madeira – direção das fibras – documento normativo – diâmetro do pino metálico. Nas situações em que era necessária a realização de mais de um ciclo de carregamento, foi confeccionado um corpo de prova adicional para estimar, preliminarmente, a resistência ao embutimento, caso das normas ABNT NBR 7190:1997 e EN 383: 2007. Ao todo foram confeccionados 360 corpos de prova, desconsiderando os utilizados apenas para a estimativa preliminar da resistência ao embutimento.

Os ensaios para a determinação da resistência da madeira ao embutimento foram realizados na máquina universal de ensaios informatizada DARTEC, com capacidade de 100 kN. O deslocamento entre o pino metálico e o corpo de prova foi determinado adaptando um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) acima do pino metálico (Figura 10).



Figura 9: Detalhe do LVDT utilizado para determinação do deslocamento entre o pino metálico e corpo de prova.

3.2.2. Propriedades Mecânicas e Densidade Aparente das Madeiras

As propriedades mecânicas determinadas foram a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), o módulo de elasticidade da madeira em esforços de compressão paralela às fibras (E_{c0}) e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).

Os ensaios para determinação das propriedades foram conduzidos de acordo com as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 “Determinação das Propriedades das Madeiras para Projeto de Estruturas”. Para cada espécie de madeira e tipo de ensaio, foram realizados 12 testes em corpos de prova isentos de defeitos retirados das peças de madeira de forma aleatória.

A densidade aparente (ρ_{ap}) das madeiras utilizadas nesta pesquisa foi realizada nos corpos de prova de compressão paralela às fibras, medindo suas dimensões com paquímetro para determinação do volume e utilizando uma balança eletrônica para determinação da massa.

3.2.3. Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada

A Tabela 3 apresenta os parâmetros para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira nas direções paralela e normal em relação às fibras de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e NDS:2001, de acordo com a Seção 2.2.

Tabela 3: Parâmetros utilizados para cálculo de f_{e0} e f_{e90} para cada uma das normas.

Norma	f_{e0}	f_{e90}
ABNT NBR 7190:1997	f_{c0}	$f_{c0}; \alpha_e$
EUROCODE 5:2004	$d; \rho_k$	$d; \rho_k; k_{90}$
NDS:2001	ρ	$d; \rho$

O parâmetro α_e utilizado para o cálculo da resistência ao embutimento na direção normal em relação às fibras, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, é determinado em função do diâmetro do pino metálico. Para valores de diâmetros intermediários aos valores tabelados, α_e é determinado por interpolação linear. Para os pinos metálicos utilizados nesta pesquisa com diâmetros de 8, 10, 12 e 16 mm, os respectivos valores de α_e foram encontrados: 2,20, 1,90, 1,72 e 1,52.

Para o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, foram utilizados os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras.

As equações utilizadas para o cálculo da resistência ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras de acordo com o EUROCODE 5:2004 utilizam a densidade aparente característica da madeira. Porém, neste trabalho serão utilizados os valores médios de densidade aparente, determinados de acordo com a Seção 3.2.2, tendo em vista a comparação com os resultados de ensaio. Para os cálculos à luz do documento normativo NDS:2011 também foram utilizados os valores médios de densidade aparente das madeiras utilizadas.

Para o cálculo do parâmetro k_{90} , utilizado pelo EUROCODE 5:2004 e que leva em consideração o diâmetro do pino metálico, foram consideradas como madeiras menos densas o Paricá, o *Pinus elliottii* e o *Pinus oocarpa*. As madeiras de Jatobá, *Lyptus* e Cupiúba foram consideradas como madeiras mais densas.

Foram utilizados os valores do diâmetro nominal dos pinos metálicos (8, 10, 12 e 16 mm) para os cálculos da resistência da madeira ao embutimento, tendo em vista que, estes equacionamentos são utilizados na ausência de ensaios experimentais específicos.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Esta seção apresenta os seguintes resultados obtidos: resistência da madeira ao embutimento por meio dos ensaios nos corpos de prova; resistência na compressão paralela às fibras e de densidade aparente; resistência da madeira ao embutimento calculada a partir da resistência na compressão paralela às fibras, da densidade aparente e do diâmetro do pino.

4.1. Ensaios de Embutimento

4.1.1. Obtenção da Força Resistente ao Embutimento

Como ilustração, as Figuras 10, 11 e 12 apresentam os gráficos obtidos para obtenção da força resistente ao embutimento do pino metálico na direção paralela às fibras (F_{e0}), de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007 e ASTM D5764:2007, respectivamente. É importante salientar que, no caso da Figura 11, referente à EN 383:2007, o valor da força de embutimento foi determinada pela força máxima aplicada pois não foi atingido o deslocamento de 5 mm.

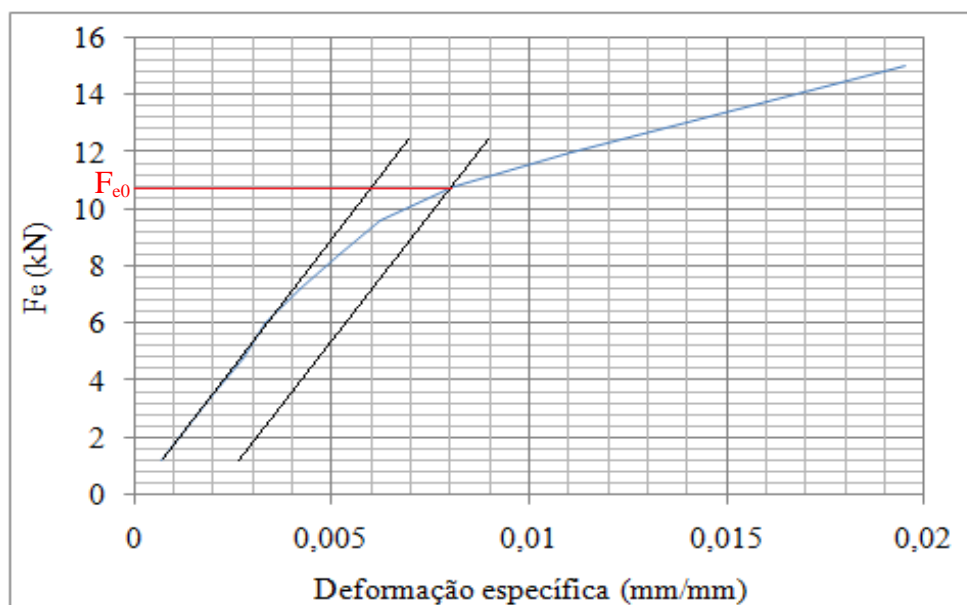


Figura 10: Determinação de $F_{e0} = 10,8$ kN; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa;
 $d = 8$ mm.

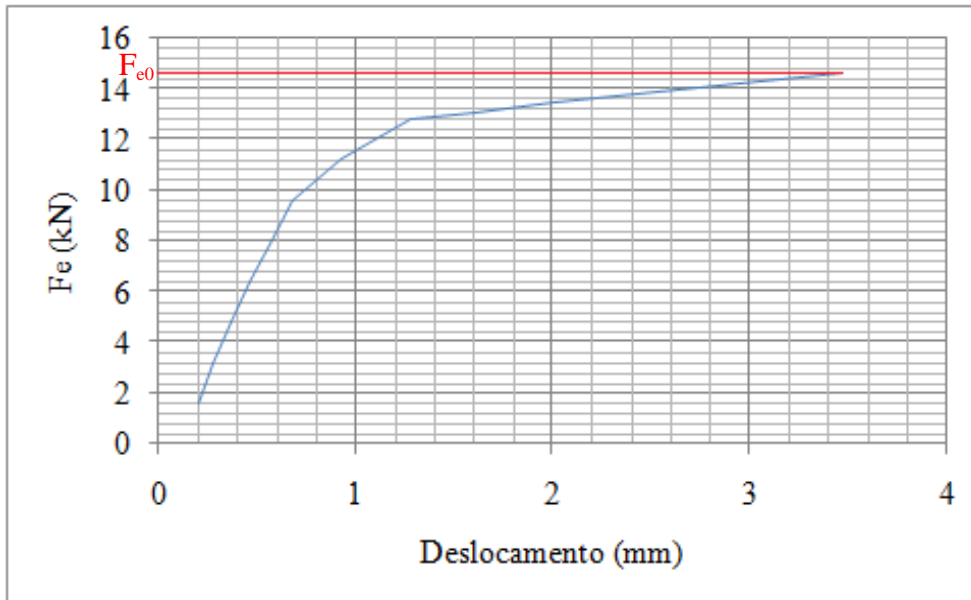


Figura 11: Determinação de $F_{e0} = 14,6$ kN; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.

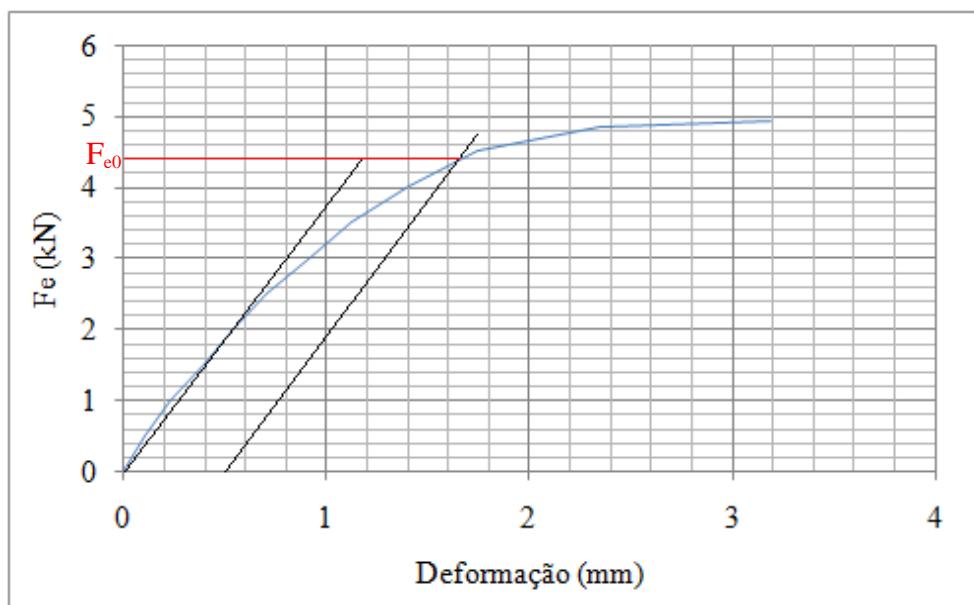


Figura 12: Determinação de $F_{e0} = 4,4$ kN; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

As Figuras 13 e 14 apresentam os gráficos obtidos para obtenção da força de embutimento do pino metálico na direção normal às fibras (F_{e90}), de acordo com as normas EN 383:2007 e ASTM D5764:2007, respectivamente. Salienta-se, como já foi feito para a direção paralela, que no caso da EN 383:2007, a força de embutimento foi igual à força máxima aplicada.

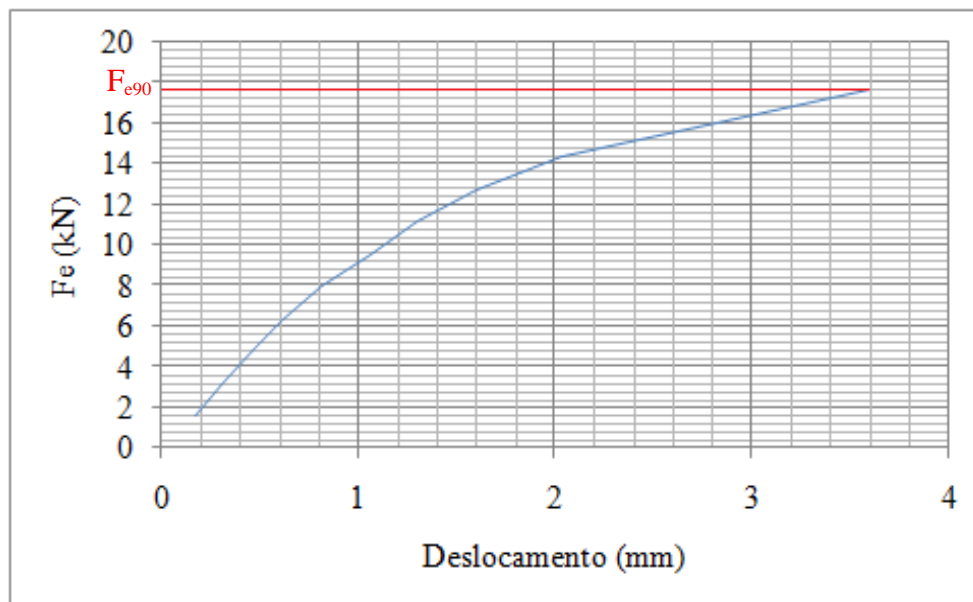


Figura 13: Determinação do $F_{e90} = 17,4$ kN; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.

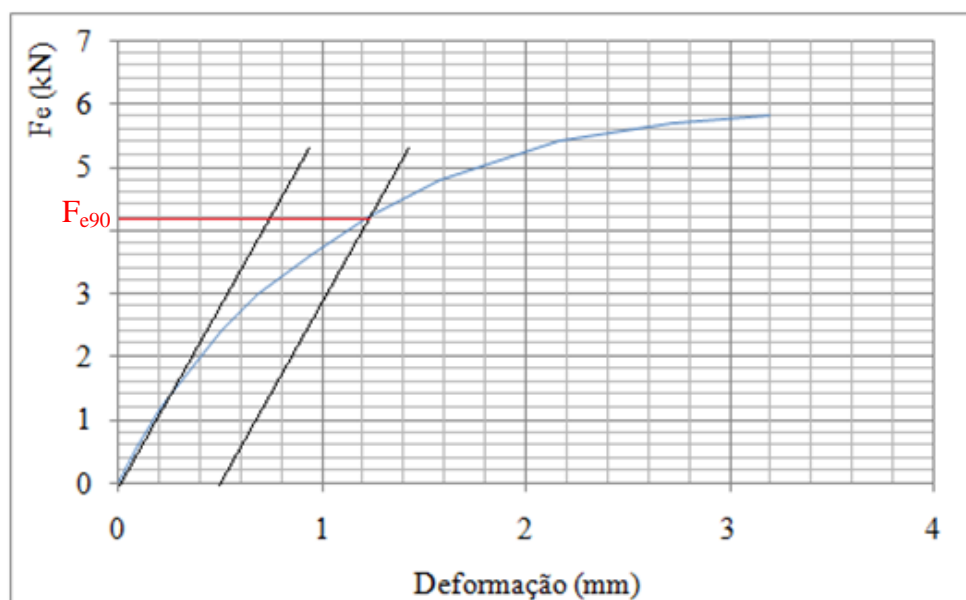


Figura 14: Determinação de $F_{e90} = 4,2$ kN; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

Os gráficos obtidos nos ensaios estão apresentados nos seguintes apêndices:

- APÊNDICE A - Gráficos dos ensaios de acordo com a ABNT NBR 7190:1997;
- APÊNDICE B - Gráficos dos ensaios de acordo com a EN 383:2007;
- APÊNDICE C - Gráficos dos ensaios de acordo com a ASTM D5764:2007.

As Tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, para as direções paralela e normal em relação às fibras, as forças resistentes ao embutimento (F_e) determinadas para cada corpo de prova de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007 e ASTM D5764:2007.

Tabela 4: Força de embutimento na direção paralela às fibras (F_{e0}), em kN.

Norma	ABNT NBR 7190:1997				EN 383:2007				ASTM D5764:2007			
	d (mm)	8	10	12	16	8	10	12	16	8	10	12
Paricá	1,10	2,95	5,80	7,60	2,45	4,61	8,45	12,83	1,68	4,20	8,00	13,20
	1,13	2,75	5,80	7,40	2,46	4,42	8,17	13,96	1,70	4,80	7,60	13,20
	1,18	2,90	5,20	7,60	2,60	4,75	7,93	13,24	1,78	4,20	8,00	14,00
Pinus elliottii	3,00	4,00	10,2	15,00	4,98	6,06	15,37	13,63	3,10	5,00	14,00	23,00
	3,00	4,80	10,2	16,00	4,17	6,31	15,28	13,34	3,20	5,60	13,60	23,50
	3,40	3,90	10,8	16,00	4,32	6,73	16,02	12,97	3,10	5,00	14,00	23,00
Pinus oocarpa	2,25	4,00	8,80	13,00	4,58	7,62	11,05	19,00	2,40	4,60	10,80	19,00
	2,10	2,80	8,00	13,50	4,34	7,44	11,87	21,65	2,50	4,60	11,20	20,00
	2,20	2,50	8,40	13,50	4,16	6,91	11,73	24,76	2,30	4,20	11,00	19,50
Jatobá	9,20	10,00	16,00	31,00	13,50	25,00	27,16	52,79	5,60	15,20	19,50	36,00
	9,20	11,20	14,80	31,00	12,95	20,14	31,15	51,13	5,40	14,00	21,00	41,50
	10,00	11,00	14,80	30,00	13,34	20,37	35,00	54,13	5,80	13,20	15,75	36,00
Lyptus	4,40	8,20	13,20	25,00	5,40	11,05	16,20	29,82	5,20	9,40	15,20	28,00
	4,38	8,20	13,60	25,00	5,27	11,20	16,77	29,21	5,60	9,30	15,60	27,50
	4,20	7,40	13,60	25,00	5,73	11,58	17,71	28,87	5,00	9,60	15,60	27,00
Cupiúba	3,30	4,80	11,20	19,00	4,47	11,05	16,20	25,89	4,00	9,20	11,20	20,00
	3,00	4,80	11,20	20,00	4,87	10,61	16,78	25,99	4,10	9,20	11,20	19,80
	2,90	5,40	11,60	18,00	5,40	10,80	14,59	25,42	4,05	8,80	11,20	20,00

Tabela 5: Força de embutimento na direção normal às fibras (F_{e90}), em kN.

Norma	EN 383:2007				ASTM D5764:2007			
d (mm)	8	10	12	16	8	10	12	16
Paricá	1,44	2,00	3,83	8,68	0,76	1,16	1,36	4,60
	1,67	2,07	3,95	9,00	0,76	0,84	1,12	4,70
	1,55	2,30	4,28	8,21	0,80	1,50	1,08	4,80
Pinus elliottii	3,22	4,89	7,87	13,63	1,21	2,40	6,60	7,40
	3,14	3,13	7,45	13,33	1,30	2,35	7,60	7,40
	3,28	5,00	7,03	12,96	1,35	3,20	7,20	7,60
Pinus oocarpa	2,32	5,49	5,55	10,30	1,45	2,10	2,80	10,00
	2,26	5,62	5,08	10,67	1,60	1,40	2,90	10,00
	2,30	3,76	5,11	11,56	1,50	1,50	2,80	10,00
Jatobá	10,42	14,68	18,94	40,98	3,80	8,90	12,80	22,00
	10,16	14,60	19,05	41,57	3,80	8,00	13,60	22,00
	9,91	12,15	18,00	39,00	4,00	7,20	12,40	22,00
Lyptus	4,50	7,03	8,81	11,36	2,80	4,65	5,80	8,00
	4,89	7,20	9,00	12,00	2,90	4,45	6,00	8,80
	5,23	6,40	8,52	12,63	2,80	4,40	6,00	8,10
Cupiúba	4,44	9,10	9,60	10,42	1,70	4,20	6,80	9,60
	4,29	9,10	9,85	10,80	1,90	4,15	6,80	10,00
	4,37	9,95	10,10	11,55	2,00	4,20	6,80	10,40

As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, para os ensaios na direção paralela e normal em relação às fibras, a espessura (t) de cada um dos corpos de prova e o diâmetro (d) de cada um dos pinos metálicos utilizados.

Tabela 6: Espessura dos corpos de prova (t) e dos diâmetros dos pinos (d) para ensaios de embutimento paralelo às fibras, em mm.

Norma		ABNT NBR 7190:1997				EN 383: 2007				ASTM D5764: 2007			
Paricá	t	14,30	20,18	25,42	31,87	14,92	20,57	25,54	31,78	14,88	20,69	24,94	32,77
	d	7,98	9,82	12,29	16,13	7,98	9,79	12,62	15,80	7,86	9,51	12,71	16,07
	t	14,11	20,59	24,97	32,24	14,80	20,62	24,78	31,81	14,80	20,61	24,90	33,01
	d	7,98	9,87	12,71	15,93	7,96	9,73	12,80	15,97	8,00	9,31	12,74	16,17
	t	14,27	20,30	24,95	32,06	14,93	20,54	25,37	31,78	14,68	20,75	24,93	32,86
	d	8,10	9,72	12,57	15,96	8,00	9,77	12,70	16,05	8,00	9,77	12,55	15,91
Pinus elliottii	t	17,6	20,55	25,04	32,72	17,31	20,68	24,93	32,66	17,43	20,48	24,78	32,63
	d	8,01	9,69	12,61	15,92	7,94	9,75	12,42	16,08	7,89	9,77	12,57	16,18
	t	17,54	20,32	25,02	32,74	17,44	20,67	25,17	32,8	17,37	20,49	25,03	32,51
	d	8,10	9,66	12,55	16,16	7,93	9,73	12,72	16,1	7,87	9,76	12,69	16,1
	t	17,54	20,46	24,78	32,65	17,44	20,50	25,13	32,65	17,51	20,52	25,02	32,46
	d	8,12	9,77	12,58	15,9	7,97	9,77	12,68	16,08	8,03	9,74	12,74	16,04
Pinus oocarpa	t	16,45	20,71	23,45	32,34	16,47	20,84	25,26	32,62	16,30	20,90	24,93	32,46
	d	8,01	9,74	12,83	15,94	8,00	9,66	12,75	15,98	7,97	9,43	12,61	15,9
	t	16,51	20,72	24,85	32,46	16,62	20,85	24,82	32,61	16,41	20,68	24,89	32,60
	d	8,05	9,78	12,64	16,07	8,01	9,70	12,67	15,76	7,96	9,76	12,56	16,14
	t	16,48	20,99	25,01	32,88	16,57	20,83	24,96	32,83	16,43	20,73	24,97	32,78
	d	8,06	9,70	12,63	15,91	7,94	9,42	12,71	15,71	7,97	9,73	12,86	16,71
Jatobá	t	16,52	20,38	22,44	32,03	16,53	19,81	22,81	32,61	16,39	20,77	22,70	31,86
	d	7,99	9,80	12,88	16,06	7,87	9,42	12,65	16,01	8,04	9,35	12,56	16,17
	t	16,60	20,43	22,65	32,24	16,43	20,68	21,98	32,55	16,43	20,63	22,18	31,87
	d	7,88	9,71	12,53	15,89	8,02	9,74	12,51	16,15	7,91	9,70	12,84	15,84
	t	16,58	20,30	22,51	32,20	16,45	20,54	22,63	32,37	16,48	20,70	22,58	31,68
	d	7,98	9,59	12,53	16,1	7,99	9,48	12,55	16,12	7,84	9,74	12,62	16,11
Lyptus	t	16,84	20,41	23,31	32,12	16,95	20,19	23,16	32,10	17,01	20,14	23,20	32,15
	d	7,90	9,75	12,91	16,41	8,01	9,86	12,79	16,34	7,98	9,77	13,02	16,17
	t	16,98	20,43	23,49	32,40	17,91	20,22	23,12	32,01	16,98	20,00	23,24	32,02
	d	7,91	9,74	13,07	16,29	7,87	9,77	12,76	16,20	7,94	9,86	12,75	16,2
	t	16,82	20,32	23,57	32,14	16,87	20,27	23,19	32,18	17,88	20,04	23,38	32,44
	d	7,96	9,76	12,94	16,13	7,90	9,77	12,79	16,20	7,96	9,77	12,75	16,02
Cupiúba	t	15,58	20,32	25,03	31,06	15,73	20,12	25,10	30,86	15,68	20,51	25,18	30,79
	d	7,91	9,74	12,53	16,16	7,98	9,69	12,64	16,16	7,91	9,67	12,85	15,97
	t	15,87	20,63	25,09	30,87	15,67	20,31	25,07	30,79	16,51	20,50	25,21	30,78
	d	7,93	9,80	12,66	16,19	8,04	9,68	12,63	16,13	8,04	9,68	12,63	16,00
	t	15,94	20,44	24,96	30,98	15,87	20,30	25,06	30,72	15,64	21,11	25,10	30,76
	d	7,89	9,73	12,66	16,10	8,03	9,67	12,64	16,17	8,07	9,69	12,65	15,94

Tabela 7: Espessura dos corpos de prova (t) e dos diâmetros dos pinos (d) para ensaios de embutimento normal às fibras, em mm.

Norma		EN 383: 2007				ASTM D5764: 2007			
Paricá	t	14,44	20,47	25,48	32,22	14,63	20,51	25,6	33,13
	d	7,93	9,66	12,72	16,09	7,91	9,69	12,58	15,77
	t	14,54	20,55	25,48	32,02	14,78	20,65	25,05	32,89
	d	7,99	9,61	12,89	15,98	7,99	9,75	12,47	16,01
	t	14,77	20,69	25,60	31,92	14,73	20,43	25,57	33,18
	d	7,86	9,84	12,68	16,14	7,89	9,68	12,61	16,15
Pinus elliottii	t	17,58	20,91	25,02	32,44	17,41	20,86	24,83	32,65
	d	7,92	9,87	12,62	15,83	8,00	9,76	12,62	16,14
	t	17,59	20,48	24,88	32,62	17,41	20,68	25,01	32,77
	d	8,00	9,79	12,69	15,90	7,89	9,38	12,43	15,89
	t	17,77	20,87	24,98	32,55	17,51	20,71	25,18	32,58
	d	7,91	9,36	11,79	16,11	7,89	9,76	12,66	16,14
Pinus oocarpa	t	16,34	20,96	24,85	32,71	16,28	20,68	24,81	32,74
	d	7,95	9,67	12,68	15,66	7,90	9,66	12,84	16,22
	t	15,79	20,76	25,11	32,76	16,54	20,71	24,67	32,65
	d	7,91	9,90	12,57	15,91	8,01	9,77	12,44	15,98
	t	16,20	20,61	23,04	32,85	16,51	20,40	24,68	32,55
	d	7,91	9,65	12,79	16,08	7,92	9,75	12,72	16,19
Jatobá	t	16,36	20,3	22,34	31,47	16,62	20,73	22,36	31,51
	d	8,02	9,75	12,36	15,87	7,98	9,40	12,78	15,88
	t	16,17	20,18	22,09	31,63	16,38	20,4	22,32	31,38
	d	8,03	9,73	12,54	15,70	8,03	9,68	12,32	16,15
	t	16,19	20,36	22,30	31,75	16,47	20,36	22,34	31,54
	d	7,90	9,83	12,63	16,02	8,04	9,70	12,68	15,90
Lyptus	t	16,7	20,23	23,31	31,84	16,87	20,61	23,60	32,18
	d	7,88	9,70	12,71	16,09	7,90	9,78	12,58	16,07
	t	16,79	20,20	23,24	32,41	16,94	20,68	23,51	32,06
	d	7,89	9,74	12,71	16,01	7,94	9,77	12,57	16,03
	t	16,73	20,53	23,16	32,29	16,92	20,67	23,41	32,00
	d	7,87	9,72	12,73	16,04	7,90	9,77	12,52	16,00
Cupiúba	t	15,88	20,48	25,02	31,52	15,72	20,38	24,58	30,53
	d	7,89	9,78	12,72	16,12	7,86	9,76	12,72	16,11
	t	15,85	20,53	25,07	31,38	15,73	20,34	25,20	30,71
	d	7,86	9,87	12,77	16,22	7,88	9,73	12,71	16,02
	t	15,70	20,44	25,00	31,42	15,71	20,32	24,83	30,55
	d	7,83	9,78	12,7	16,11	7,84	9,77	12,75	16,14

4.1.2. Resistência da Madeira ao Embutimento

As Tabelas 8 e 9 apresentam a resistência ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras, respectivamente, obtidas de acordo com a Seção 2.1, com os dados das Tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 8: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa.

Norma	ABNT NBR 7190:1997				EN 383:2007				ASTM D5764: 2007			
d (mm)	8	10	12	16	8	10	12	16	8	10	12	16
Paricá	9,7	14,9	18,6	14,8	20,6	22,9	26,2	25,0	14,4	21,3	25,2	27,3
	10,2	13,5	18,3	14,4	20,9	22,1	25,8	26,7	14,4	25,0	24,0	27,0
	10,2	14,7	16,6	14,9	21,7	23,7	24,6	24,0	15,2	20,7	25,6	28,3
Média (CV%)	10,0(3)	14,4(5)	17,8(6)	14,7(5)	21,0(3)	22,9(4)	25,5(3)	26,3(4)	14,6(3)	22,0(10)	24,9(3)	25,5(4)
Pinus elliottii	21,3	20,1	32,3	28,8	36,2	30,1	49,7	47,6	22,5	25,0	44,9	43,6
	21,1	24,5	32,5	30,2	30,1	31,4	47,7	48,7	23,4	28,0	42,8	44,9
	23,9	19,5	34,6	30,8	31,1	33,6	50,3	54,4	22,0	25,0	43,9	44,2
Média (CV%)	22,1(7)	21,4(13)	33,1(4)	30,0(3)	32,5(10)	31,7(6)	49,2(3)	50,2(7)	22,7(3)	26,0(7)	43,9(2)	44,2(2)
Pinus oocarpa	17,1	13,9	29,2	25,2	34,8	37,9	34,3	36,4	18,5	23,3	34,4	36,8
	15,8	12,3	25,5	25,9	32,6	36,8	37,8	42,1	19,1	22,8	35,8	38,0
	16,6	13,3	26,6	25,8	31,6	35,2	40,1	48,0	17,6	20,8	34,3	36,8
Média (CV%)	16,5(4)	13,2(6)	27,1(7)	25,6(1)	33,0(5)	36,6(4)	37,4(8)	42,2(14)	18,4(4)	22,3(6)	34,8(3)	37,2(2)
Jatobá	69,7	50,1	55,4	60,3	102,5	134,0	94,0	101,1	42,5	78,3	68,4	69,9
	70,3	56,5	52,1	60,5	97,3	100,0	113,3	97,3	41,6	70,0	73,7	82,2
	75,6	56,5	52,5	57,9	101,4	104,7	123,2	103,7	44,9	65,5	55,3	70,5
Média (CV%)	71,9(4)	54,3(7)	53,3(3)	59,5(2)	100,4(3)	112,9(16)	110,2(14)	100,7(3)	43,0(4)	71,2(9)	65,8(14)	74,2(9)
Lyptus	33,1	41,2	43,9	48,2	39,8	55,5	54,7	56,9	38,3	47,8	50,3	53,9
	32,6	41,2	44,3	47,4	37,4	56,7	57,6,8	56,3	41,5	47,2	52,4	53,0
	31,4	37,3	44,6	48,2	43,0	58,5	60,1	55,4	35,1	49,0	52,3	51,4
Média (CV%)	32,4(3)	39,9(6)	44,3(1)	47,9(2)	40,1(7)	56,9(3)	57,2(5)	56,2(1)	38,3(8)	48,0(2)	51,7(2)	52,8(2)
Cupiúba	26,3	35,4	35,7	37,9	35,6	56,7	51,1	51,9	32,3	46,8	37,1	39,0
	23,8	34,1	35,3	40,0	38,6	54,0	53,0	52,3	30,9	46,7	37,8	40,2
	23,1	32,0	36,7	36,1	42,4	55,0	46,1	51,2	32,1	44,9	37,6	40,8
Média (CV%)	24,4(7)	33,9(5)	35,9(2)	38,0(5)	38,9(9)	55,2(2)	50,0(7)	51,8(1)	31,7(2)	46,1(2)	37,5(1)	40,0(2)

Tabela 9: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras (f_{e90}), em MPa.

Norma	EN 383:2007				ASTM D5764: 2007				
	d (mm)	8	10	12	16	8	10	12	16
Paricá		12,6	10,1	11,8	16,8	6,6	5,8	4,2	8,8
		14,4	10,5	12,0	17,6	6,5	4,2	3,4	8,9
		13,3	11,3	13,2	15,9	6,9	7,6	3,3	9,0
Média (cv%)		13,4(7)	10,6(6)	12,4(6)	16,8(5)	6,7(3)	5,9(29)	3,6(13)	8,9(1)
Pinus elliottii		23,2	23,7	24,9	26,5	8,7	11,8	20,9	14,0
		22,3	15,6	23,6	25,7	9,2	12,1	24,1	14,2
		23,3	25,6	23,9	24,7	9,6	15,8	24,4	14,5
Média (cv%)		22,9(2)	21,7(24)	24,1(3)	25,7(4)	9,2(5)	13,2(17)	23,1(8)	14,2(1)
Pinus oocarpa		17,9	27,1	17,6	20,1	11,3	10,5	8,9	18,8
		18,1	27,3	16,1	20,5	12,1	6,9	9,2	19,2
		18,0	18,9	17,4	21,9	11,5	7,5	9,5	19,0
Média (cv%)		18,0(1)	24,5(20)	17,0(5)	20,8(5)	11,6(5)	8,0 (23)	9,2(3)	19,0(1)
Jatobá		80,2	74,2	68,6	82,1	29,0	45,7	46,4	44,0
		81,4	74,4	68,8	83,7	29,3	40,5	49,1	43,4
		77,4	60,7	63,9	76,7	31,3	36,5	44,0	43,9
Média (cv%)		79,7(3)	69,8(11)	67,1(4)	80,8(5)	29,8(4)	40,9(11)	46,0(5)	43,7(1)
Lyptus		34,2	35,8	29,7	22,2	21,0	23,1	19,5	15,5
		36,9	36,6	30,5	23,1	21,6	22,0	20,3	17,1
		39,9	32,1	28,9	24,4	20,9	21,8	20,5	15,8
Média (cv%)		37,0(8)	34,8(7)	29,7(3)	23,2(5)	21,2(2)	22,3(3)	20,1(2)	16,1(5)
Cupiúba		35,4	45,5	30,2	20,5	13,8	20,8	22,5	19,5
		34,4	44,9	30,8	21,2	15,3	20,5	23,0	20,3
		35,6	49,8	31,8	22,8	16,2	20,8	23,1	21,1
Média (cv%)		35,1(2)	45,7(6)	30,9(3)	21,5(6)	15,1(8)	20,7(1)	22,8(1)	20,3(4)

4.2. Propriedades Mecânicas e Densidade Aparente das Madeiras

As Tabelas 10 a 15 apresentam os resultados determinados para as propriedades mecânicas resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade em esforços de compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e densidade aparente da madeiras.

Tabela 10: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Paricá.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	29,0	7728	12,5	340
2	19,5	7253	9,7	300
3	27,7	11924	8,7	420
4	22,5	7962	11,5	300
5	21,8	7216	8,3	260
6	34,8	10019	11,0	380
7	21,2	7667	10,9	290
8	20,2	8033	10,0	310
9	21,6	7654	10,2	370
10	19,9	7871	8,8	290
11	20,4	9189	6,6	290
12	16,5	6004	10,0	240
Média	22,9	8210	9,9	320
CV (%)	22	19	16	17

Tabela 11: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Pinus elliottii

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	35,7	9753	17,8	470
2	33,0	9056	23,3	450
3	34,5	10543	17,9	470
4	34,9	10007	19,6	480
5	30,9	8132	17,3	480
6	34,0	9415	13,1	500
7	37,1	13524	22,2	490
8	29,0	7673	16,8	480
9	32,5	9362	17,5	460
10	39,7	9916	16,9	490
11	28,9	6879	16,5	460
12	33,3	7479	17,2	460
Média	33,6	9312	18,0	480
CV (%)	9	19	15	3

Tabela 12: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Pinus oocarpa.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	40,6	13103	11,1	550
2	33,0	14221	9,9	550
3	36,0	13074	10,6	560
4	31,5	9243	10,1	510
5	43,5	11794	11,2	560
6	40,3	13124	12,1	530
7	38,2	11871	11,7	520
8	37,1	13104	11,6	530
9	39,2	13775	11,7	550
10	39,3	14695	11,3	550
11	42,1	12931	9,3	560
12	39,8	14735	11,0	550
Média	38,4	12972	11,0	540
CV (%)	9	12	8	3

Tabela 13: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Jatobá.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	89,8	23968	20,6	950
2	92,6	22920	20,7	970
3	91,6	19788	20,5	950
4	89,3	18193	19,0	950
5	92,8	26975	19,0	980
6	92,1	25387	17,0	970
7	88,9	26549	21,9	970
8	89,4	28190	20,8	980
9	90,9	22431	21,2	980
10	81,6	19568	21,0	980
11	87,9	28808	14,4	990
12	88,7	22522	16,1	970
Média	89,6	23775	19,4	970
CV (%)	3	15	12	1

Tabela 14: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Lyptus.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	56,9	33216	13,7	590
2	52,9	21937	12,4	570
3	51,2	28802	13,8	530
4	41,0	24211	11,0	540
5	53,0	24070	11,4	540
6	54,9	19212	12,8	530
7	53,9	20536	14,1	530
8	53,0	20970	12,2	530
9	54,1	20869	9,9	540
10	59,5	15253	12,6	590
11	56,4	21393	11,2	560
12	56,1	20244	9,2	560
Média	53,6	22559	12,0	550
CV (%)	8	21	13	4

Tabela 15: Propriedades mecânicas e densidade aparente - Cupiúba.

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	46,5	12772	13,2	850
2	43,0	10136	14,7	920
3	51,3	11891	18,0	860
4	39,5	12320	13,2	880
5	43,7	8890	15,6	850
6	57,8	15086	13,3	850
7	43,0	8536	13,3	930
8	45,0	10687	16,4	890
9	46,3	12178	13,9	950
10	37,7	9596	15,0	920
11	41,2	10588	15,6	910
12	39,3	10689	12,1	920
Média	44,5	11114	14,5	890
CV (%)	13	17	12	4

Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras e de densidade aparente foram usados na Seção 4.3, para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e NDS:2001.

4.3. Resistência da Madeira ao Embutimento Calculada

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam, respectivamente, de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e NDS:2001, os valores calculados de resistência ao embutimento na direção paralela e normal em relação às fibras calculados bem como os parâmetros utilizados por cada um dos documentos normativos.

Tabela 16: Resistência ao embutimento calculada - ABNT NBR 7190:1997.

Espécies	f_{c0} (MPa)	f_{e0} (MPa)	f_{e90} (MPa)			
			d = 8 mm	d = 10 mm	d = 12 mm	d = 16 mm
Paricá	22,9	22,9	12,6	10,9	9,8	8,7
Pinus elliottii	33,6	33,6	18,5	16,0	14,4	12,8
Pinus oocarpa	38,4	38,4	21,1	18,2	16,5	14,6
Jatobá	89,6	89,6	49,3	42,6	38,5	34,0
Lyptus	53,6	53,6	29,5	25,5	23,0	20,4
Cupiúba	44,5	44,5	24,5	21,1	19,1	16,9

Tabela 17: Resistência ao embutimento calculada - EUROCODE 5:2004.

Espécies	ρ_{ap} (kg/m ³)	$f_{h,0}$ (MPa)				$f_{h,90}$ (MPa)			
		d=8mm	d=10mm	d=12mm	d=16mm	d=8mm	d=10mm	d=12mm	d=16mm
Paricá	320	24,1	23,6	23,1	22,0	16,4	15,7	15,1	13,9
Pinus elliottii	480	36,2	35,4	34,6	33,1	24,6	23,6	22,6	20,8
Pinus oocarpa	540	40,7	39,9	39,0	37,2	27,7	26,6	25,5	23,4
Jatobá	970	73,2	71,6	70,0	66,8	71,7	68,2	64,8	58,6
Lyptus	550	41,5	40,6	39,7	37,9	40,7	38,7	36,7	33,2
Cupiúba	890	67,1	65,7	64,2	61,3	65,8	62,6	59,5	53,8

Tabela 18: Resistência ao embutimento calculada - NDS:2001.

Espécies	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{e0} (MPa)	f_{e90} (MPa)			
			d = 8 mm	d = 10 mm	d = 12 mm	d = 16 mm
Paricá	320	24,7	14,4	12,8	11,7	10,2
Pinus elliottii	480	37,1	25,9	23,1	21,1	18,3
Pinus oocarpa	540	41,7	30,7	27,4	25,0	21,7
Jatobá	970	74,9	71,7	64,1	58,6	50,7
Lyptus	550	42,5	31,5	28,2	25,7	22,3
Cupiúba	890	68,8	63,3	56,6	51,7	44,8

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise dos resultados de f_{e0} e f_{e90} obtidos dos ensaios em corpos de prova e calculados utilizando os parâmetros recomendados pelas normas. Foram confeccionados gráficos com a finalidade de facilitar a análise dos resultados obtidos.

5.1. Resistência ao Embutimento Paralelo às Fibras

As Figuras 15 à 20 apresentam, graficamente, os valores médios dos resultados obtidos experimentalmente e dos resultados calculados para a resistência ao embutimento paralelo às fibras (f_{e0}). Cada figura apresenta os resultados para uma espécie de madeira.

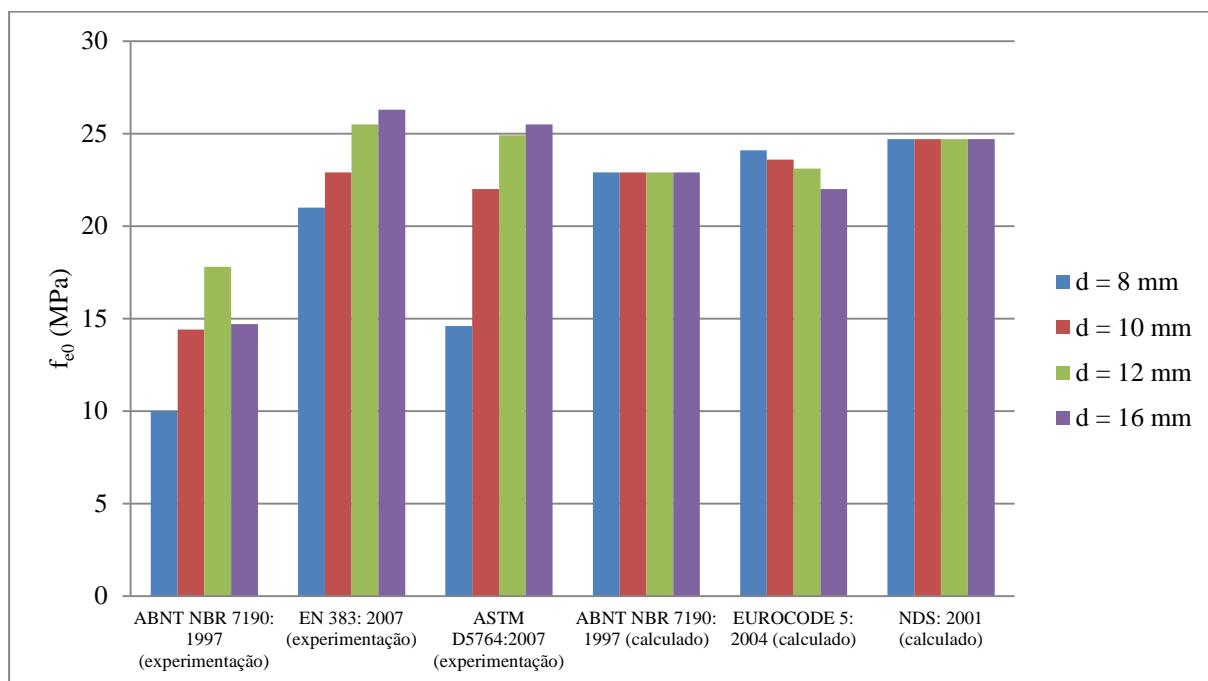


Figura 15: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} - Paricá.

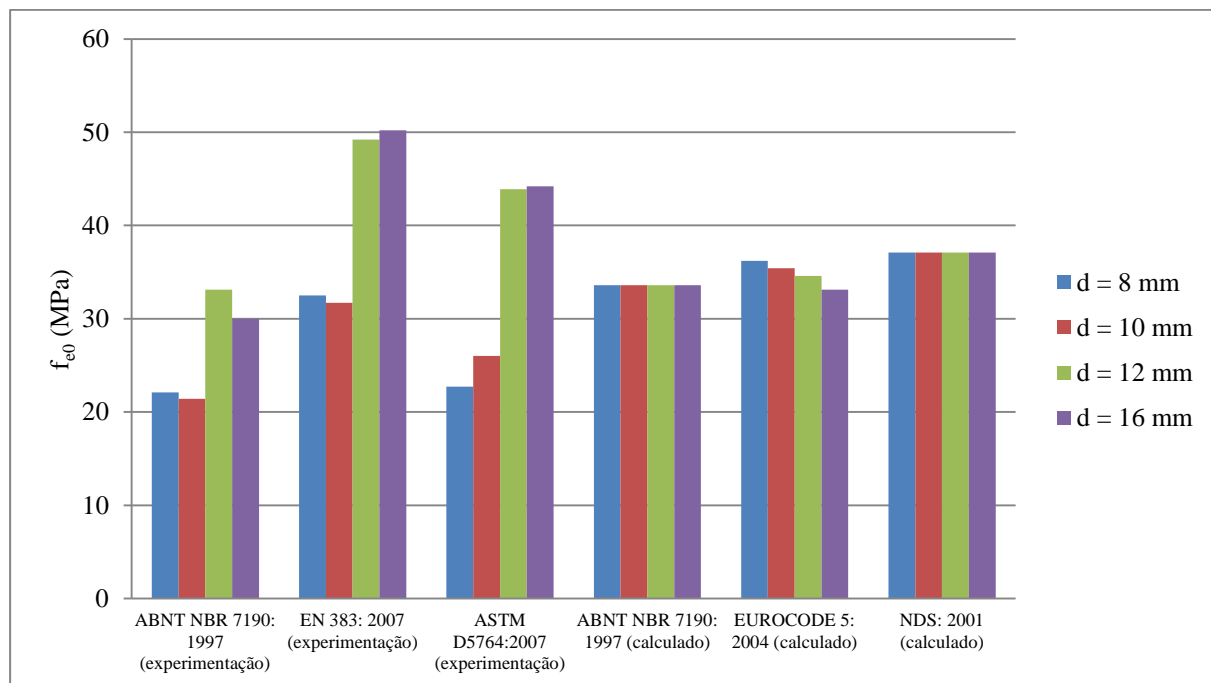


Figura 16: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} – Pinus elliottii.

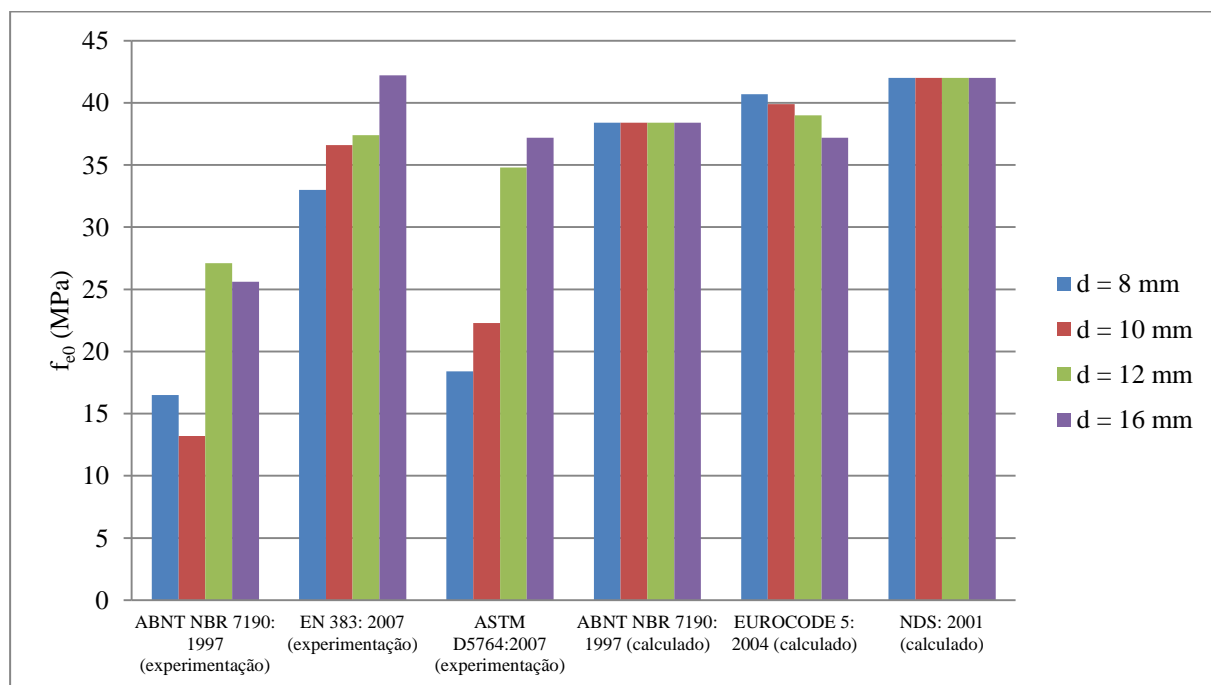


Figura 17: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} – Pinus oocarpa.

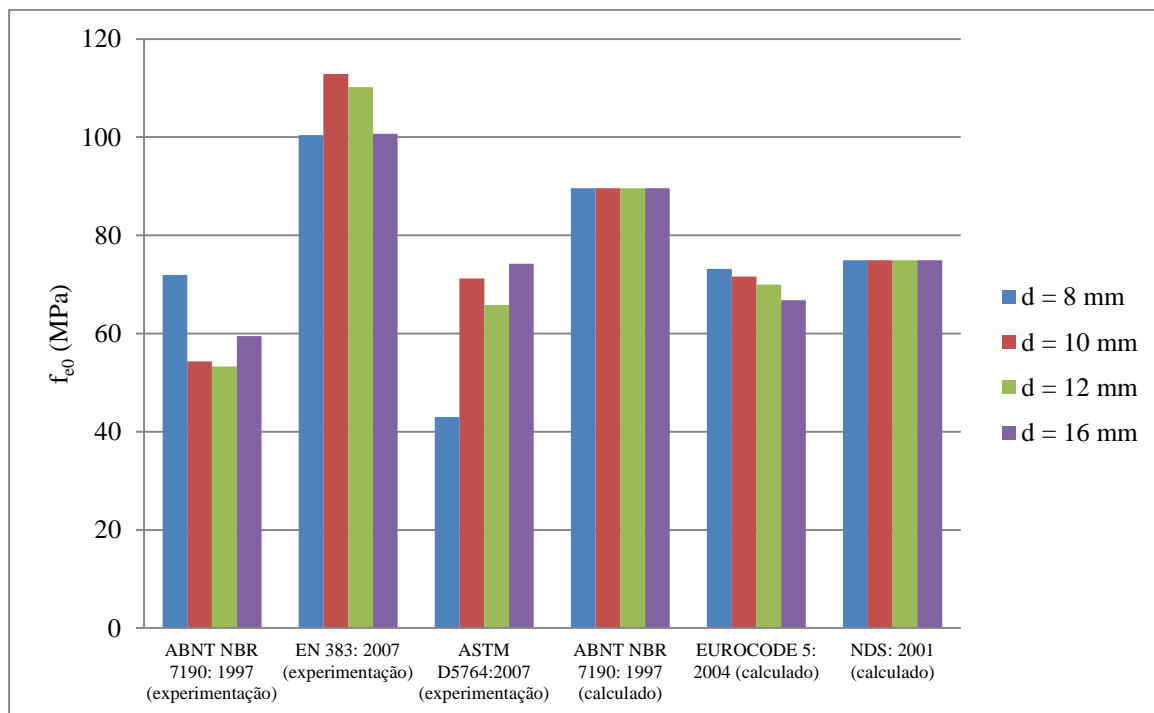


Figura 18: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} – Jatobá.

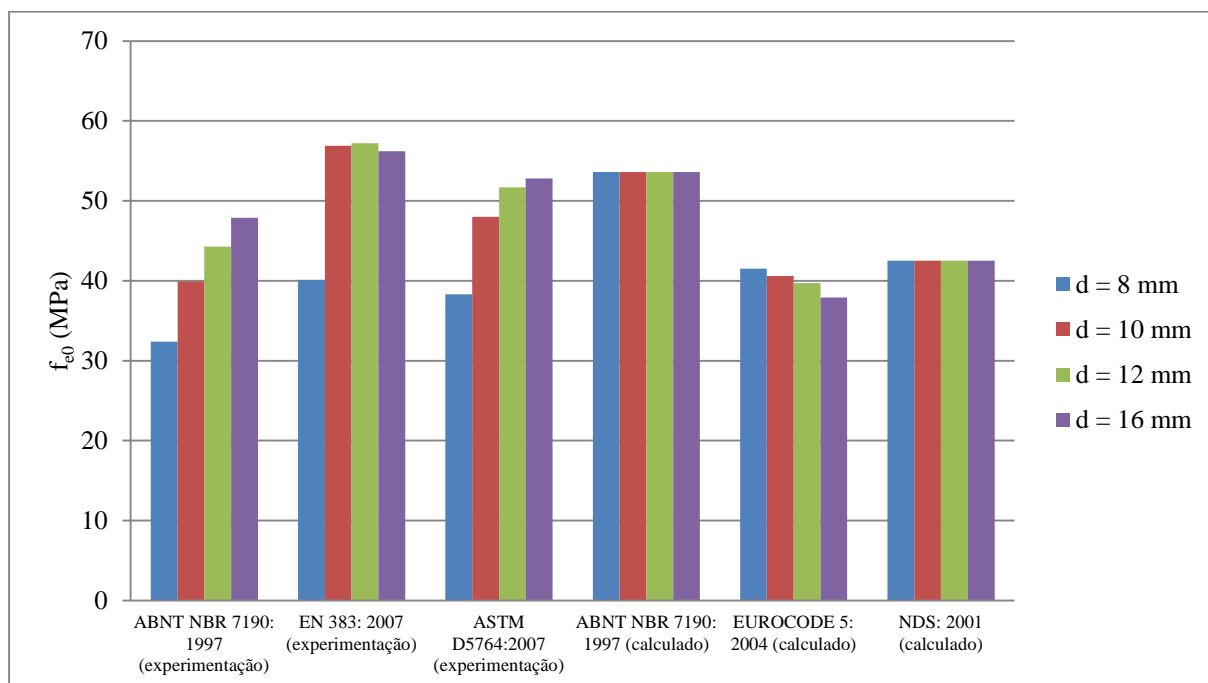


Figura 19: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} – Lyptus.

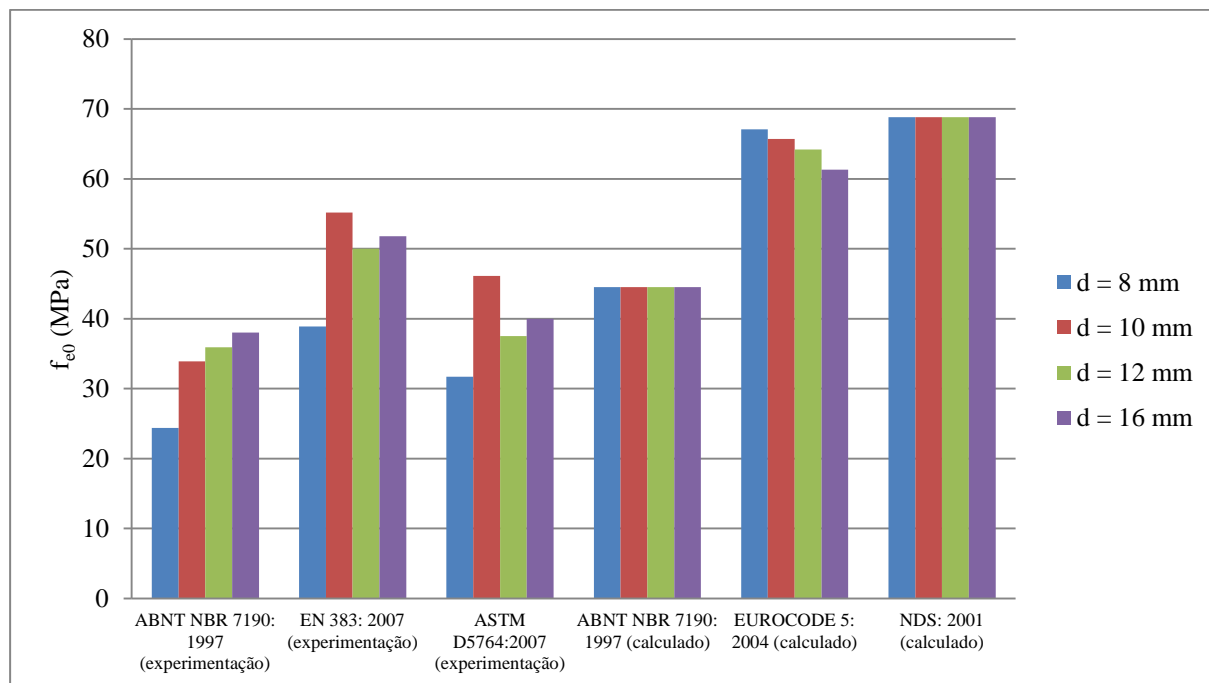


Figura 20: Resultados experimentais e calculados de f_{e0} – Cupiúba.

Para todas as espécies de madeira e diâmetros de pinos metálicos utilizados nesta pesquisa observaram-se maiores valores médios de f_{e0} determinados pelo método EN 383:2007 em relação aos métodos americano e brasileiro. Isto acontece por que o método europeu adota a máxima força de embutimento resistida pelo corpo de prova ou a força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira (Seção 2.1.2), enquanto que os outros dois métodos adotam a tensão correspondente ao deslocamento residual igual a 5% (ASTM D5764:2007) e a 2,8% (ABNT NBR 7190:1997) do diâmetro do pino.

O método de ensaio da ABNT NBR 7190:1997 apresenta a base de medida igual a 14 vezes o diâmetro do pino para o cálculo da deformação específica utilizada para determinação da resistência da madeira ao embutimento pelo método gráfico. Parece ser mais adequado considerar o deslocamento relativo entre o pino metálico e a peça de madeira em função do diâmetro do pino ou de um valor absoluto, assim como recomendam as normas ASTM D5764:2007 e EN 383:2007, respectivamente.

Nos gráficos mostrados no Apêndice B pode ser observado que todos os corpos de prova ensaiados na direção paralela às fibras atingiram a força máxima antes que o limite de deslocamento igual a 5 mm fosse atingido.

O método da ASTM D5764:2007 apresentou valores médios de f_{e0} superiores aos encontrados pela ABNT NBR 7190:1997 para todas as madeiras e pinos metálicos utilizados (exceção do Jatobá com pino metálico de 8 mm de diâmetro, provavelmente ocorrida devido à variabilidade da resistência da madeira).

Sistematicamente, os valores experimentais obtidos utilizando pinos metálicos com 8 mm de diâmetro foram muito inferiores aos determinados utilizando pinos metálicos com diâmetros maiores. Isso pode ser devido à menor rigidez à flexão dos pinos metálicos de 8 mm, ou à maior concentração de tensões que ocorre nesse caso. Nesse aspecto, a recomendação da norma ABNT NBR 7190: 1997 para que se utilize parafusos com diâmetro de pino maior ou igual a 10 mm se mostra adequada.

O valor médio de f_{e0} determinado pelo método de ensaio ABNT NBR 7190:1997 foi inferior ao calculado pela mesma norma (igual ao valor da resistência à compressão paralela às fibras) para todas as madeiras e diâmetros de pinos metálicos utilizados. Isso indica que o método experimental adotado pela norma brasileira leva a subestimar os valores da resistência ao embutimento em relação ao valor que vem sendo mais utilizado atualmente.

Os valores médios de f_{e0} calculados pela ABNT NBR 7190:1997 foram bem próximos aos determinados experimentalmente pelo método EN 383:2007. Isto ocorre devido a ambos os métodos adotarem uma força máxima (compressão paralela às fibras e de embutimento, respectivamente) como parâmetro para a determinação de f_{e0} .

O EUROCODE 5:2007 e o NDS:2001 utilizam como parâmetros para o cálculo da resistência ao embutimento a densidade aparente da madeira. Entretanto, para o caso das folhosas, madeiras com maiores densidades aparentes não apresentam, necessariamente, maiores valores de resistência; nesse caso melhor estimativa da resistência é dada pelo módulo de elasticidade. Esse aspecto pode ser notado para os resultados obtidos para as madeiras de Lyptus e Cupiúba, apresentados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Nos casos das folhosas, para a avaliação da resistência ao embutimento, não é pertinente a utilização de equações em função da densidade aparente. A norma brasileira adota a resistência ao embutimento igual a resistência na compressão, para o caso da direção paralela às fibras, providência que se mostrou adequada, considerando os resultados obtidos nos ensaios.

Na maioria dos casos podemos observar que, entre os valores calculados, o método NDS:2001 apresentou os maiores valores acompanhado do método EUROCODE 5:2004 e, finalmente, do método ABNT NBR 7190:1997. Vale destacar que os métodos de cálculo brasileiro e americano apresentam valores calculados de f_{e0} iguais para qualquer diâmetro de pino metálico, por sua vez, o método EUROCODE 5:2004 apresenta um decréscimo no valor de f_{e0} com o acréscimo no valor do diâmetro do pino metálico utilizado.

5.2. Resistência ao Embutimento Normal às Fibras

As Figuras 21 à 26 apresentam as comparações dos resultados obtidos experimentalmente e dos resultados calculados para a resistência ao embutimento normal às fibras (f_{e90}). Cada figura apresenta os resultados para uma espécie de madeira.

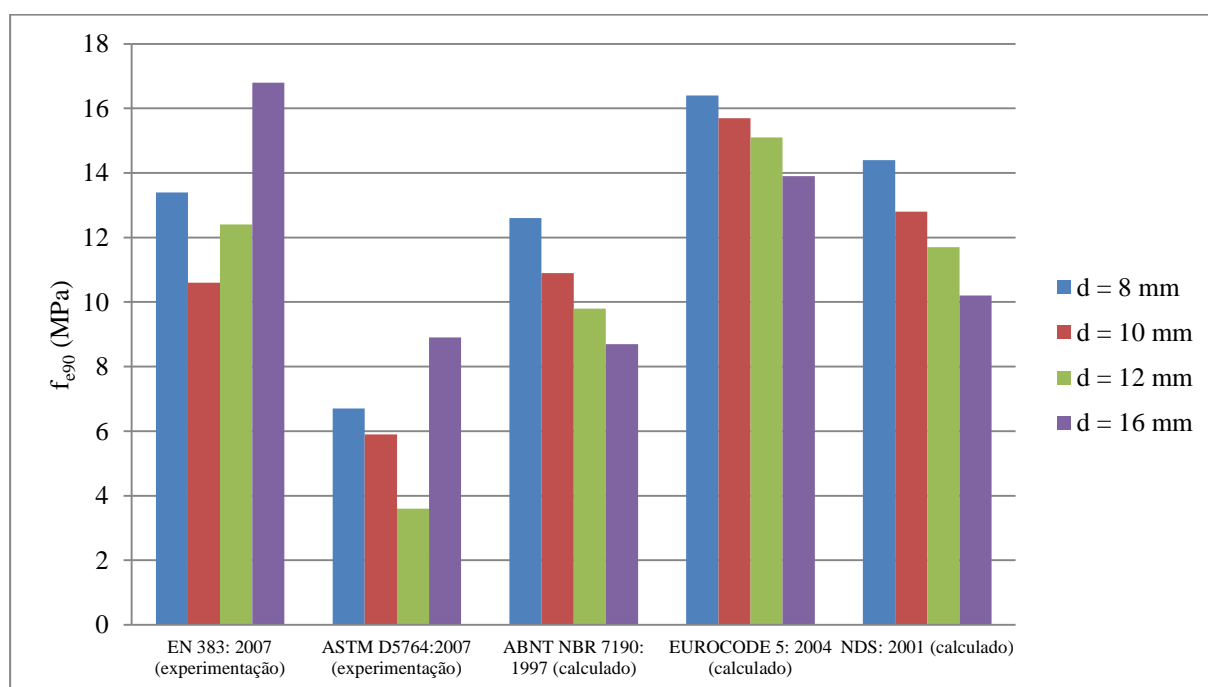


Figura 21: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Paricá.

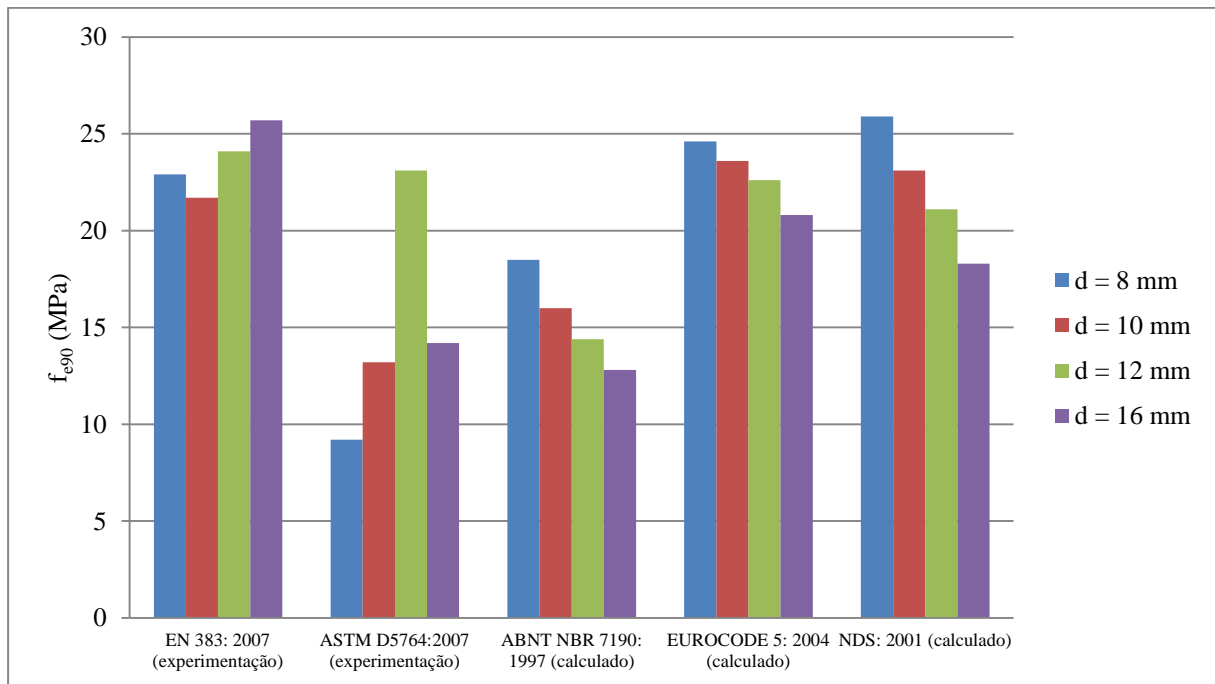


Figura 22: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Pinus elliotii.

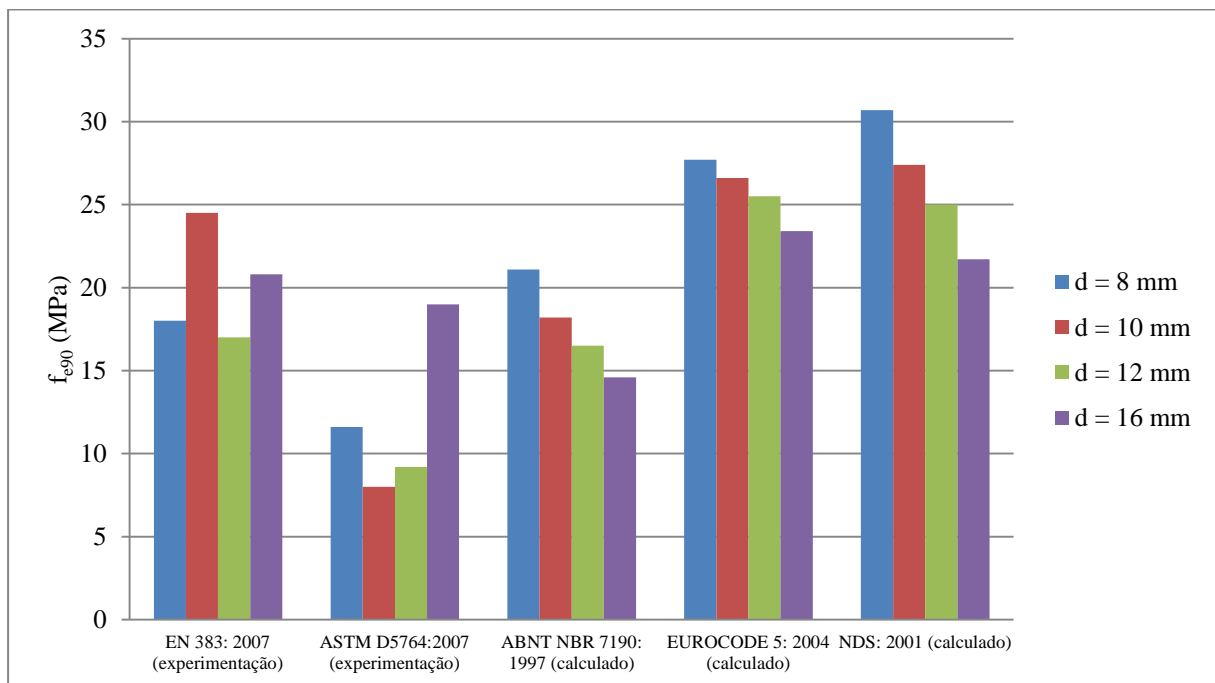


Figura 23: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Pinus oocarpa.

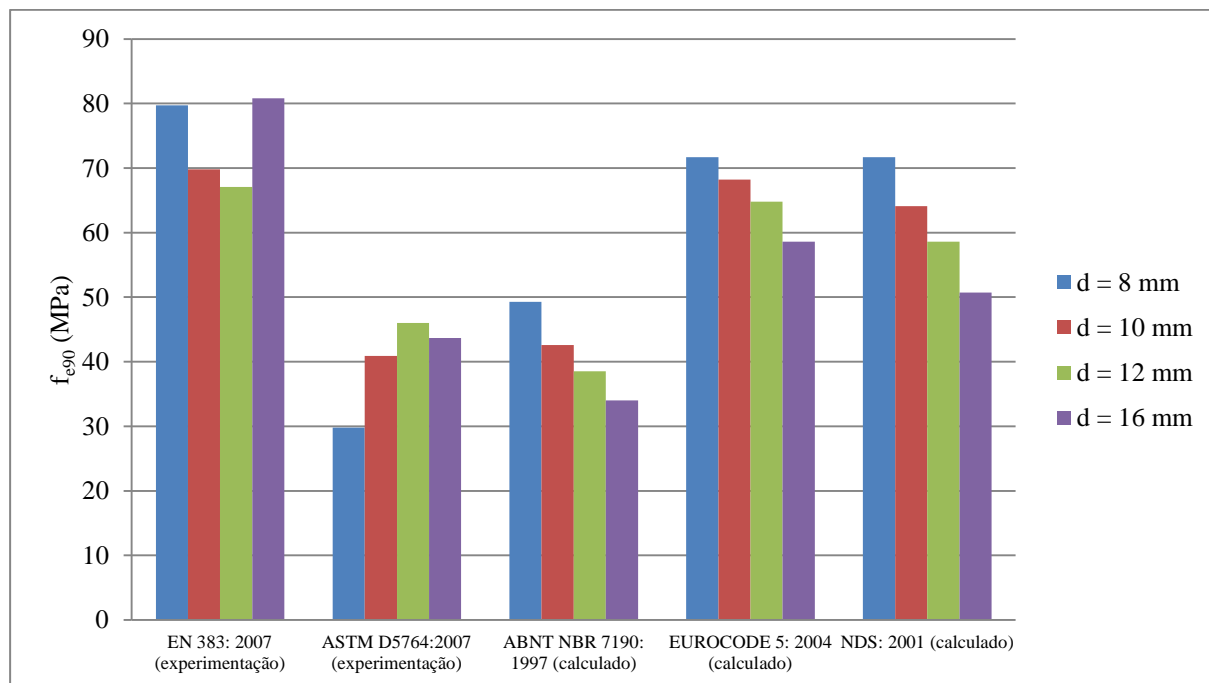


Figura 24: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Jatobá.

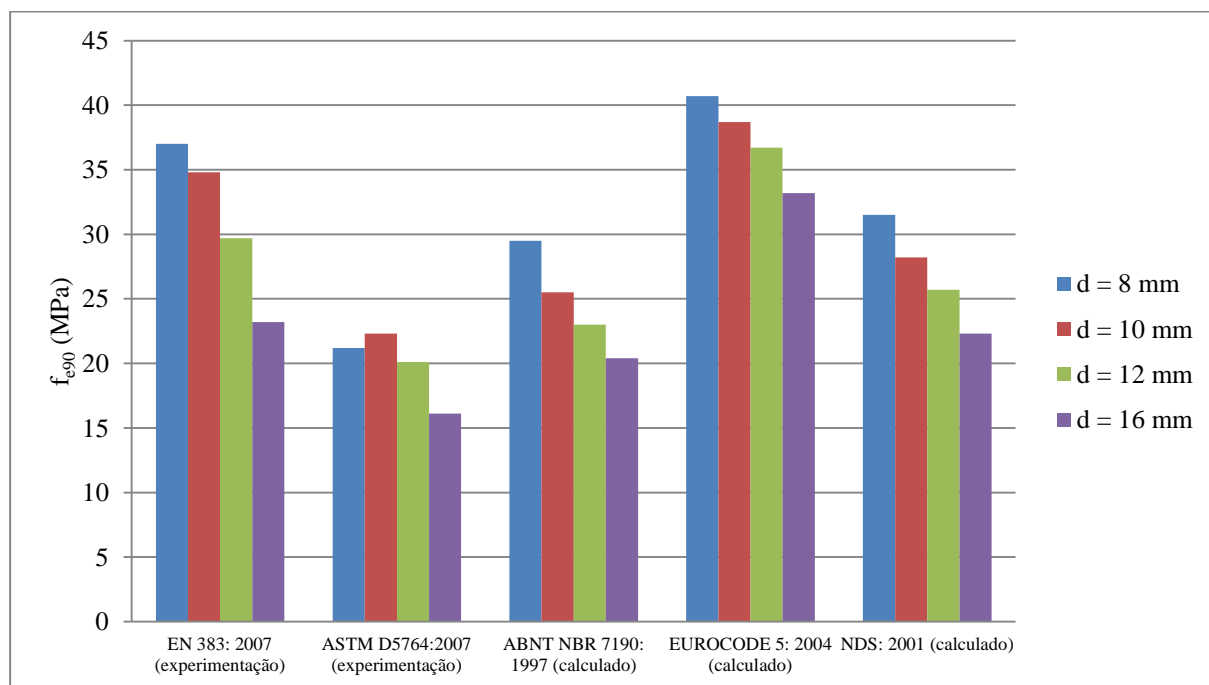


Figura 25: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Lyptus.

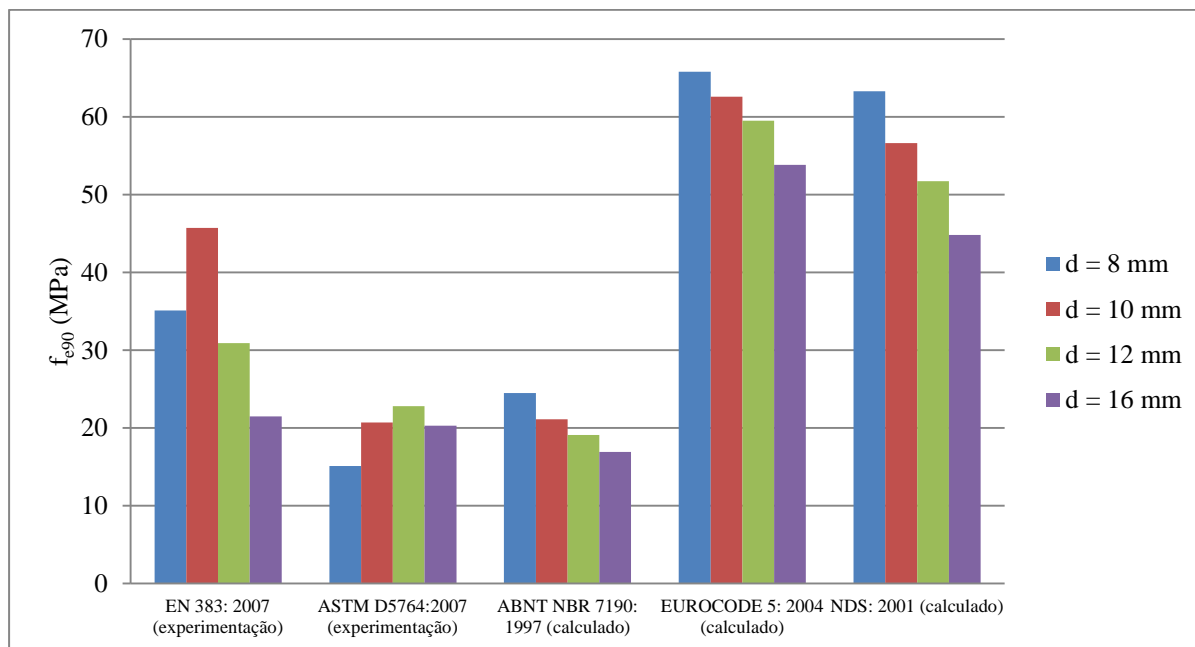


Figura 26: Resultados experimentais e calculados de f_{e90} – Cupiúba.

Assim como no caso da direção paralela às fibras, os valores experimentais obtidos pelo método EN 383: 2007 foram superiores aos do método ASTM D5764:2007, pelas mesmas razões apontadas anteriormente.

Para os ensaios de acordo com o EN 383:2007, nenhum dos corpos de prova atingiu os 5 mm de deslocamento relativo, como no caso da direção paralela.

Não foram realizados ensaios para determinação da resistência ao embutimento normal às fibras à luz do documento ABNT NBR 7190:1997 por causa da dificuldade de se encontrar peças de madeira que possibilitassem a confecção dos corpos de prova com o comprimento recomendado na direção normal às fibras (18 vezes o diâmetro do pino). Nesse sentido, observa-se que o comprimento dos corpos de prova das normas ASTM D5764:2007 (maior valor entre 75mm e 6 vezes o diâmetro do pino) e EN 383:2007 (10 vezes o diâmetro do pino) facilitam a confecção do corpo de prova.

De maneira geral, o valor calculado pela ABNT NBR 7190:1997 obteve uma concordância razoável com o valor experimental determinado pela EN 383:2007, para as espécies estudadas, com exceção do Jatobá. Nesse caso, referente a uma espécie de alto valor para o módulo de elasticidade e para a resistência à compressão paralela, a resistência ao embutimento na direção normal calculada pela ABNT NBR 7190:1997 é subestimada em relação ao valor obtido experimentalmente pela EN 383:2007.

6. PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO DE EMBUTIMENTO

A seguir, serão apresentadas as principais diretrizes para proposta de um método de ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras, embasadas na análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. Propõe-se adotar o método de ensaio da EN 383:2007 para determinação da resistência da madeira ao embutimento.

A norma europeia recomenda corpos de prova nas direções paralela e normal em relação às fibras com dimensões em função do diâmetro do pino metálico que possibilitam suas confecções sem maiores dificuldades, até mesmo, para diâmetros de pinos superiores aos utilizados nesta pesquisa.

O fato da EN 383:2007 adotar a força máxima ou a força que provoca o deslocamento relativo entre o pino metálico e o corpo de prova igual a 5 mm como critério para determinação da resistência ao embutimento, proporciona uma concordância com a resistência à compressão paralela às fibras, que é o parâmetro utilizado pela norma brasileira para o cálculo da resistência ao embutimento.

6.1. Dimensões dos Corpos de Prova

As dimensões dos corpos de prova para realização dos ensaios na direção paralela e normal em relação às fibras são apresentadas nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

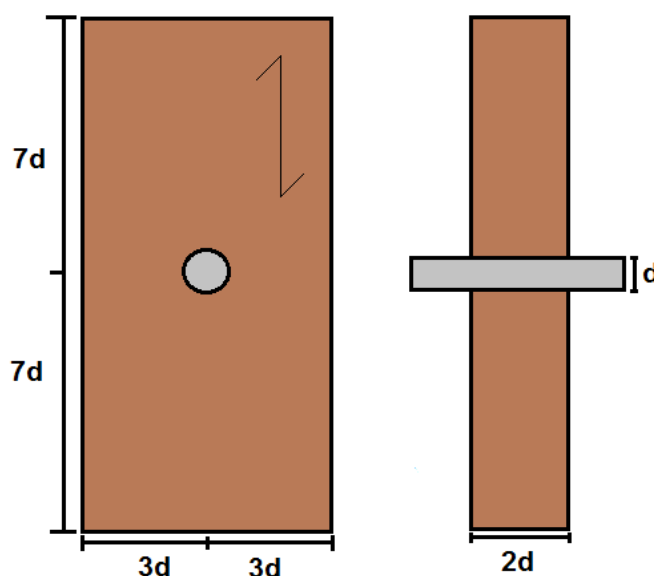


Figura 27: Corpo de prova proposto para o ensaio de resistência ao embutimento paralelo às fibras.

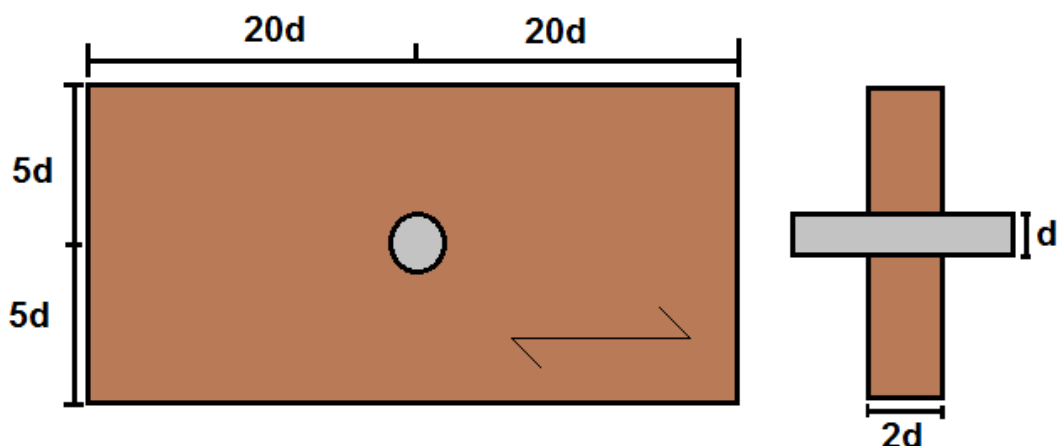


Figura 28: Corpo de prova proposto para o ensaio de resistência ao embutimento normal às fibras.

6.2. Critério de Resistência ao Embutimento

A resistência da madeira ao embutimento (f_e) é igual ao valor da máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e o corpo de prova (F_{5mm}), dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso (d) e a espessura da peça (t), conforme mostrado nas Equação 13.

$$f_e = \frac{F_{m\acute{a}x} \text{ ou } F_{5mm}}{t \cdot d} \quad (13)$$

6.3. Aplicação da Força

Para realização dos ensaios deve ser estimada a resistência ($f_{e,est}$) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada da mesma amostra a ser estudada. Estimada a resistência da madeira ao embutimento deve ser aplicado um ciclo de carregamento, com velocidade de 10 MPa/minuto, até 50% desse valor, mantendo-o por 30 segundos, seguido de um descarregamento até o valor de 10%, mantendo-o por 30 segundos. Em seguida, deve ser aplicado um carregamento monotônico crescente até ocorrer a ruptura do corpo de prova ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira.

7. CONCLUSÕES

No decorrer da análise dos resultados foram apresentadas várias conclusões, sendo as principais destacadas a seguir.

A adoção da força máxima de embutimento ou a força que causa o deslocamento relativo igual a 5 mm entre o pino metálico e o corpo de prova como critério para determinação da resistência da madeira ao embutimento pela EN 383:2007 é mais adequado que os critérios adotados pelos documentos normativos brasileiro e americano.

O corpo de prova recomendado pela EN 383:2007 na direção normal em relação às fibras apresenta dimensões que propiciam a confecção de corpos de prova sem dificuldades.

Para todas os casos de espécies de madeira e diâmetros de pinos metálicos utilizados nesta pesquisa observaram-se maiores valores médios da resistência da madeira ao embutimento determinados pelo método EN 383: 2007, seguidos nesta ordem pelos valores obtidos pelos métodos da ASTM D5764:2007 e da ABNT NBR 7190:1997. Isto acontece devido aos documentos normativos americano e brasileiro utilizarem um método gráfico que leva a valores menores para a resistência ao embutimento em comparação com o método do EN 383:2007.

Os resultados obtidos com pinos metálicos de 8 mm não foram satisfatórios, sendo interessante ressaltar a pertinência da recomendação da ABNT NBR 7190:1997 de utilizar pinos com diâmetros iguais ou superiores a 10 mm.

Não foi possível realizar a experimentação de corpos de prova na direção normal às fibras utilizando o método da ABNT NBR 7190:1997, pois a dimensão nesta direção dificulta a obtenção de peças à partir das quais são confeccionados os corpos de prova.

Em nenhum dos ensaios realizados de acordo com as diretrizes da norma EN 383:2007 foi atingido o limite de 5 mm de deslocamento entre o pino metálico e o corpo de prova.

Propõe-se adotar o método de ensaio da EN 383:2007 para determinação da resistência da madeira ao embutimento, pois este forneceu valores coerentes com o parâmetro utilizado pela ABNT NBR 7190:1997 para cálculo da resistência ao embutimento e dimensões de corpos de prova que facilitam a sua confecção.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; MOLINA, J. C.; FERRO, F. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Embedment strength of *Pinus sp.* Wood to metal pins, **ADVANCED MATERIALS RESEARCH**, v. 884, p.653-656, 2014.

ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L., **REVISTA ÁRVORE**, v. 38, N. 2, p.347-352, 2014.

ALMEIDA, D. H.; CAVALHEIRO, R. S.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Full characterization of strength properties of *Schizolobium amazonicum* Wood for timber structures, **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING & TECHNOLOGY**, v. 13, n. 6, p.93-96, 2013.

ALMEIDA, D. H.; MOLINA, J. C.; ALMEIDA, D. H.; CALIL JUNIOR, C. Análise das resistências ao embutimento e à compressão em madeiras de reflorestamento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 13., 2012, Vitória, Espírito Santo. **Anais...** Vitória, UFES, CD-ROM.

ALMEIDA, D. H. **Análise das resistências de embutimento e de compressão para madeiras de Pinus e Eucalipto.** 2011. 100 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Campus Experimental de Itapeva, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2011.

ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira.** 1987. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

ALMEIDA, P. A. O. **Estruturas de grande porte de madeira composta.** 1990. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS/ AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. **LRFD:** Load and resistance factor design. Washington: ANSI/ AF&PA, 1996.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS/ AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. **NDS:** American national design and specification for wood construction. Washington: ANSI/ AF&PA, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5764:** Evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products. West Conshohocken: ASTM, 2007.

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

BARALDI, L. T. **Método de ensaio de ligações de estruturas de madeira por chapas de dentes estampados.** 1996. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

BATISTA, J. L. **Resistência ao embutimento da madeira serrada.** 1996. 64 f. Monografia (Qualificação para Defesa de Dissertação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

BREMER, C. F. **Ligações com tubos galvanizados em madeira laminada colada de Eucalipto grandis, solicitadas a momento fletor e força cortante.** 1999. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

BRITO, L. D. **Recomendações para o projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento.** 2010. 338 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** Barueri: Manole, 2003.

CARRASCO, E. V. M.; BREMER, C. D. Determinação da resistência ao embutimento em ligações estruturais de madeira laminada colada com parafusos ocos. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 7., 2000, São Carlos, São Paulo. **Anais...** São Carlos, EESC/USP, CD-ROM.

CORREIA, R. R. **Avaliação da resistência de ligações com parafusos auto-atarraxantes do tipo torx solicitados por tração axial, em peças de madeira.** 2002. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DUARTE, R. S. **Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC.** 2004. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 383:** Timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. Brussels, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5:** Design of timber structures – Parte 1 - 1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento do Paricá. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 11., 2008, Londrina, Paraná. **Anais...** Londrina, IBRAMEM, CD-ROM.

FRANKE, S.; QUENNEVILLE, P. Bolted and dowelled connections in Radiata Pine and laminated veneer lumber using the European yield model, **AUSTRALIAN JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING**, v. 12, n. 1, p.13-28, 2011.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for bridge and structural engineering, Zurich, v.9, p.249-262, 1949.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; ROSA, L. M. Caracterização da madeira de Cambará, *Vochysia guianensis* Aubl., **REVISTA ENGENHARIA CIVIL**, n. 29, p.57-69, 2007.

NASCIMENTO, A. M.; XAVIER, C. N.; SILVA, M. A.; NASCIMENTO, L. A. C. Resistências à compressão e ao embutimento e densidade das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus paniculata*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 13., 2012, Vitória, Espírito Santo. **Anais...** Vitória, UFES, CD-ROM.

OLIVEIRA, M. A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira**. 2001. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SANTOS, C. L.; JESUS, A. M. P.; MORAIS, J. J. L.; LOUSADA, J. L. P. C. Bearing properties of portuguese pine wood beneath a laterally loaded dowel, **CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS**, v. 20, n. 1-2, p.45-51, 2008.

SMITH, I. **Short term load tests on whitewood embedment specimens with a single plain circular section steel connector in a hole of the same diameter**. High Wycombe, Timber Research and Development Association, 1982.121p. Research Report 1/82.

STAMATO, G. C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada**. 1998. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

STAMATO, G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. 2002. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

VALLE, A. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. 1999. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VALLE, A; KÖHLER, A. D.; SZÜCS, C. A.; FUSCO, P. B. Determinação experimental da resistência e da rigidez de embutimento da madeira com orientação das fibras variável. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 7., 2000, São Carlos, São Paulo. **Anais...** São Carlos, IBRAMEM, CD-ROM.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A ABNT NBR 7190:1997

As Figuras 29 até 52 apresentam os gráficos provenientes dos ensaios para determinação da força de embutimento para cada um dos corpos de prova utilizados na pesquisa de acordo com o método da ABNT NBR 7190:1997.

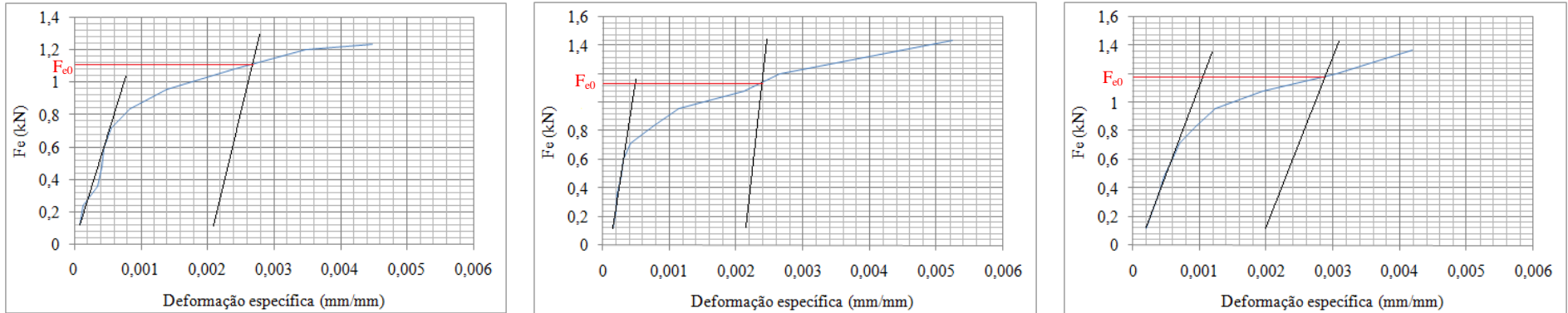


Figura 29: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; $d = 8$ mm.

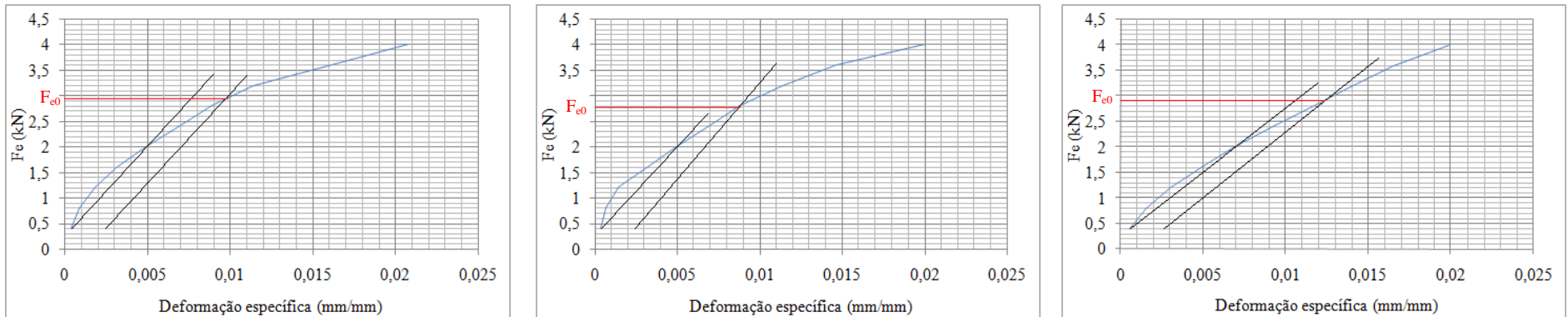


Figura 30: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; $d = 10$ mm.

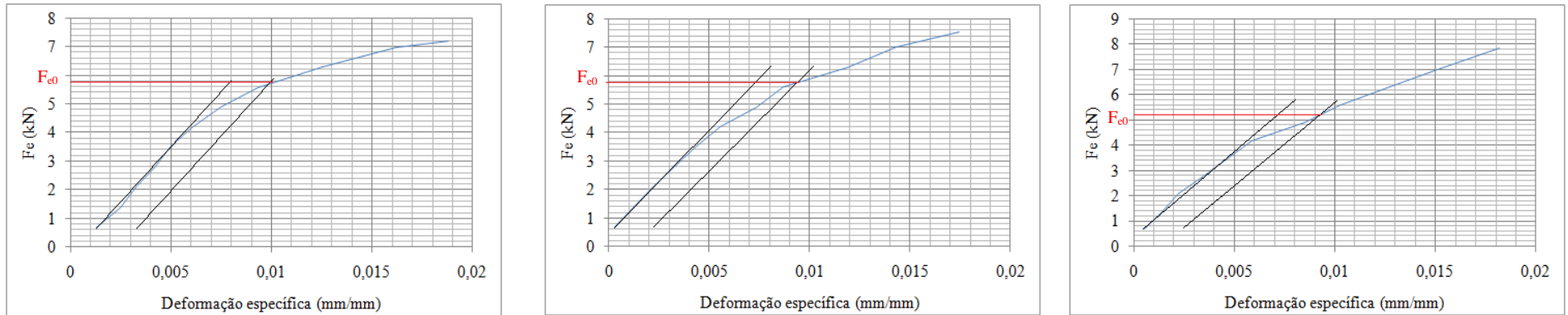


Figura 31: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; $d = 12$ mm.

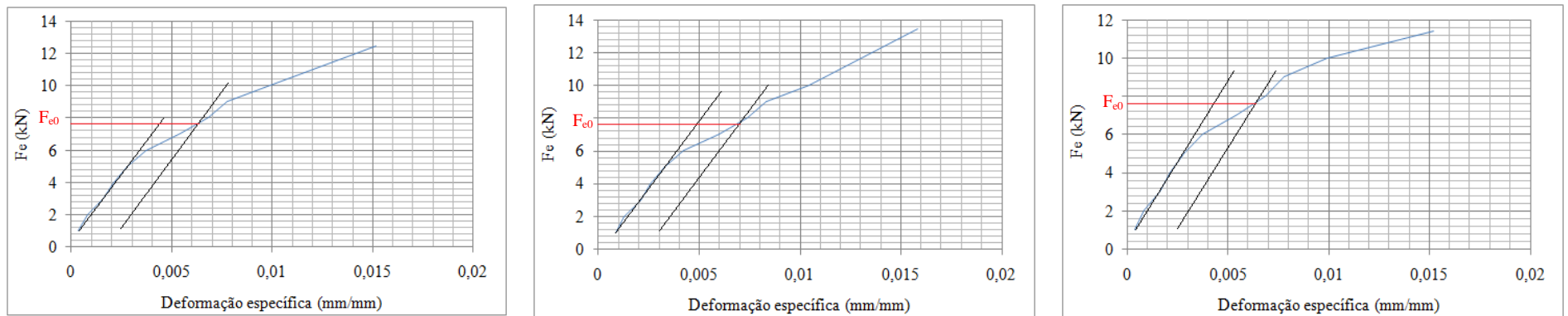


Figura 32: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Paricá; $d = 16$ mm.

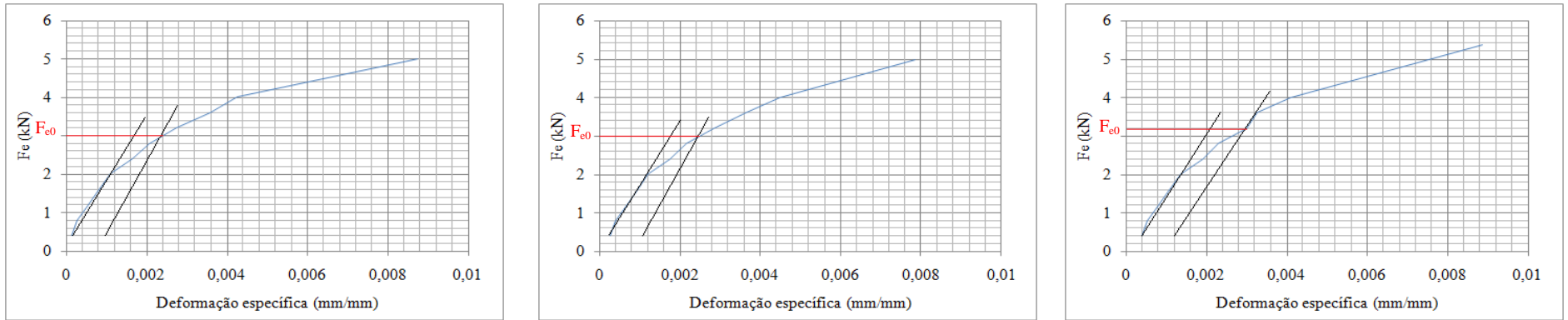


Figura 33: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.

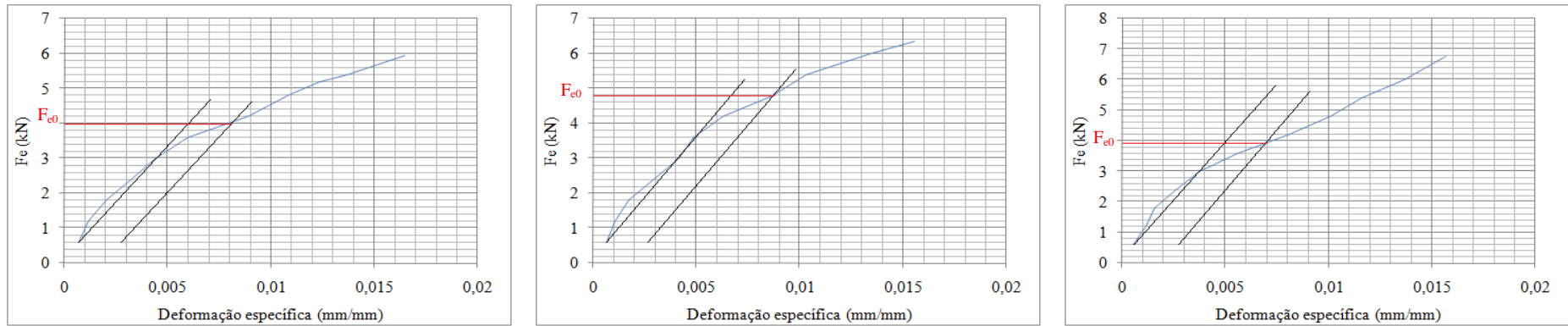


Figura 34: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.

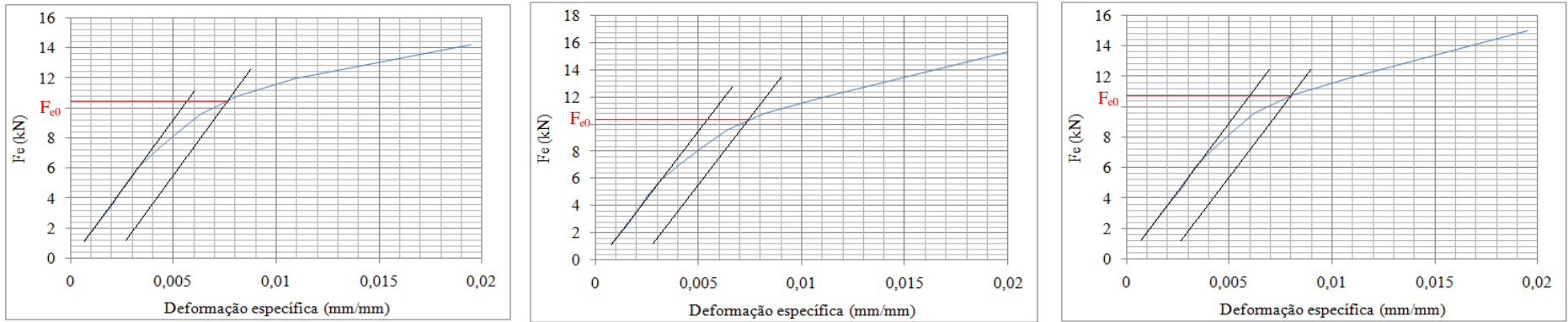


Figura 35: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.

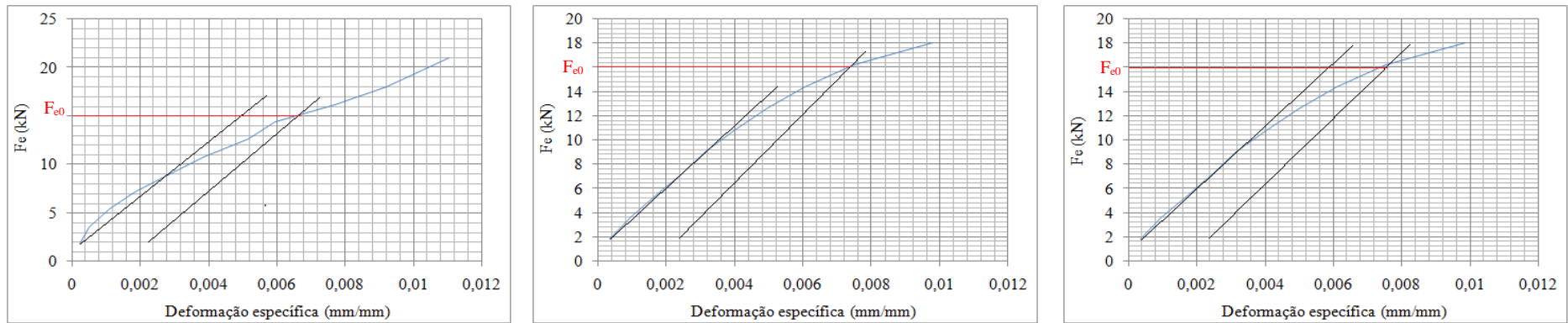


Figura 36: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus elliottii; $d = 16$ mm.

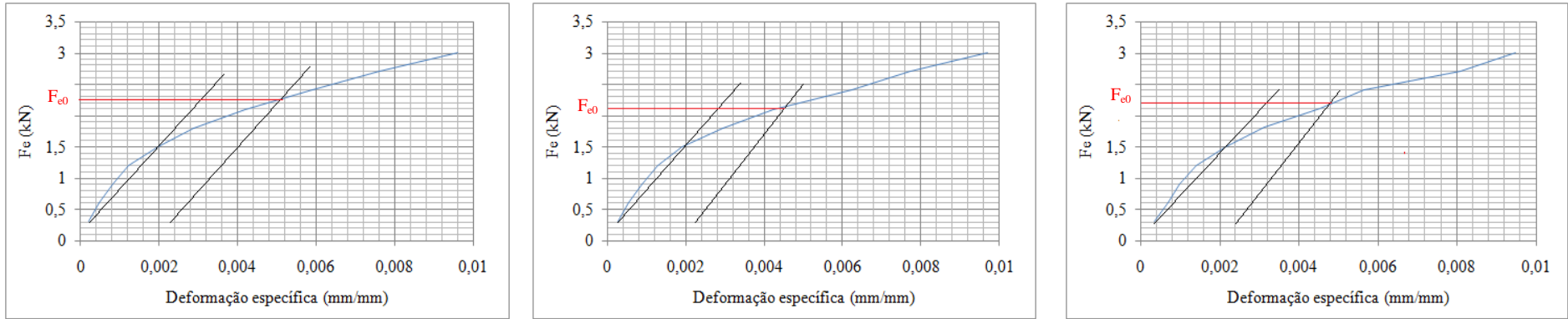


Figura 37: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.

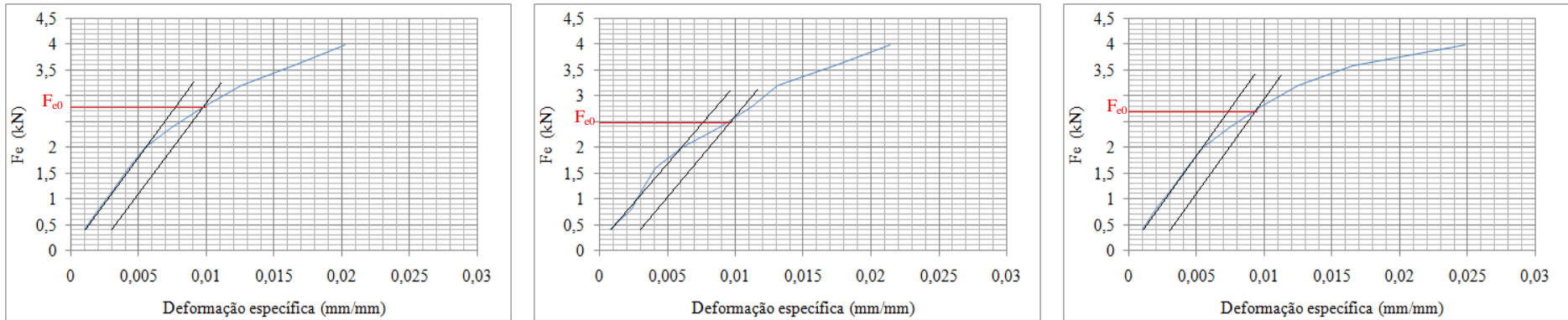


Figura 38: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.

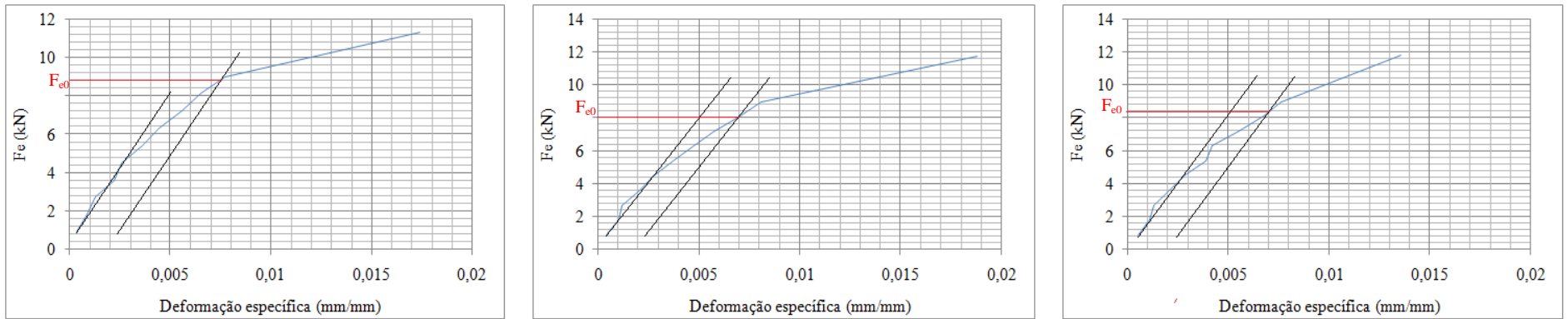


Figura 39: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.

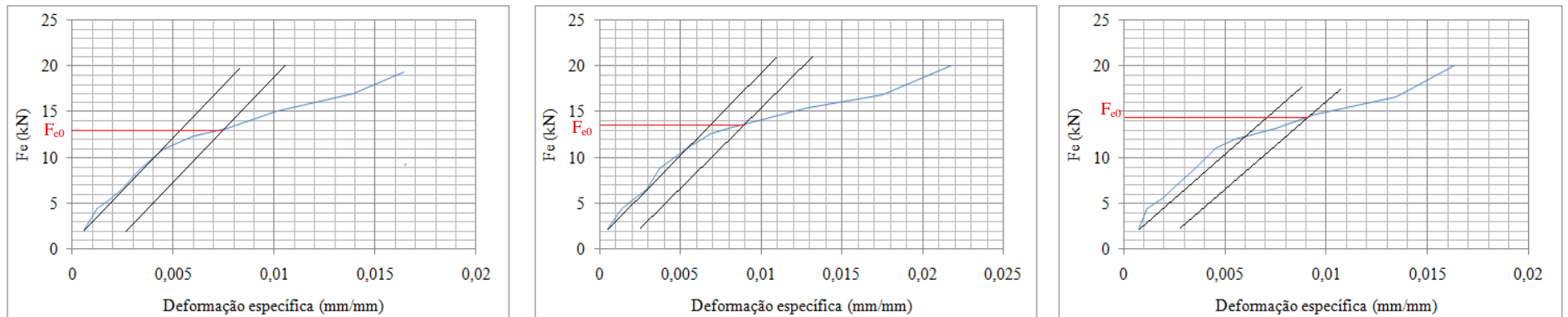


Figura 40: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Pinus oocarpa; $d = 16$ mm.

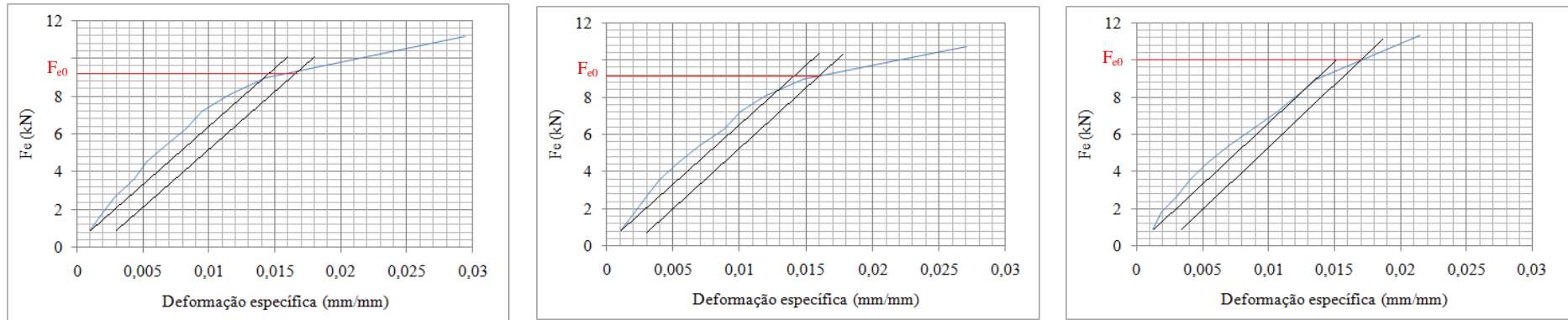


Figura 41: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; $d = 8$ mm.

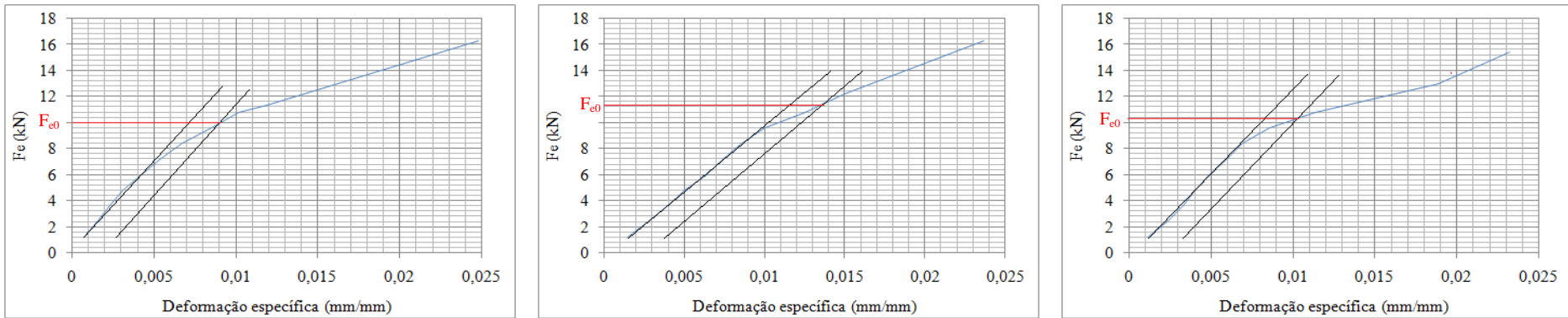


Figura 42: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; $d = 10$ mm.

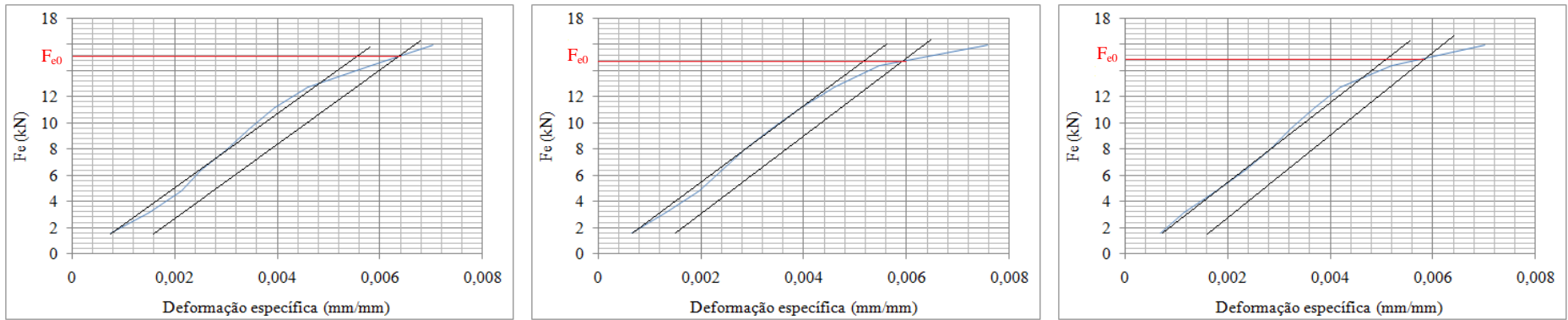


Figura 43: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; $d = 12$ mm.

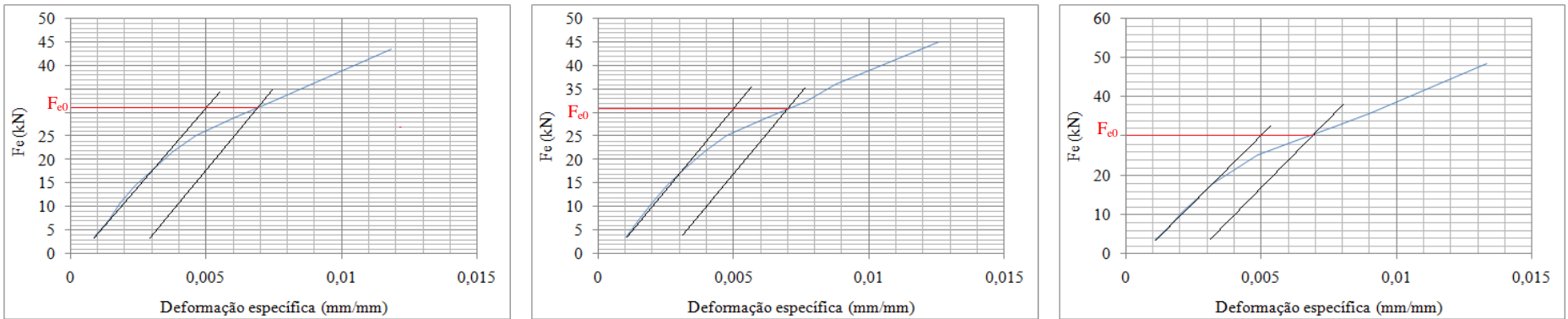


Figura 44: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Jatobá; $d = 16$ mm.

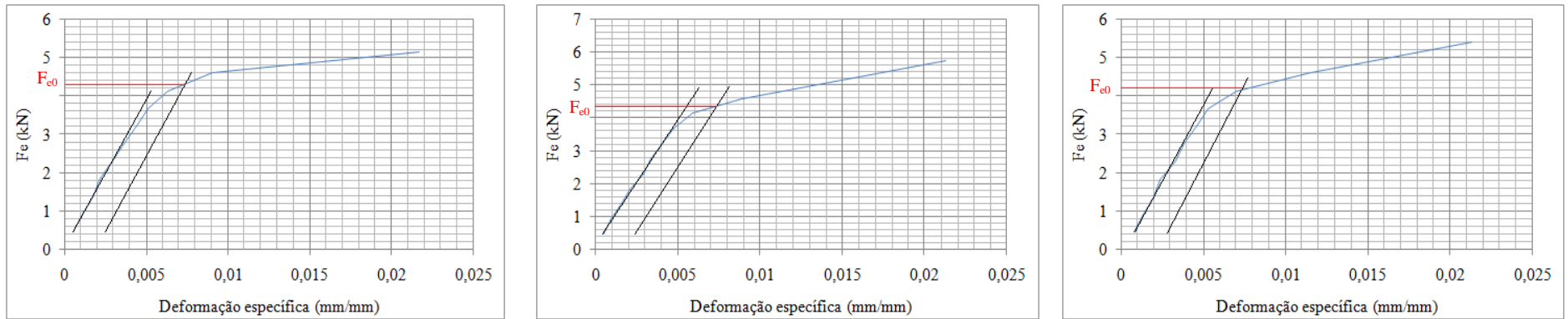


Figura 45: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; $d = 8$ mm.

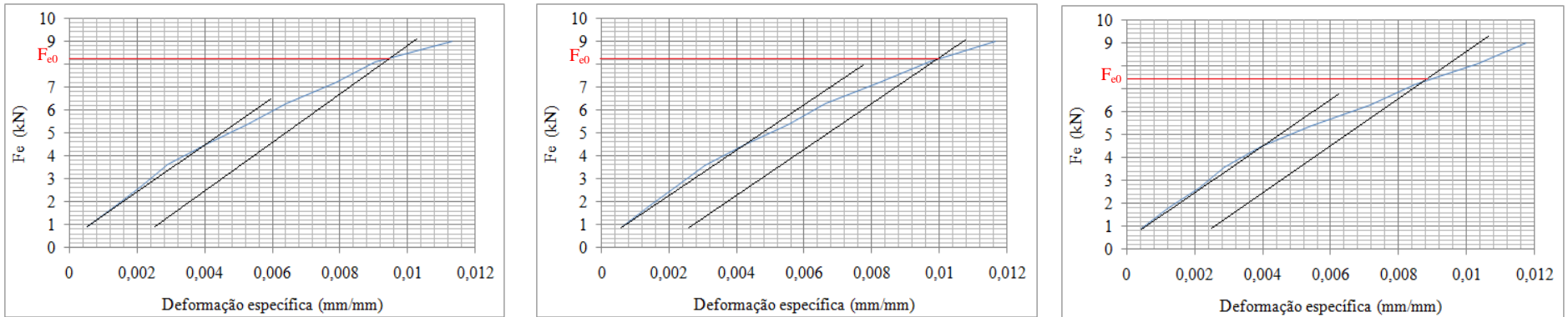


Figura 46: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; $d = 10$ mm.

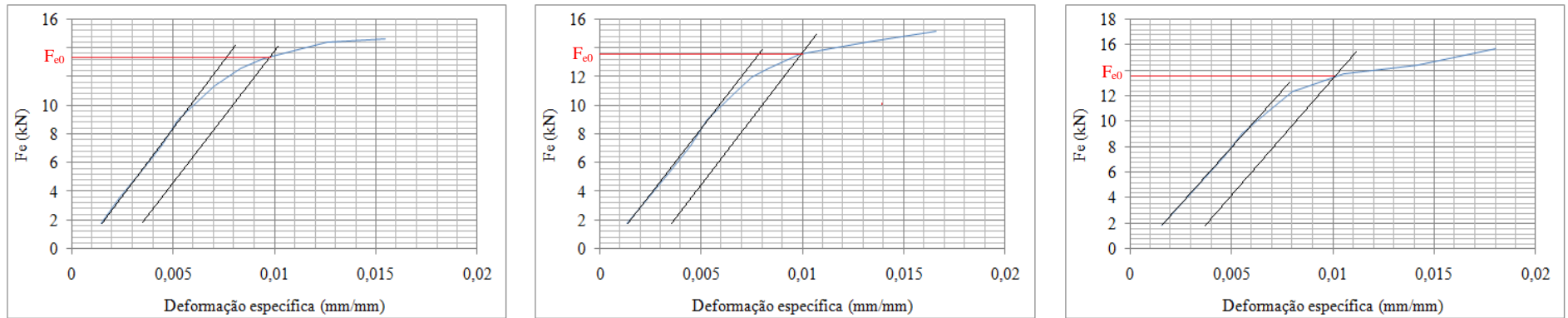


Figura 47: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; $d = 12$ mm.

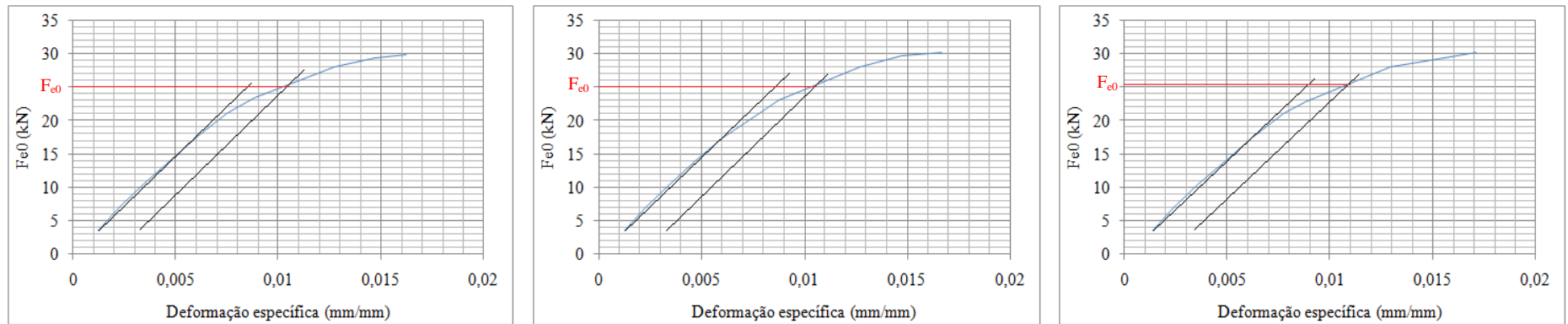


Figura 48: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Lyptus; $d = 16$ mm.

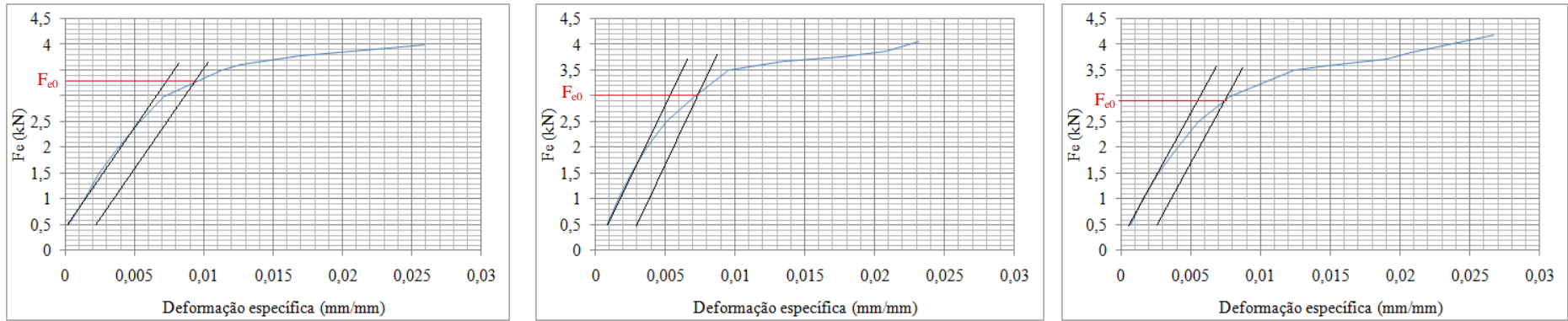


Figura 49: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; $d = 8$ mm.

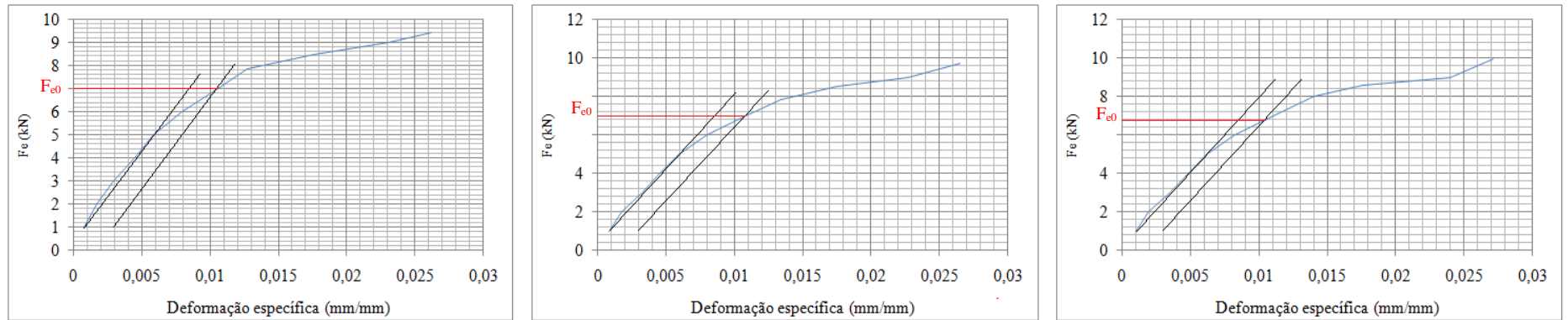


Figura 50: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; $d = 10$ mm.

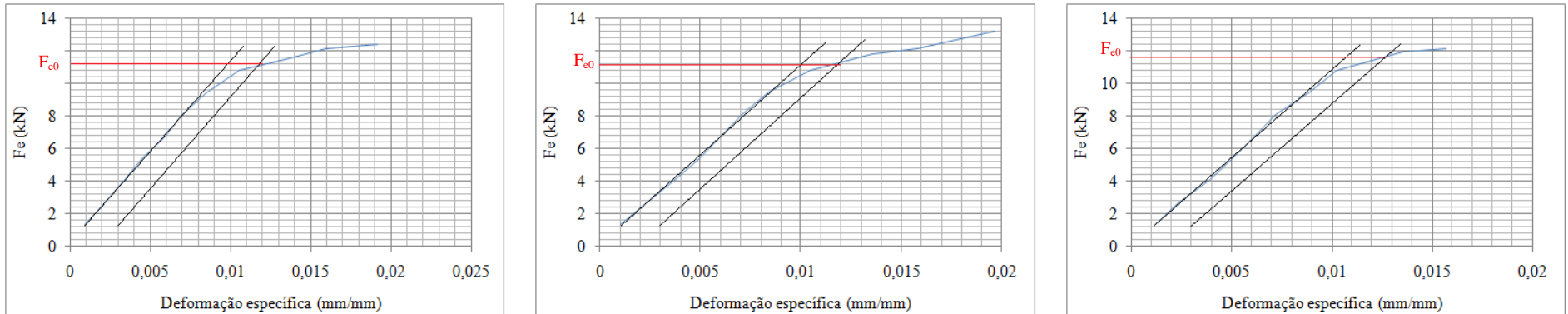


Figura 51: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; $d = 12$ mm.

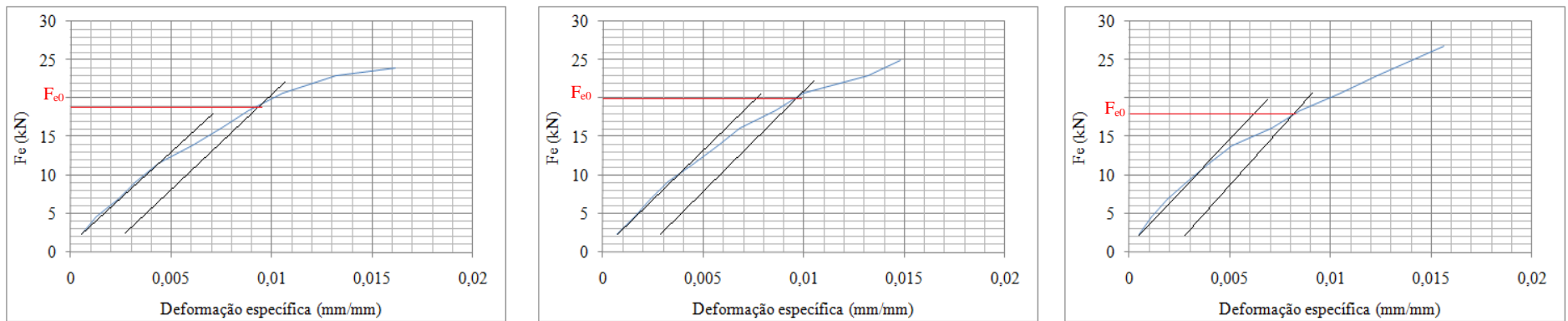


Figura 52: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190:1997; Cupiúba; $d = 16$ mm.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A EN 383:2007

As Figuras 53 até 100 apresentam os gráficos provenientes dos ensaios para determinação da força de embutimento para cada um dos corpos de prova utilizados na pesquisa de acordo com o método da EN 383: 2007.

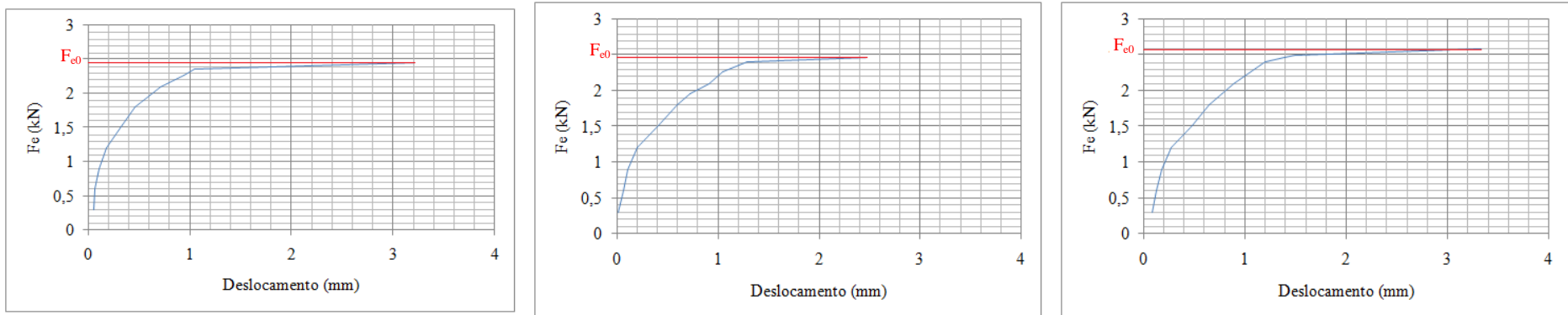


Figura 53: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 8$ mm.

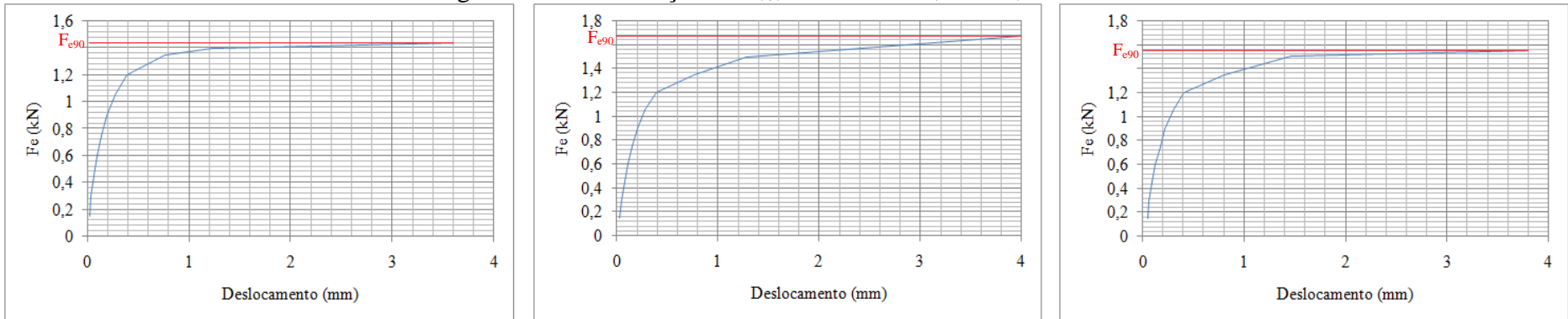


Figura 54: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 8$ mm.

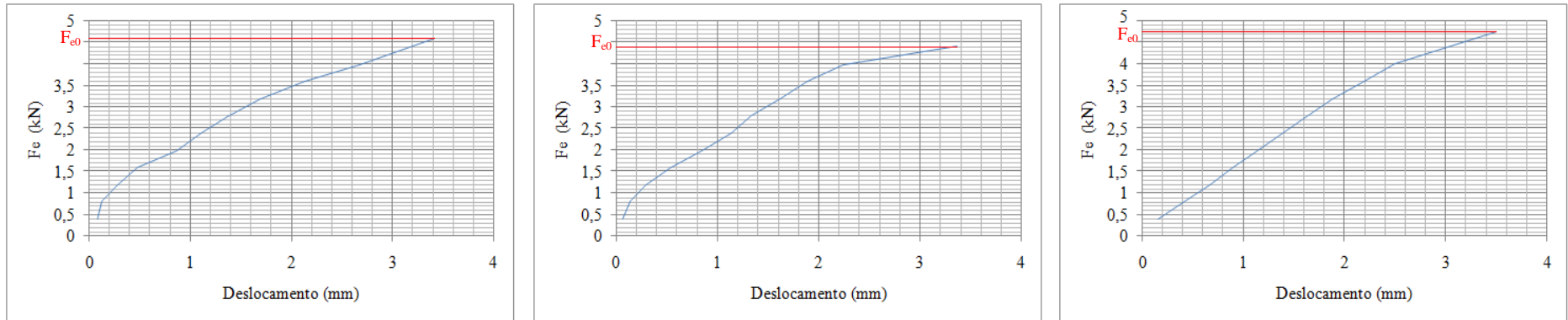


Figura 55: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

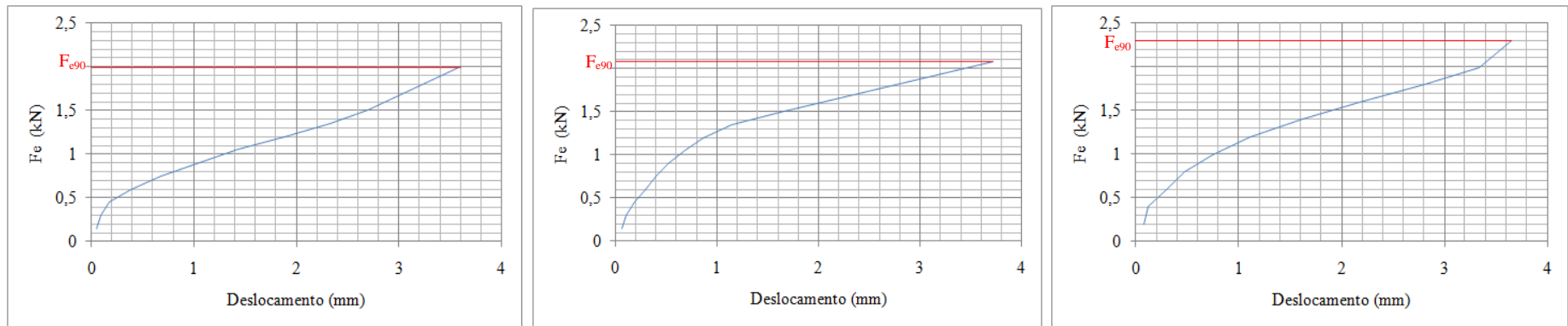


Figura 56: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

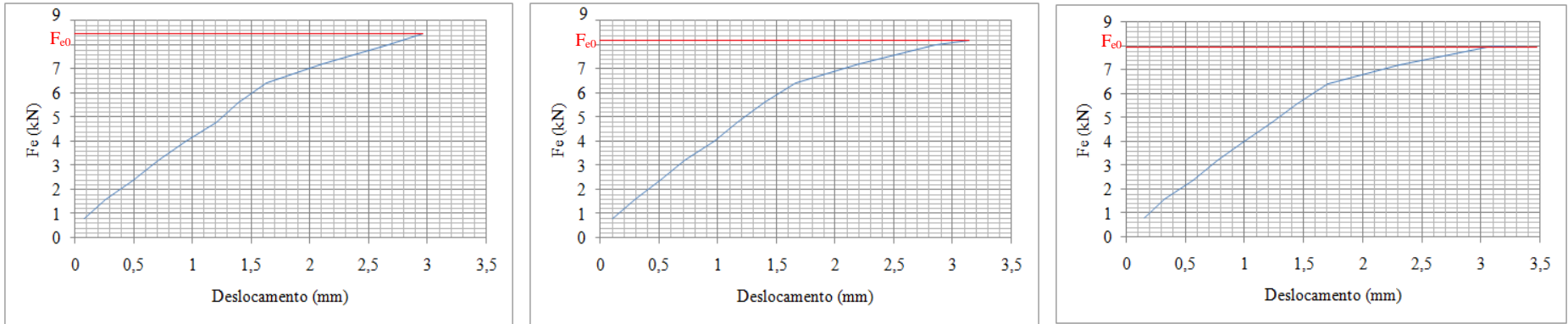


Figura 57: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 12$ mm.

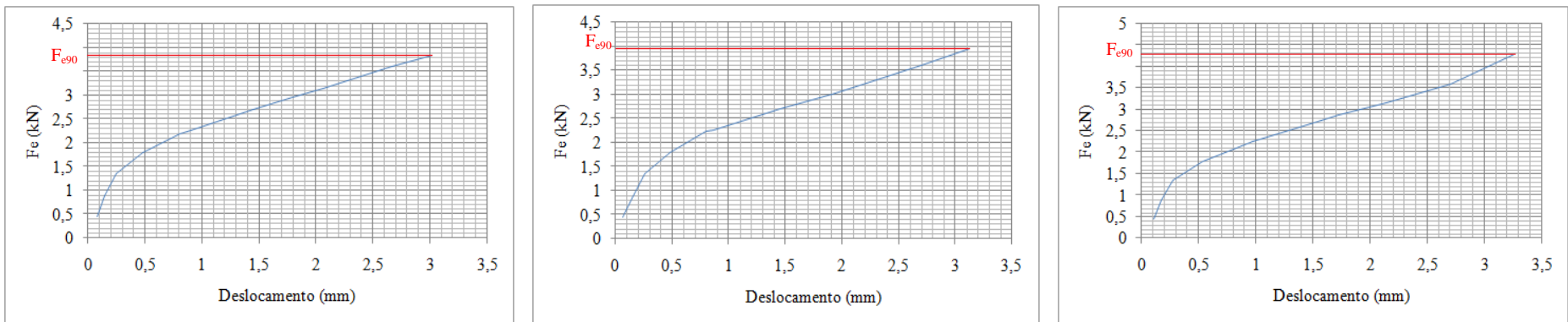


Figura 58: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 12$ mm.

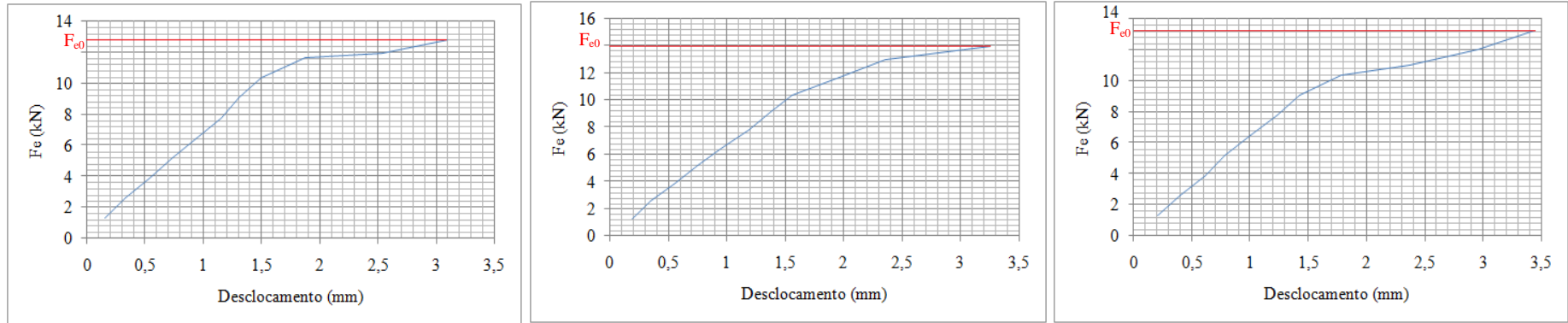


Figura 59: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 16$ mm.

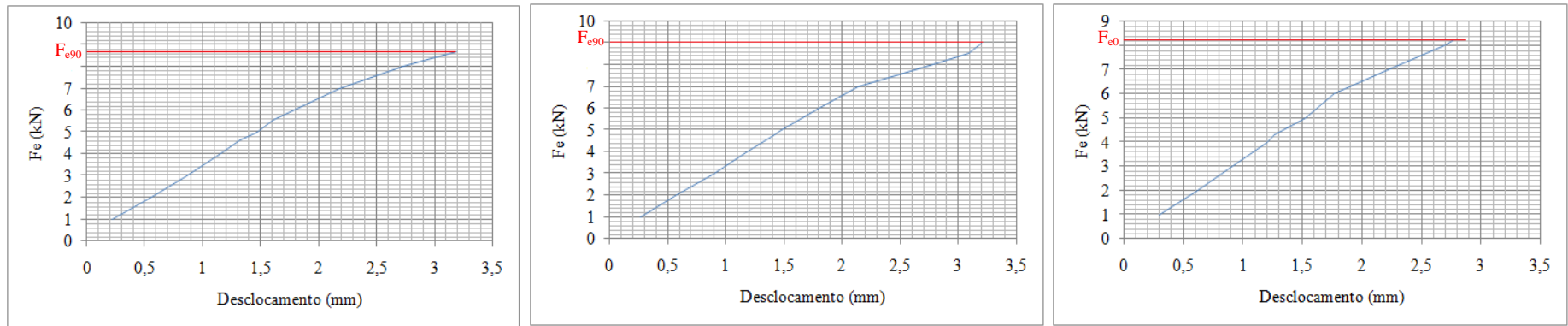


Figura 60: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Paricá; $d = 16$ mm.

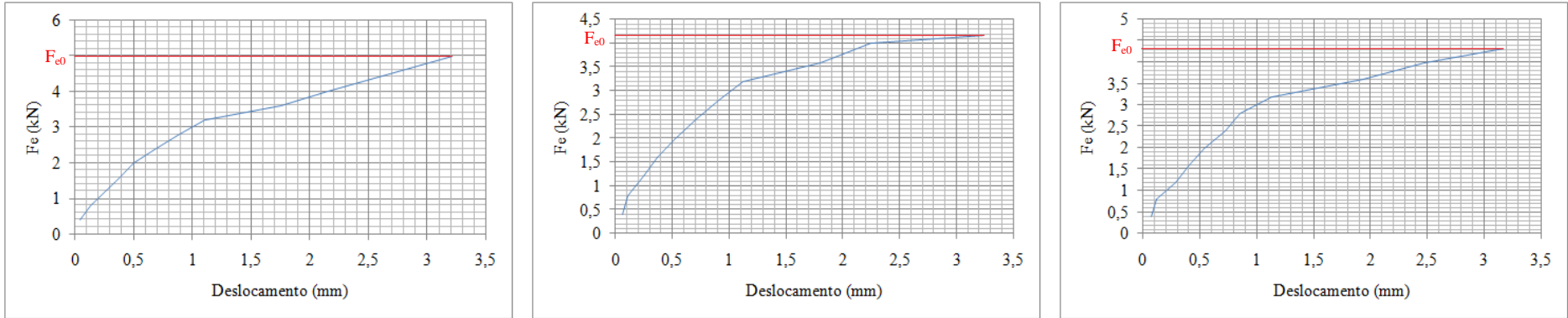


Figura 61: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.

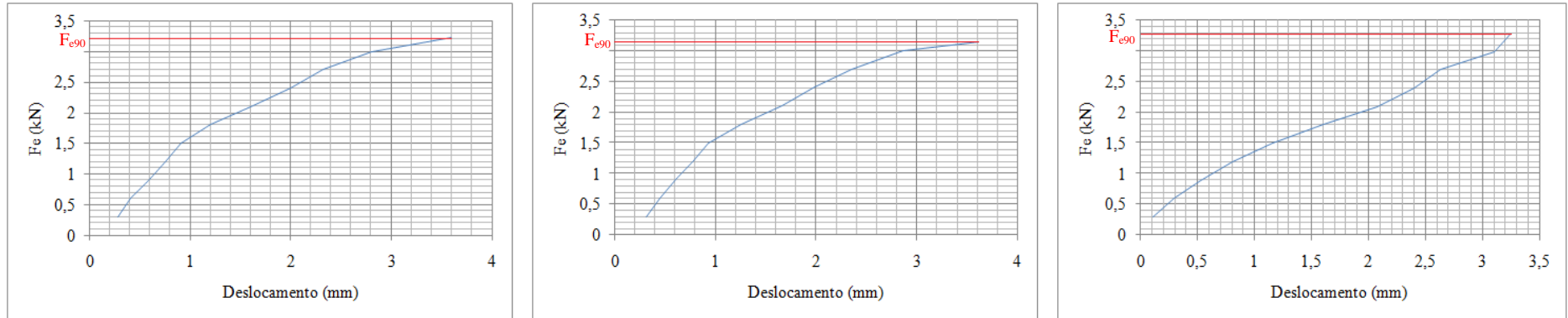


Figura 62: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.

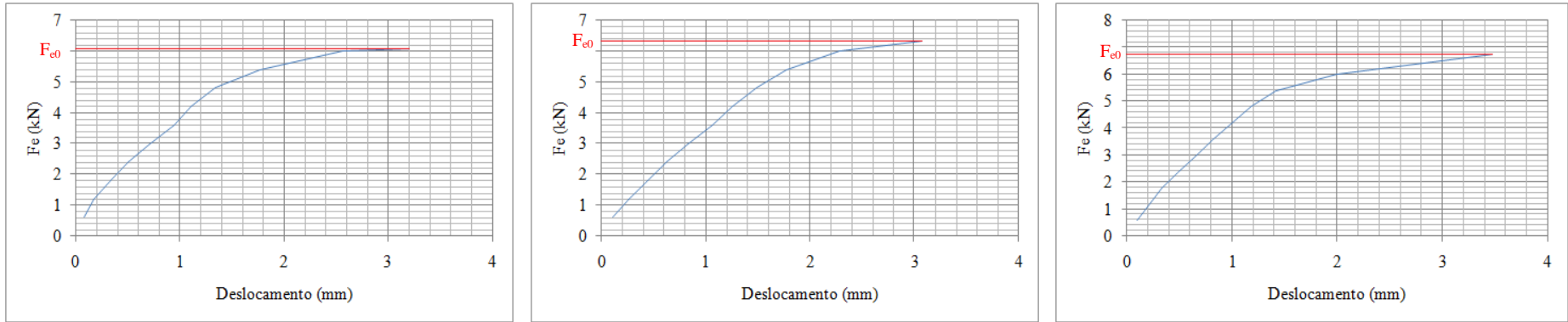


Figura 63: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.

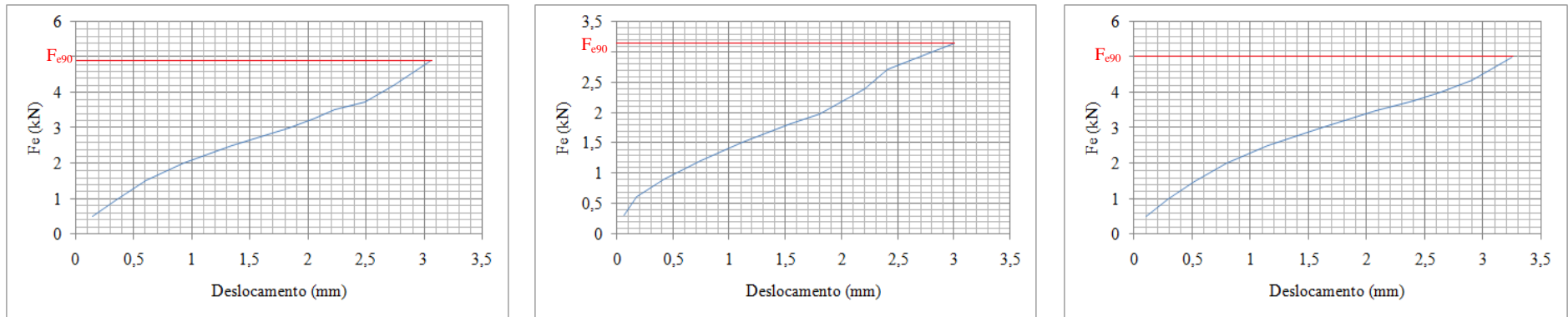


Figura 64: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.

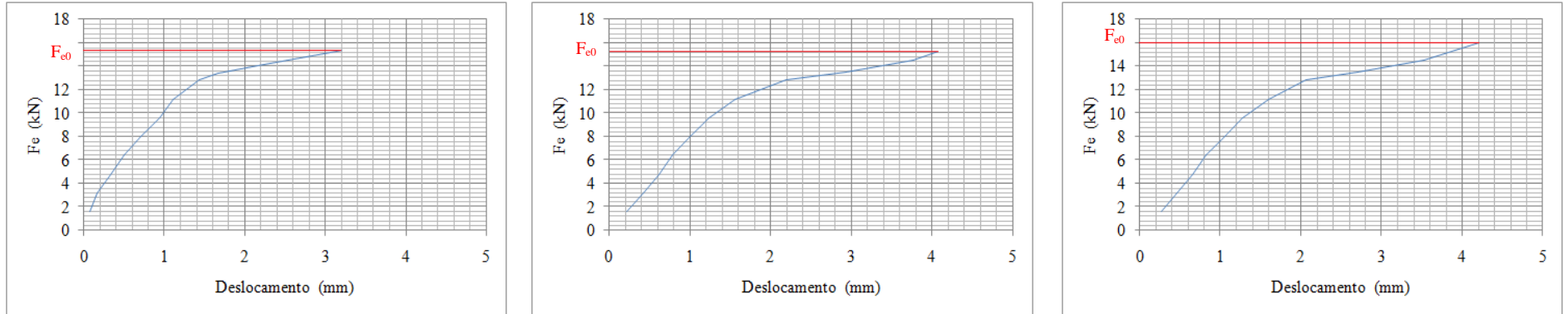


Figura 65: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.

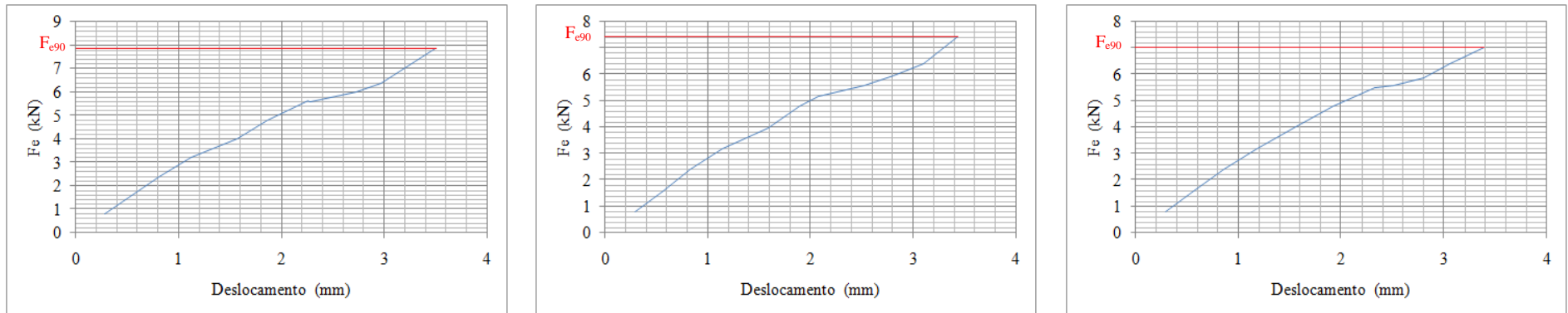


Figura 66: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.

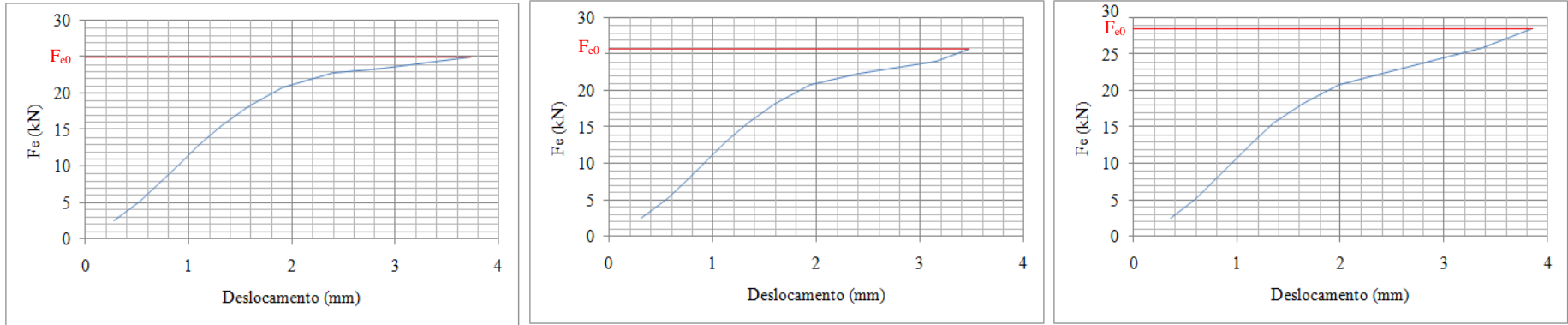


Figura 67: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; d = 16 mm.

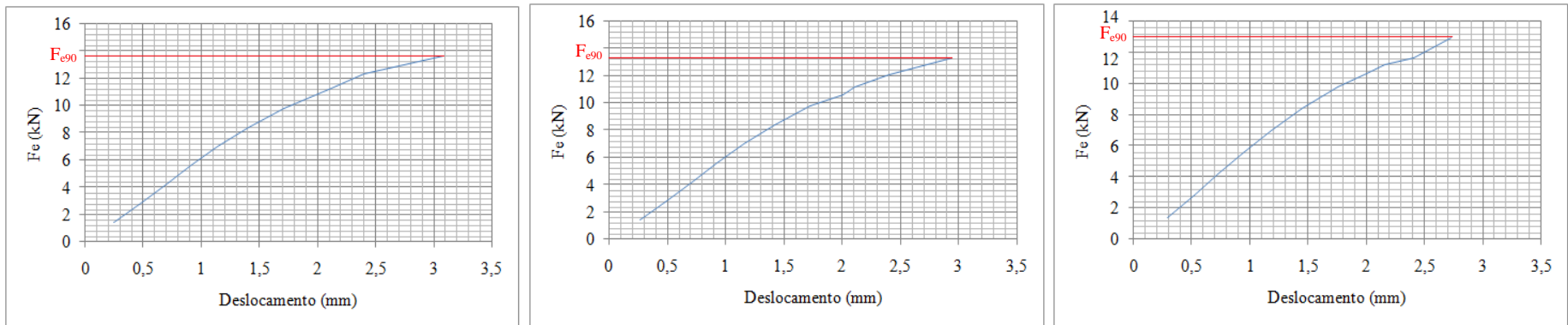


Figura 68: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus elliottii; d = 16 mm.

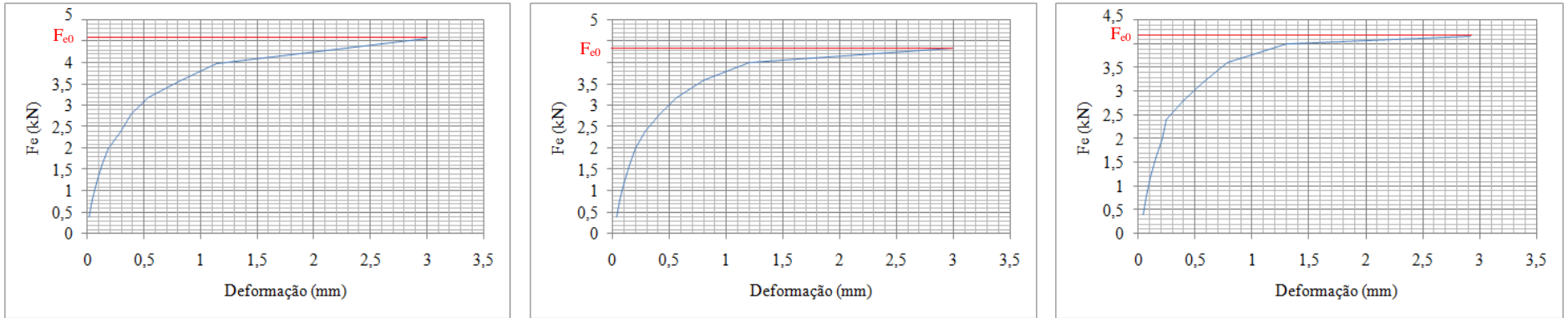


Figura 69: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.

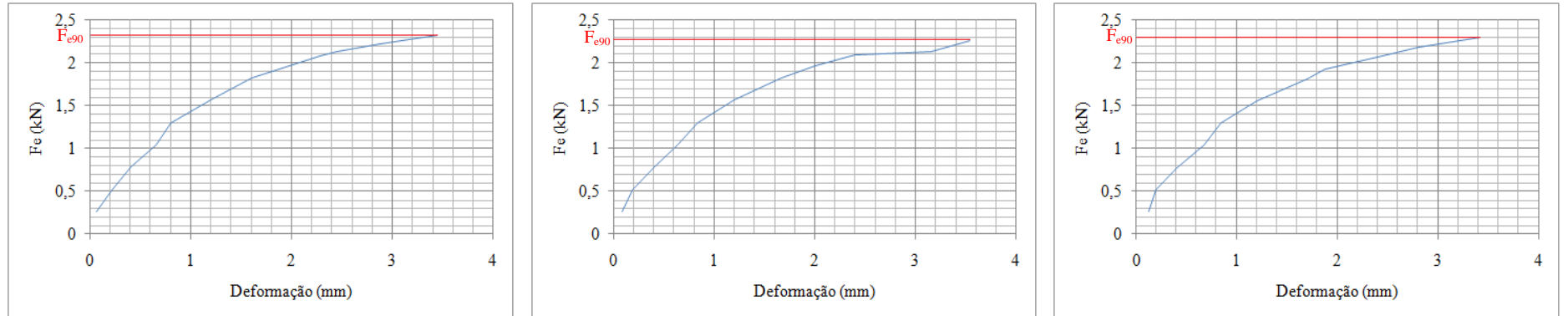


Figura 70: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.

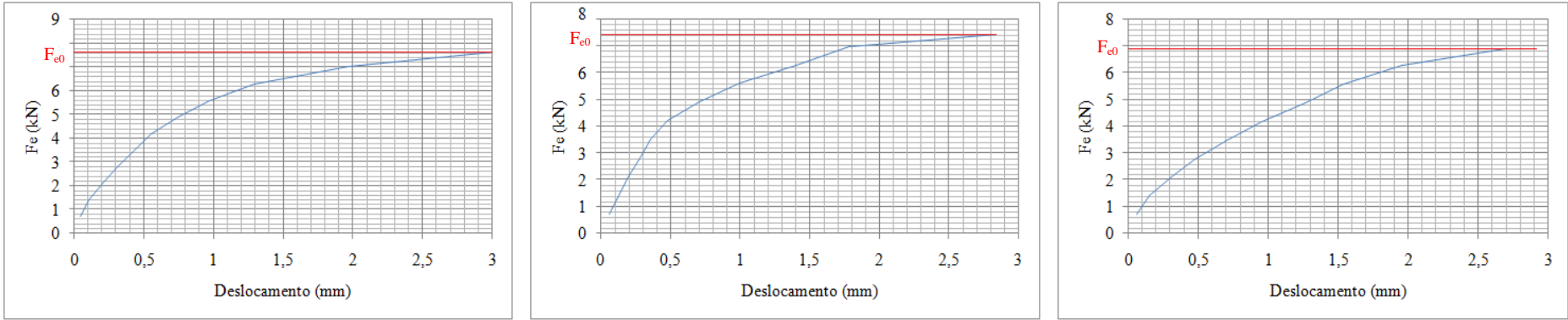


Figura 71: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.

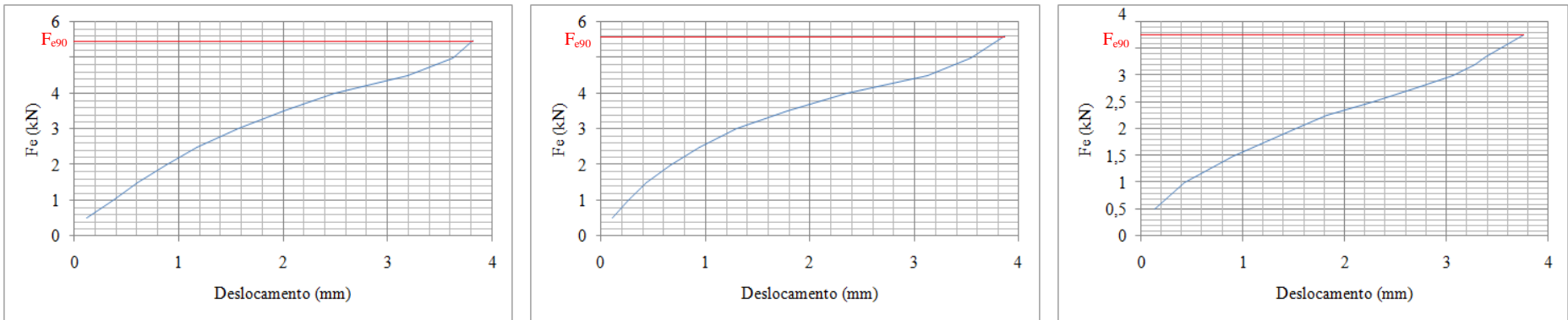


Figura 72: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.

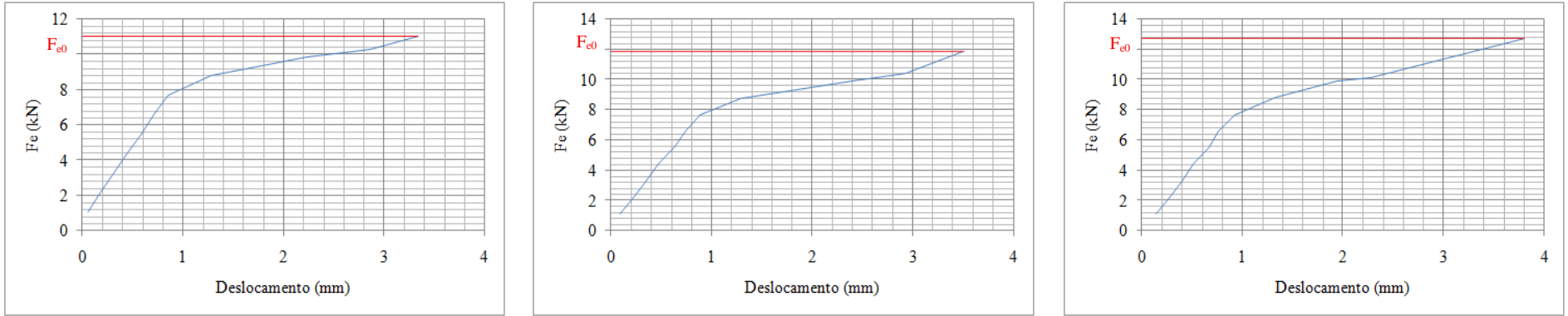


Figura 73: Determinação de F_{c0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.

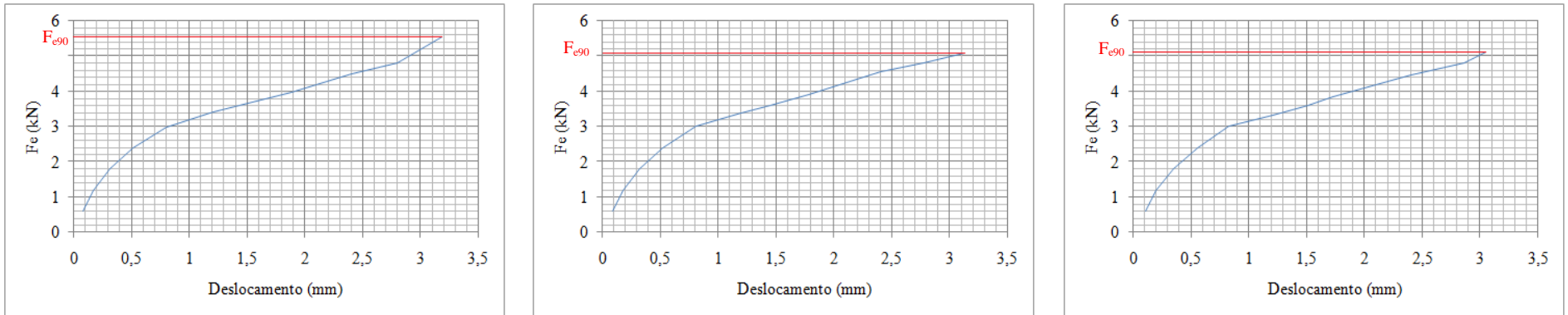


Figura 74: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.

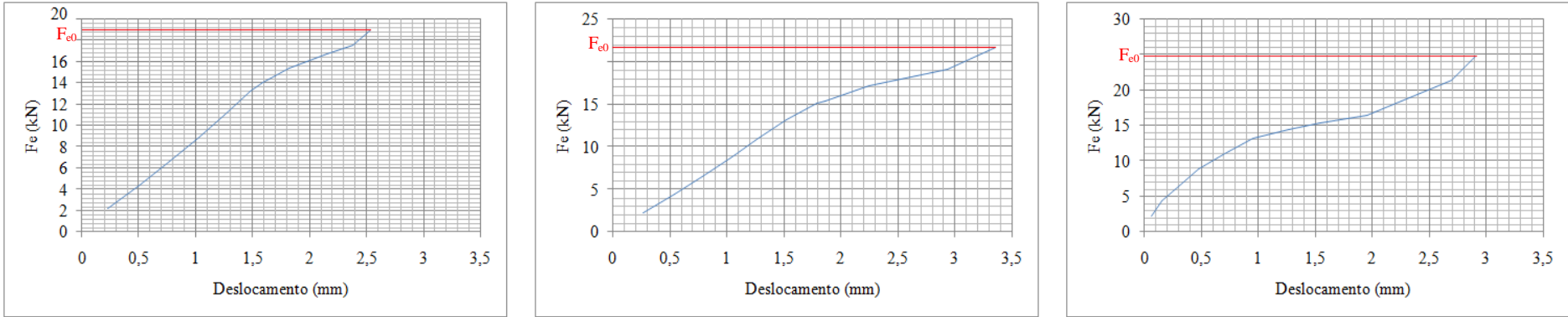


Figura 75: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 16$ mm.

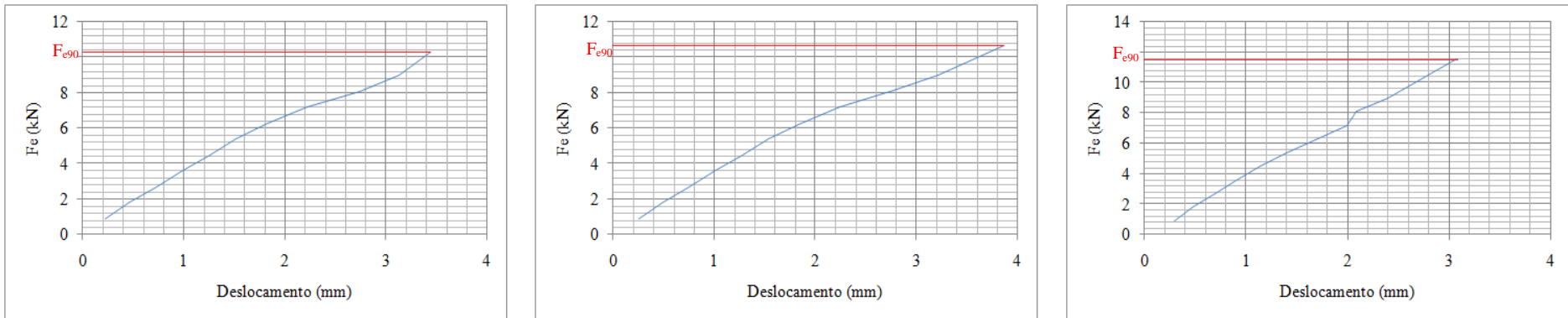


Figura 76: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Pinus oocarpa; $d = 16$ mm.

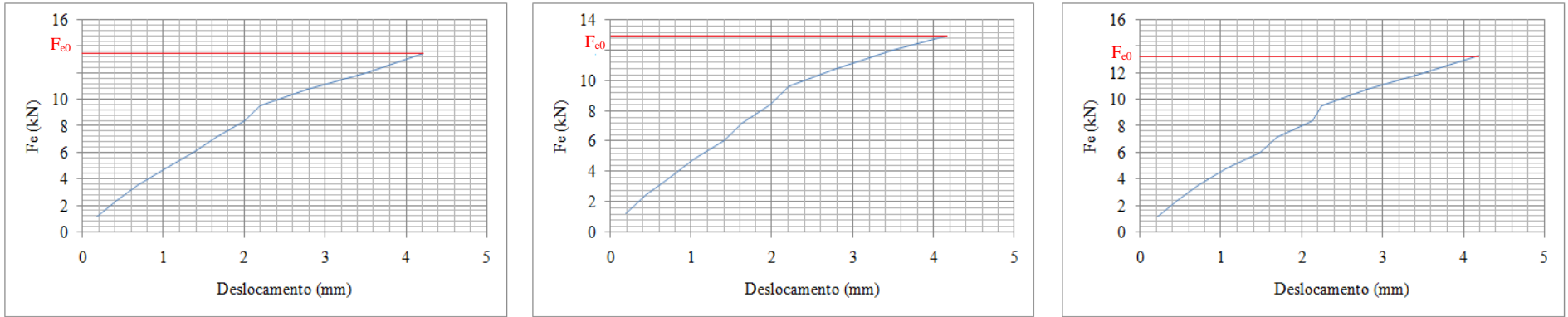


Figura 77: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.

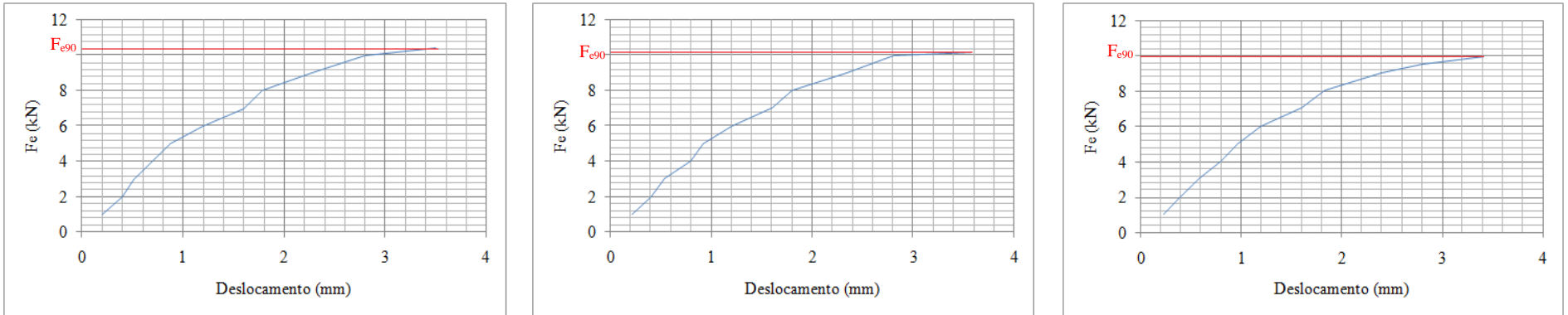


Figura 78: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.

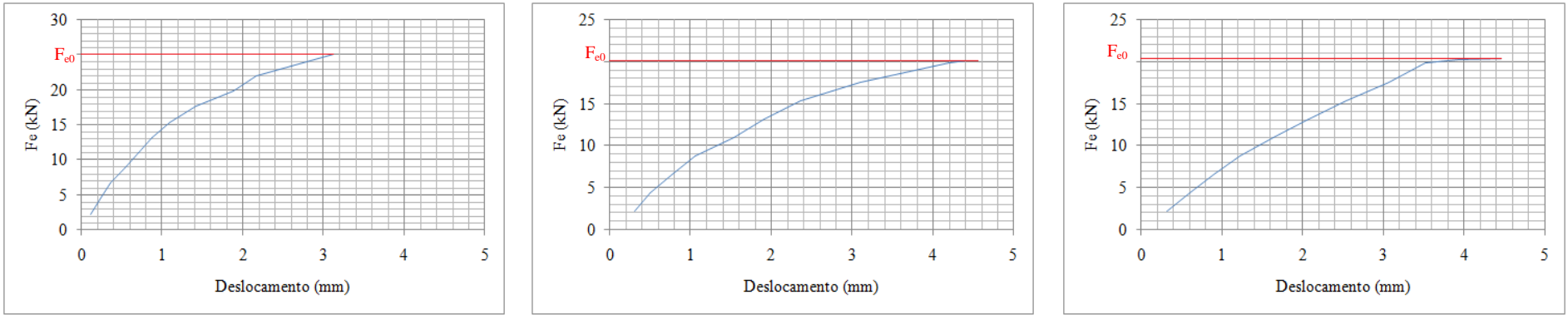


Figura 79: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.

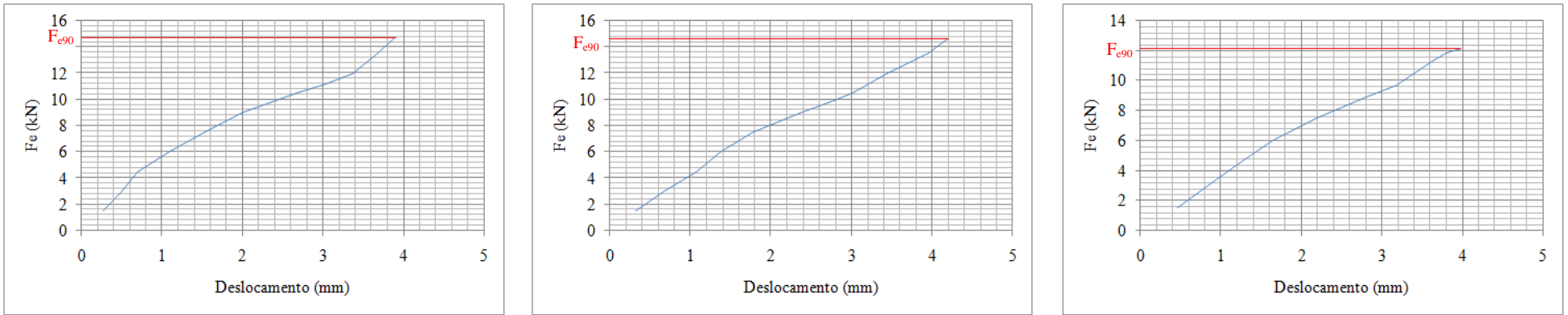


Figura 80: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.

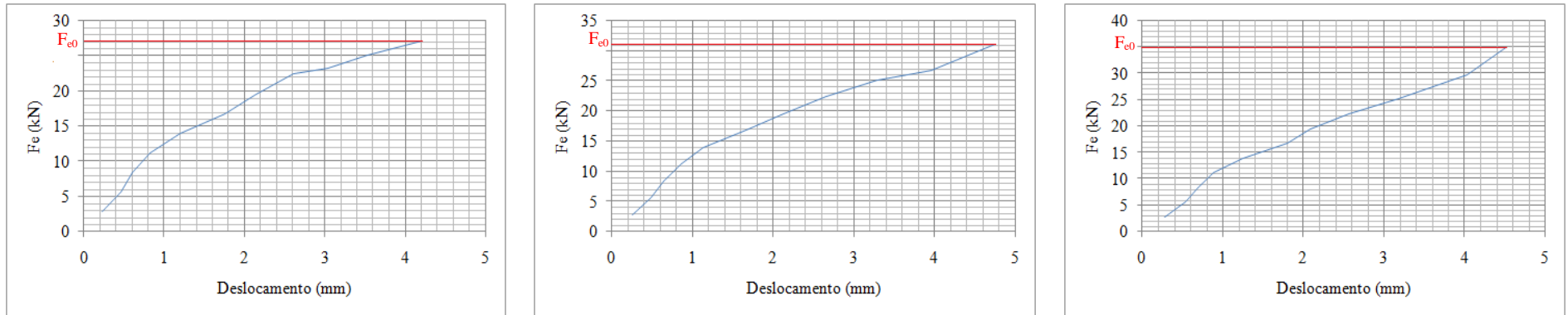


Figura 81: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.

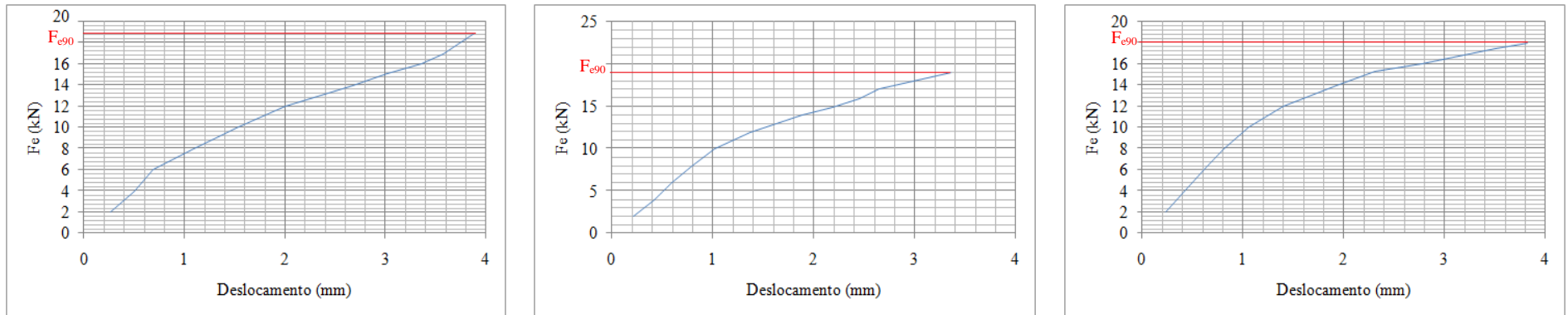


Figura 82: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.

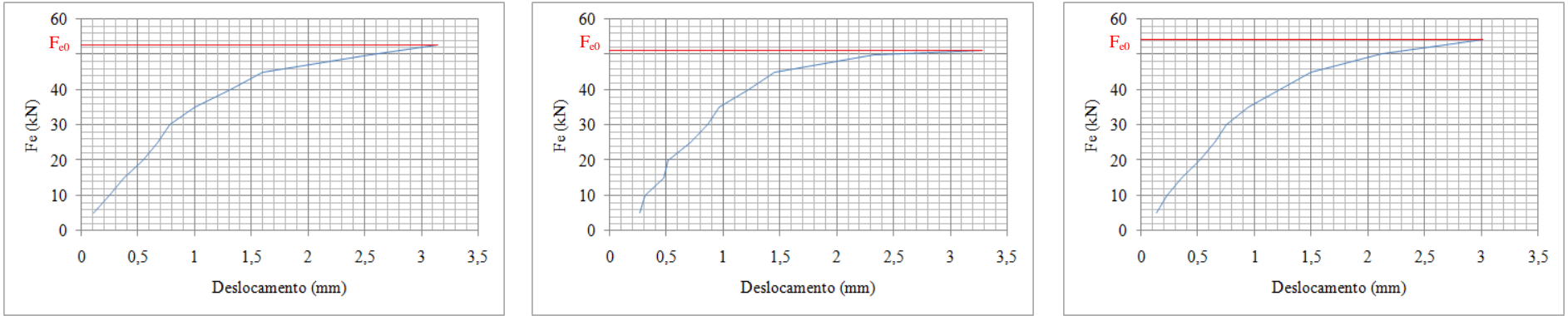


Figura 83: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.

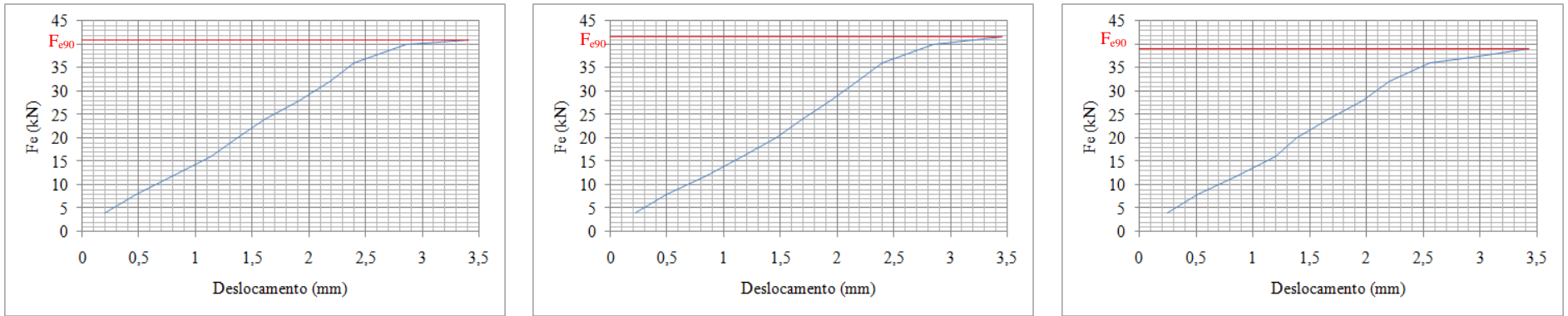


Figura 84: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.

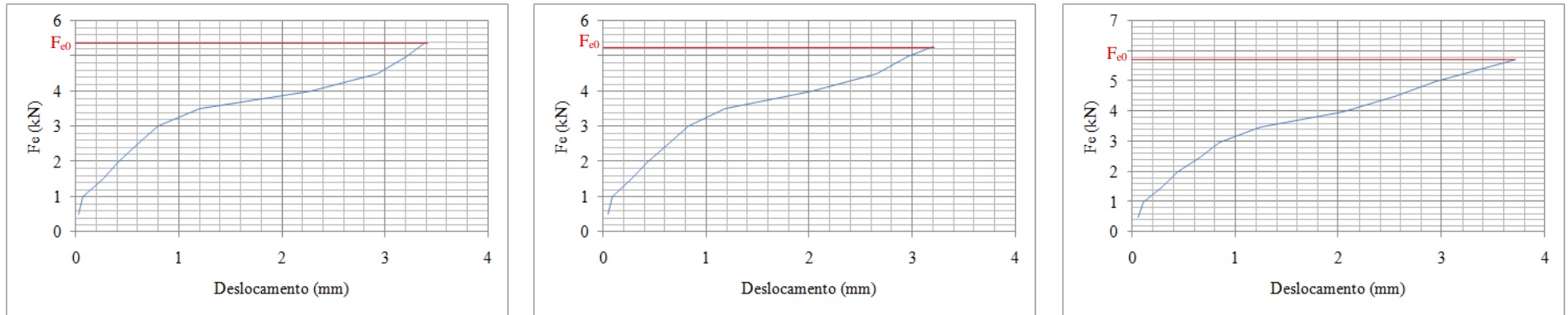


Figura 85: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 8$ mm.

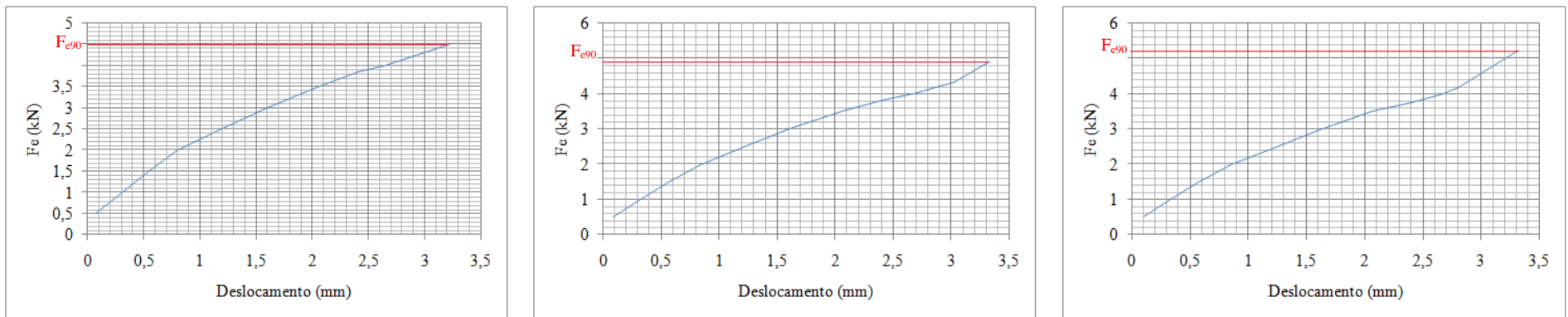


Figura 86: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 8$ mm.

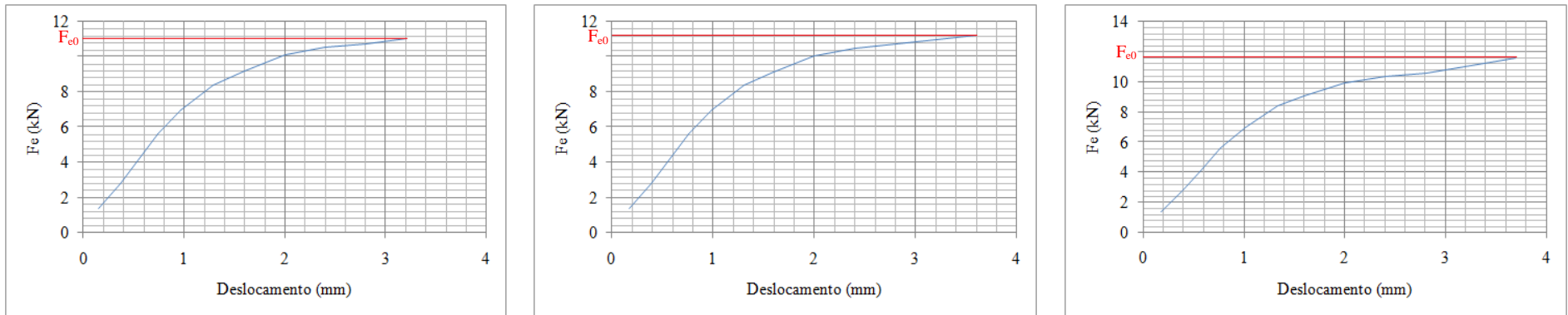


Figura 87: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 10$ mm.

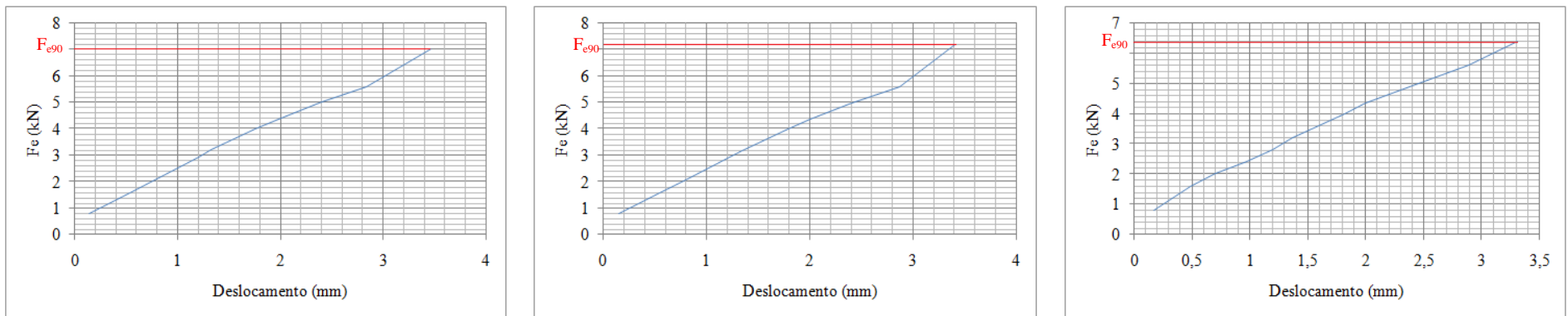


Figura 88: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 10$ mm.

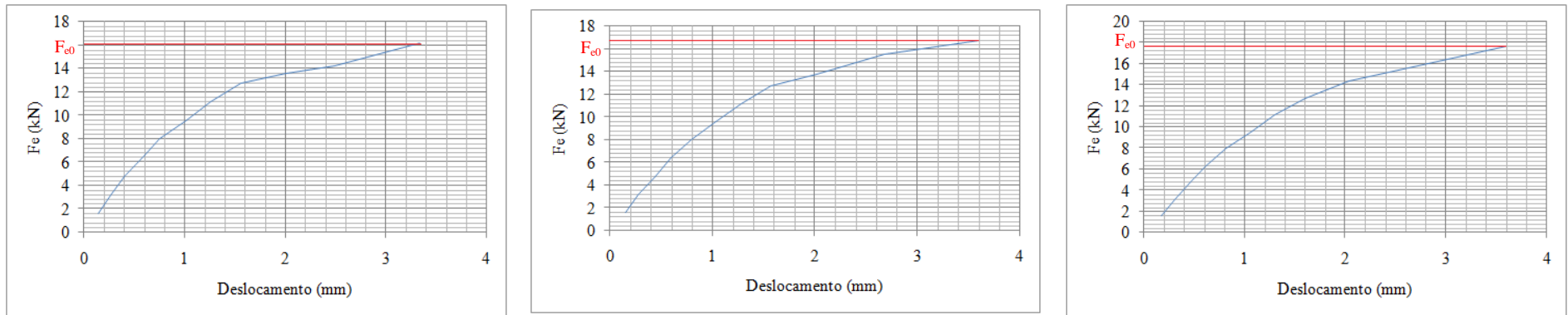


Figura 89: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 12$ mm.

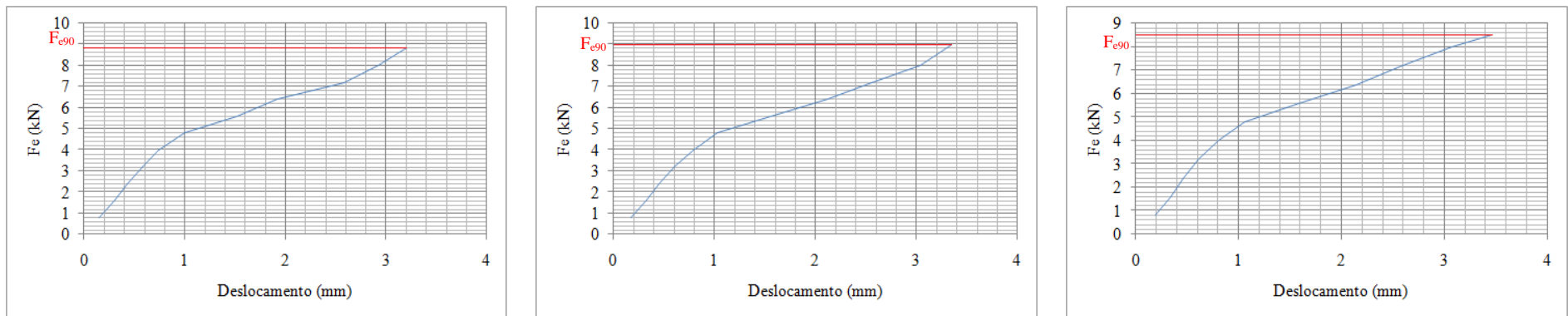


Figura 90: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 12$ mm.

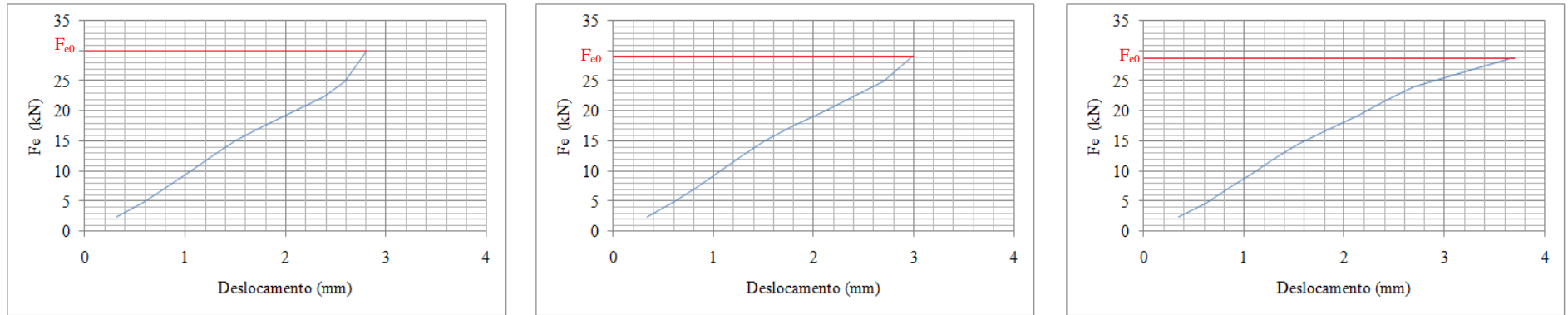


Figura 91: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 16$ mm.

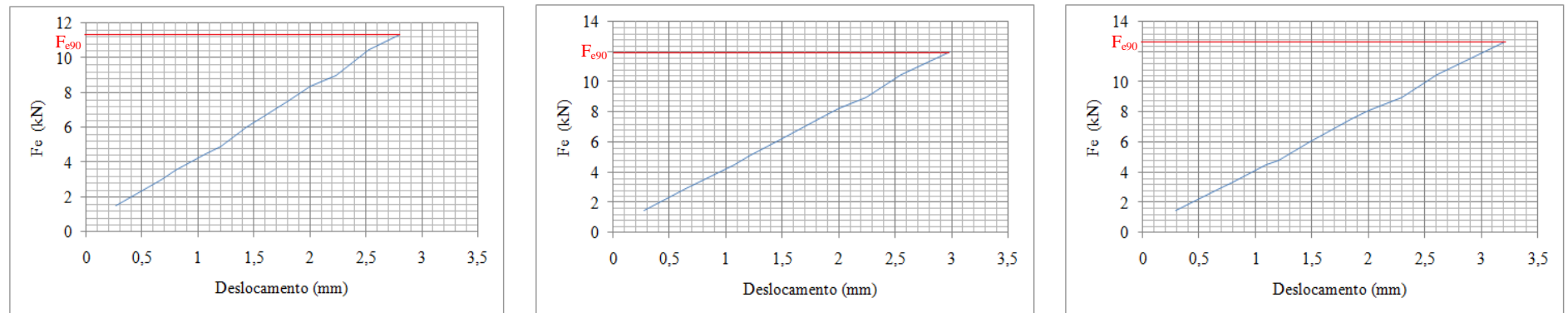


Figura 92: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Lyptus; $d = 16$ mm.

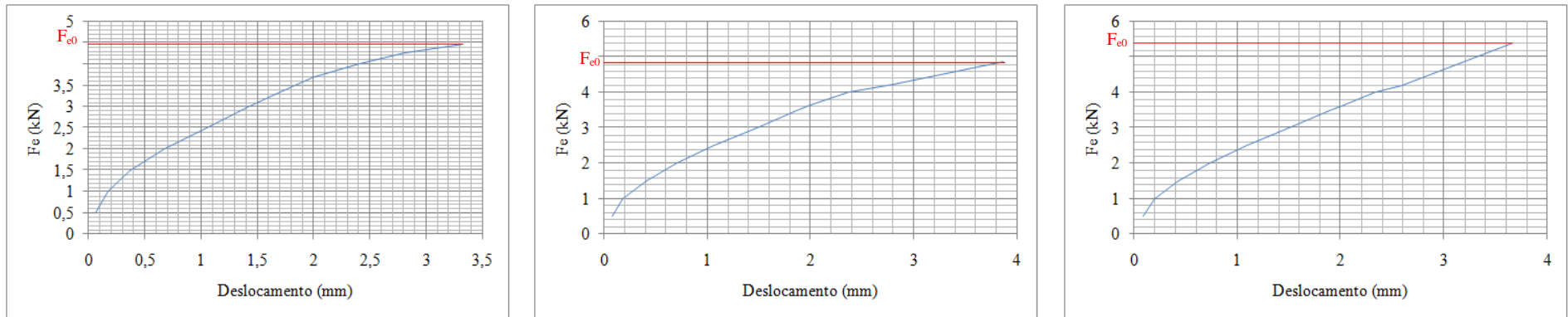


Figura 93: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 8$ mm.

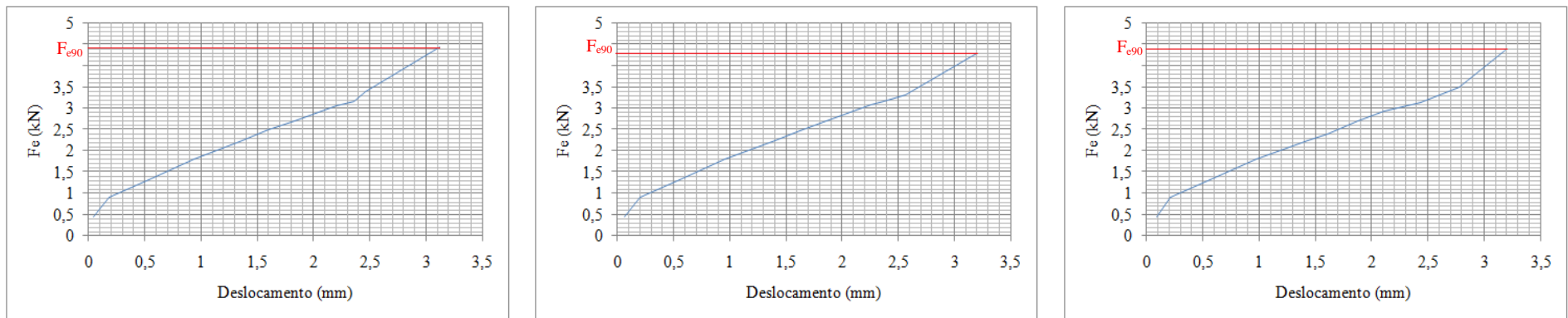


Figura 94: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 8$ mm.

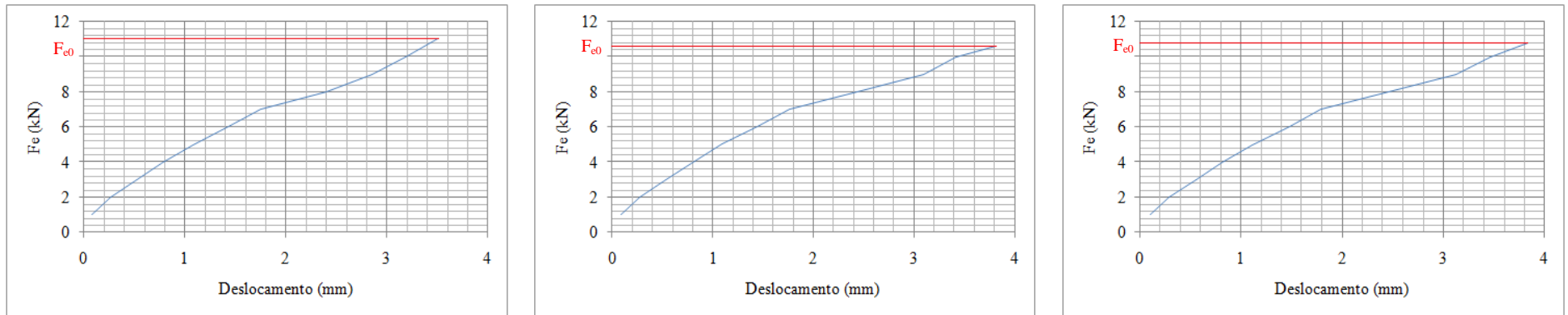


Figura 95: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 10$ mm.

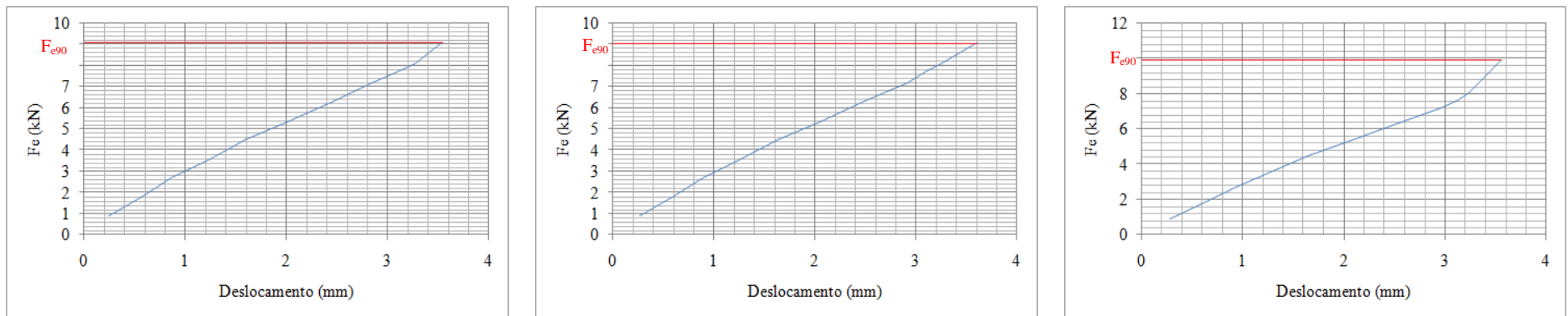


Figura 96: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 10$ mm.

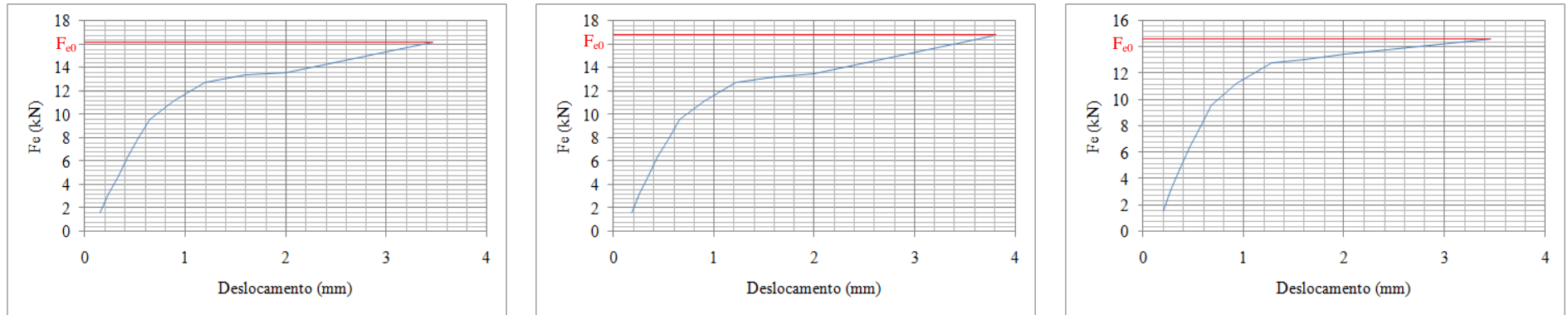


Figura 97: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.

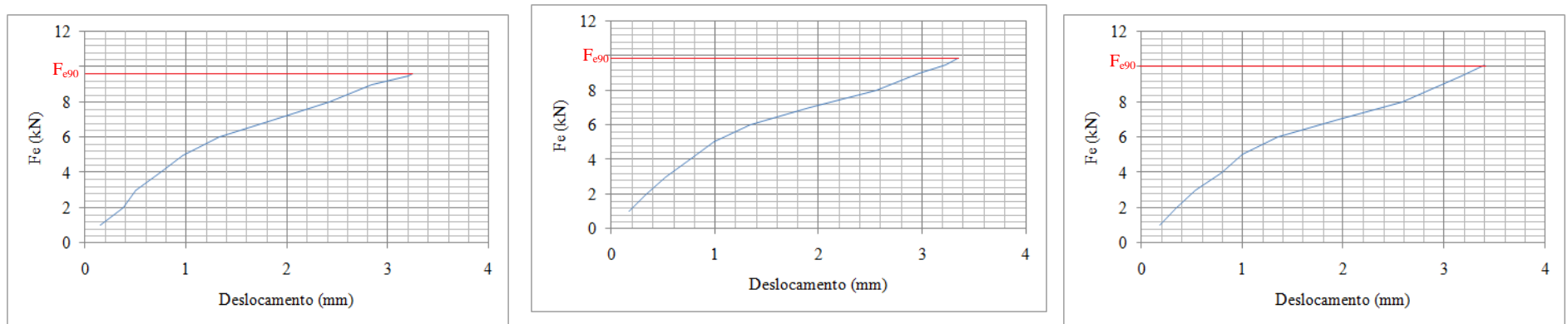


Figura 98: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.

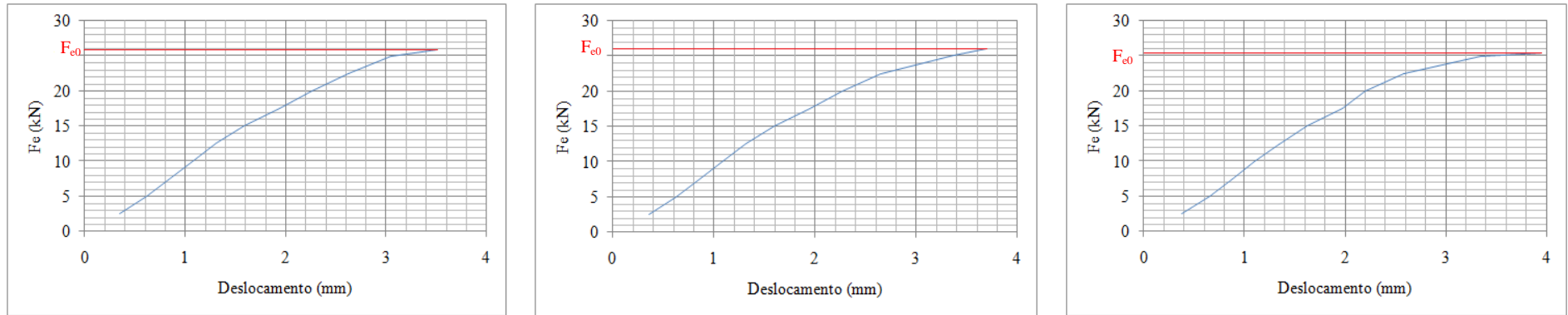


Figura 99: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 16$ mm.

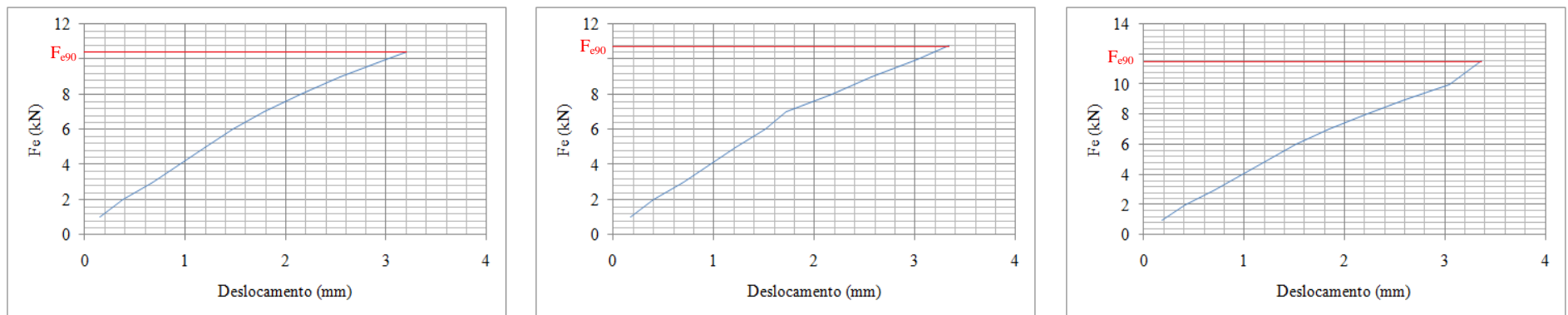


Figura 100: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cupiúba; $d = 16$ mm.

APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE ACORDO COM A ASTM D5764:2007

As Figuras 101 até 148 apresentam os gráficos provenientes dos ensaios para determinação da força de embutimento para cada um dos corpos de prova utilizados na pesquisa de acordo com o método da ABNT NBR 7190:1997.

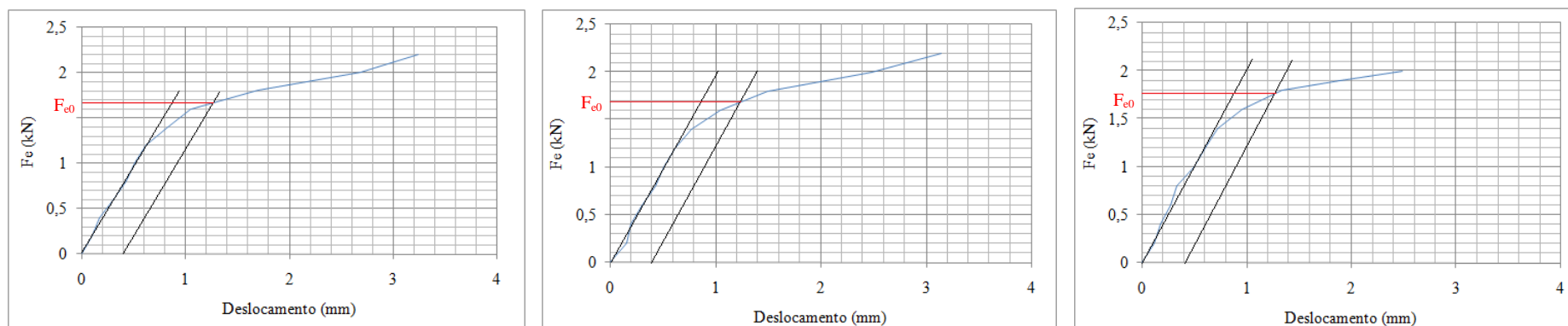


Figura 101: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 8$ mm.

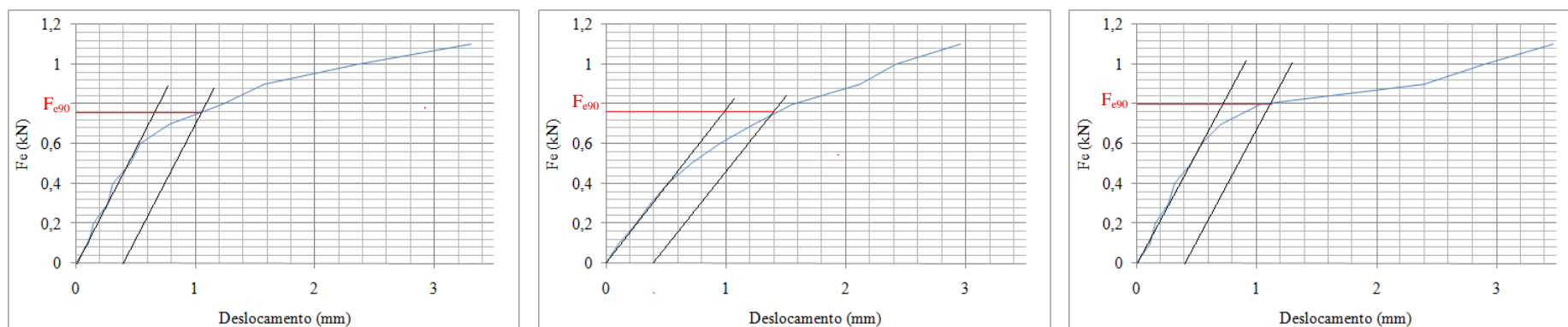


Figura 102: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 8$ mm.

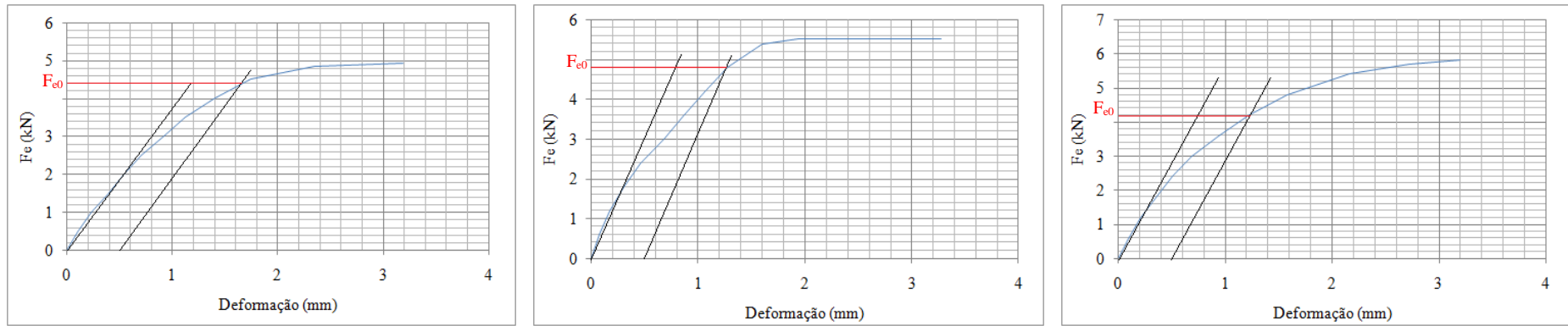


Figura 103: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

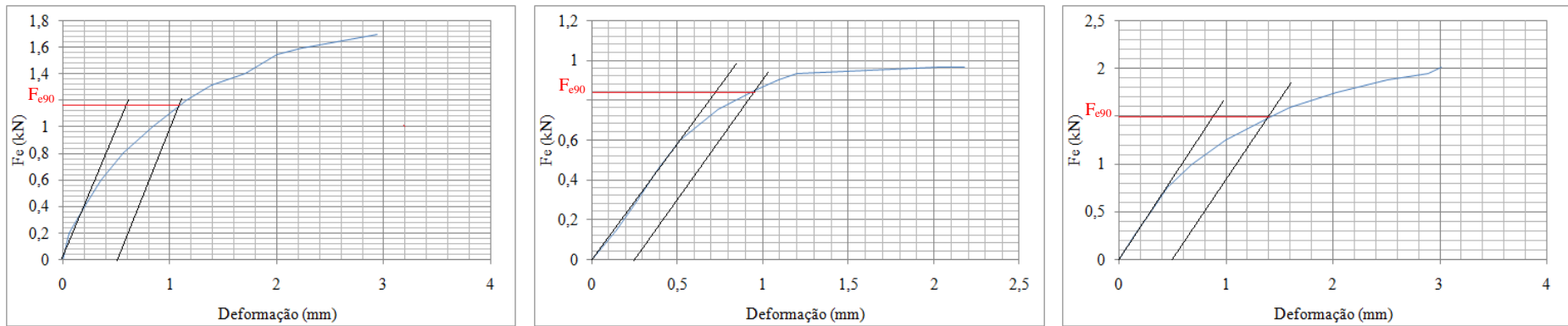


Figura 104: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 10$ mm.

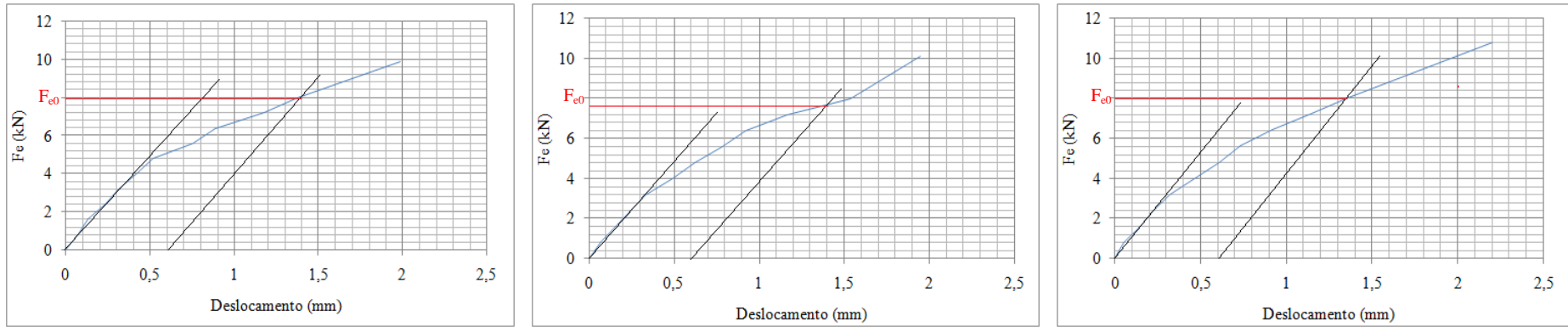


Figura 105: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 12$ mm.

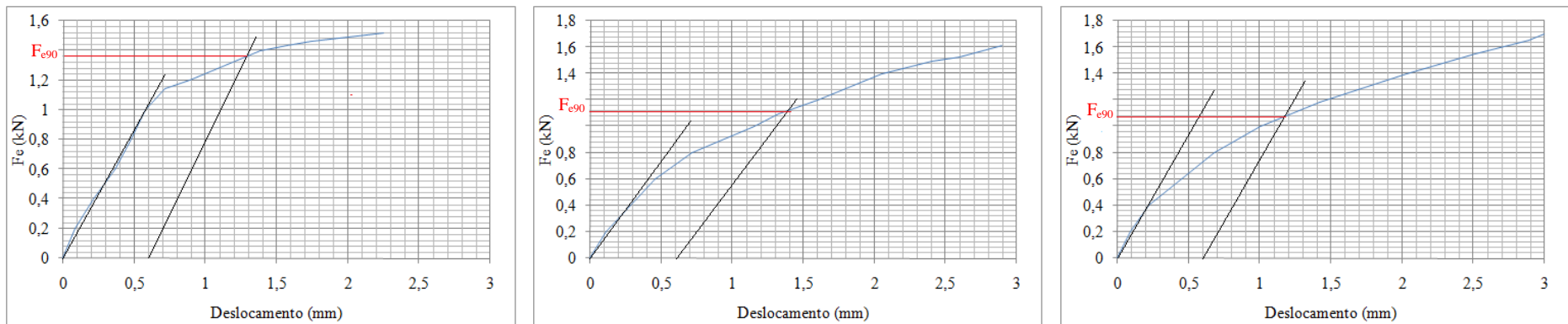


Figura 106: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 12$ mm.

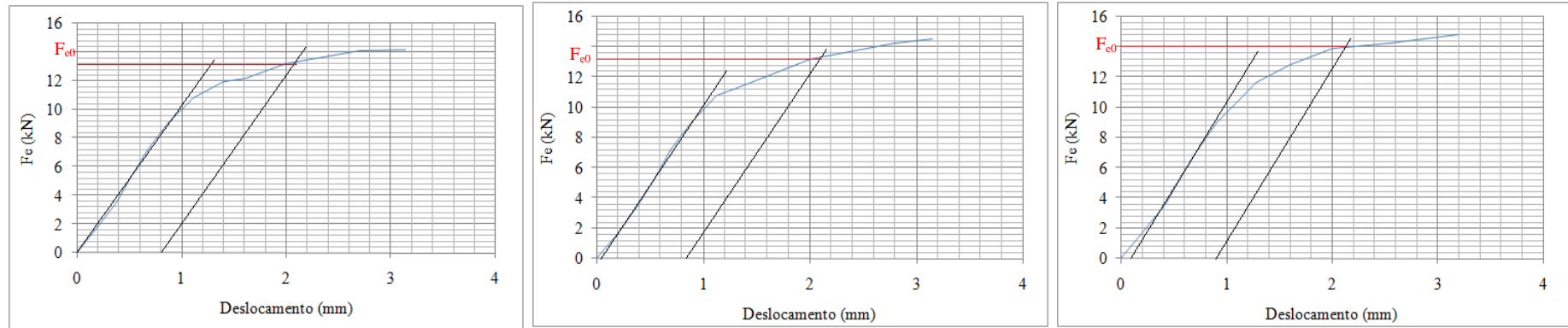


Figura 107: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 16$ mm.

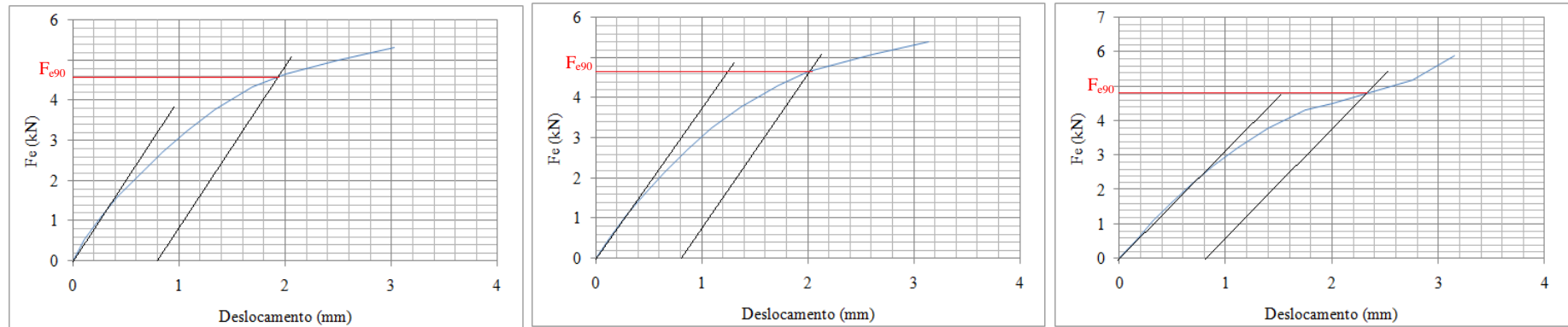


Figura 108: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Paricá; $d = 16$ mm.

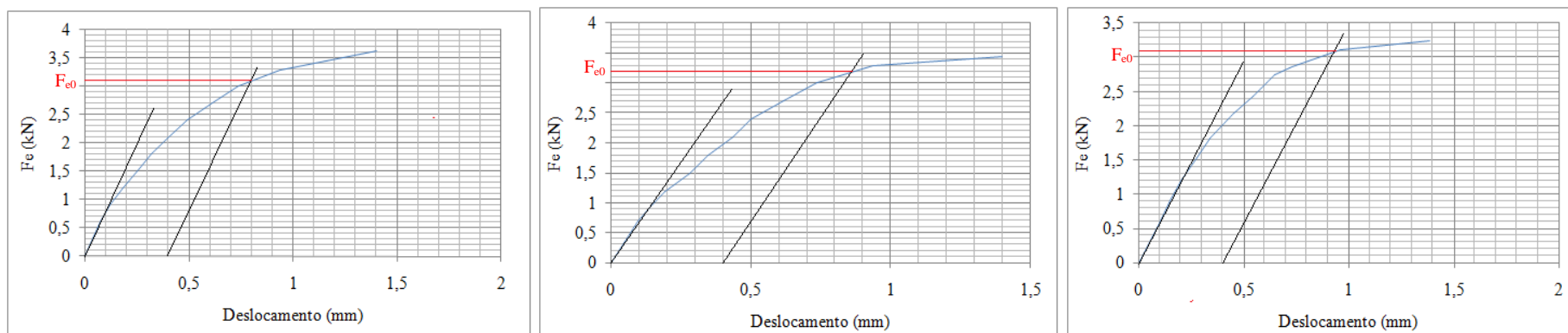


Figura 109: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.

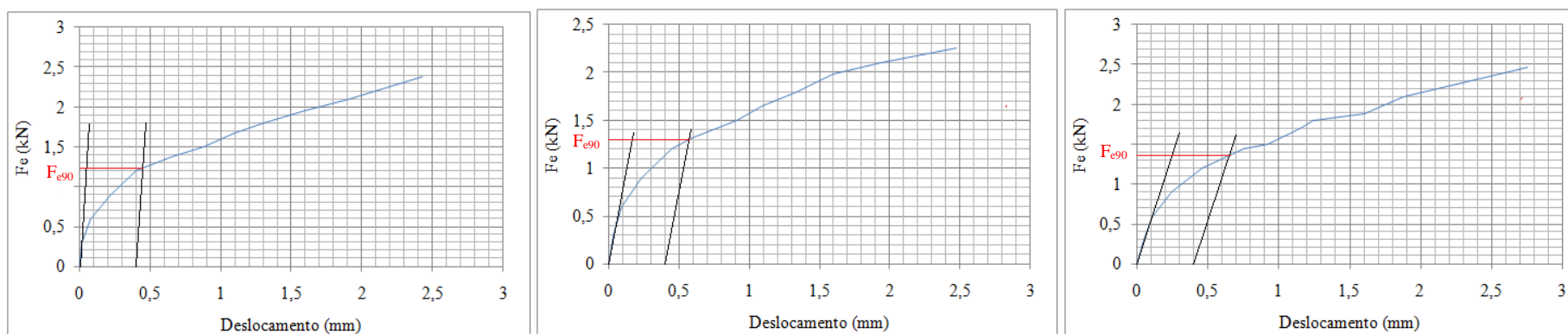


Figura 110: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 8$ mm.

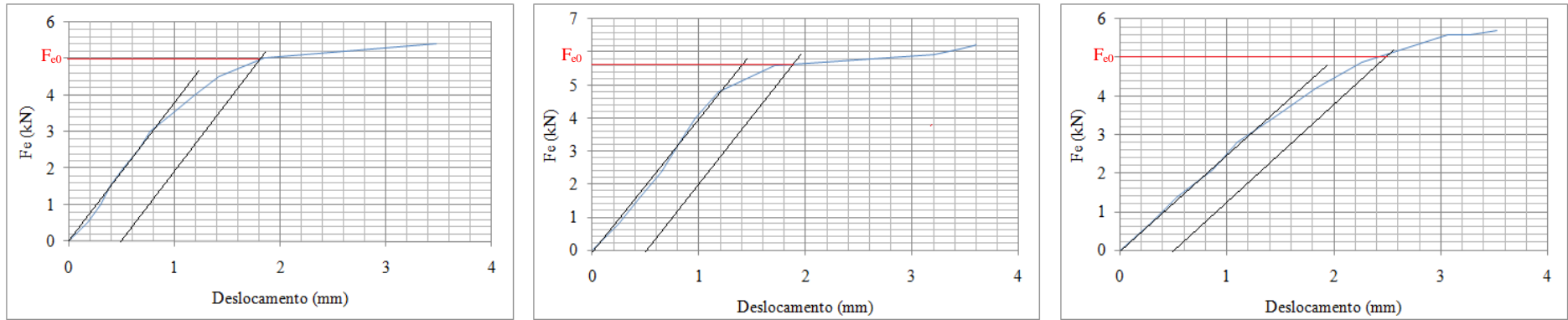


Figura 111: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.

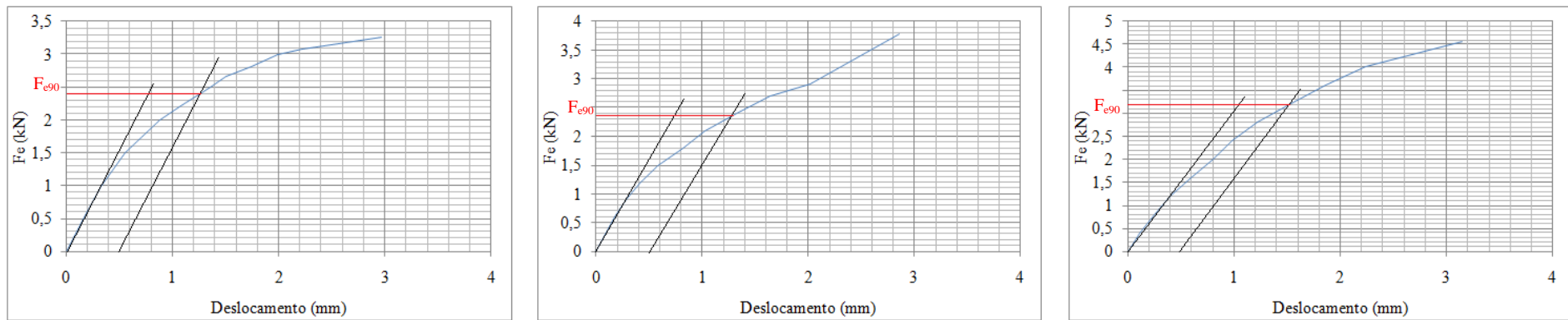


Figura 112: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 10$ mm.

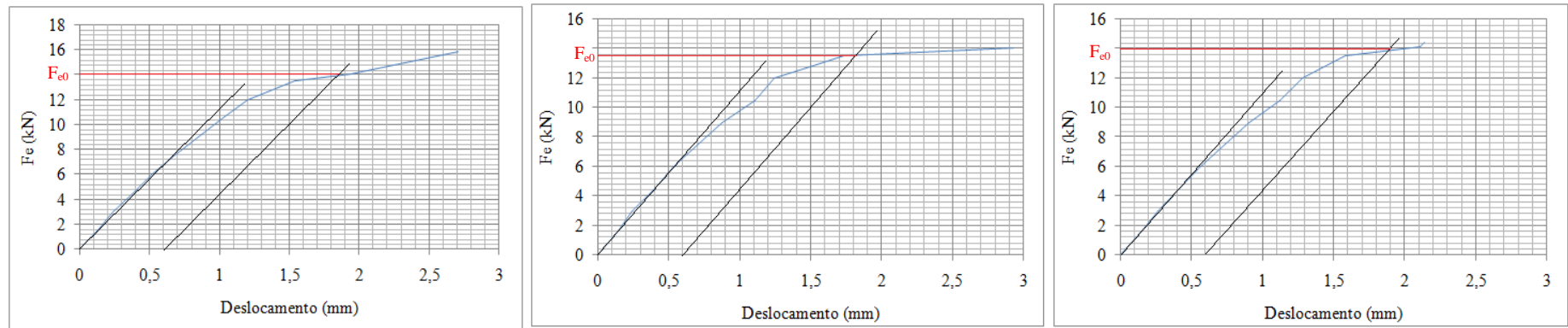


Figura 113: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.

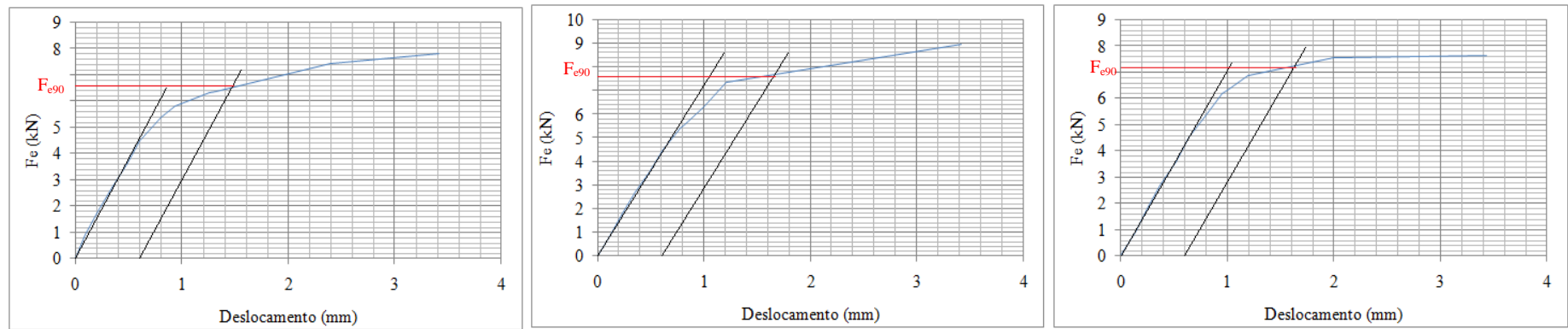


Figura 114: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 12$ mm.

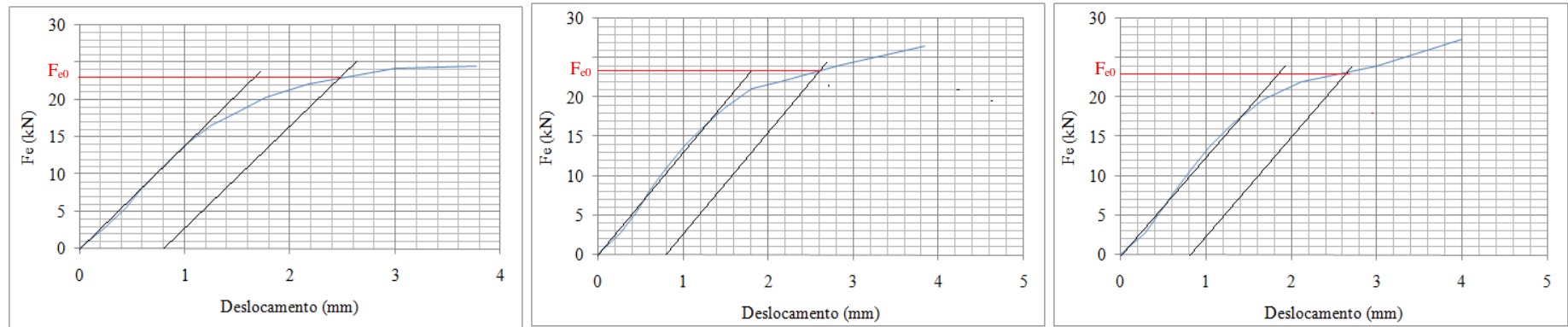


Figura 115: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 16$ mm.

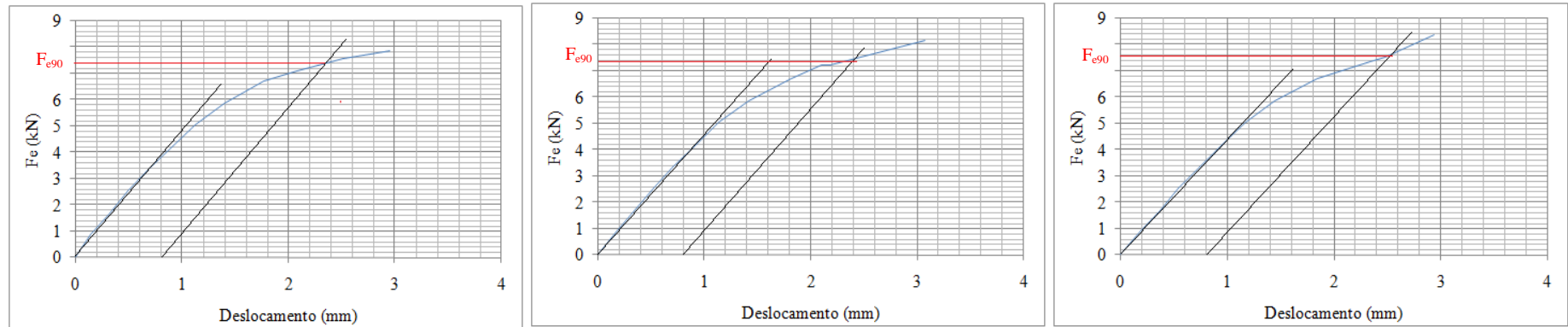


Figura 116: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus elliottii; $d = 16$ mm.

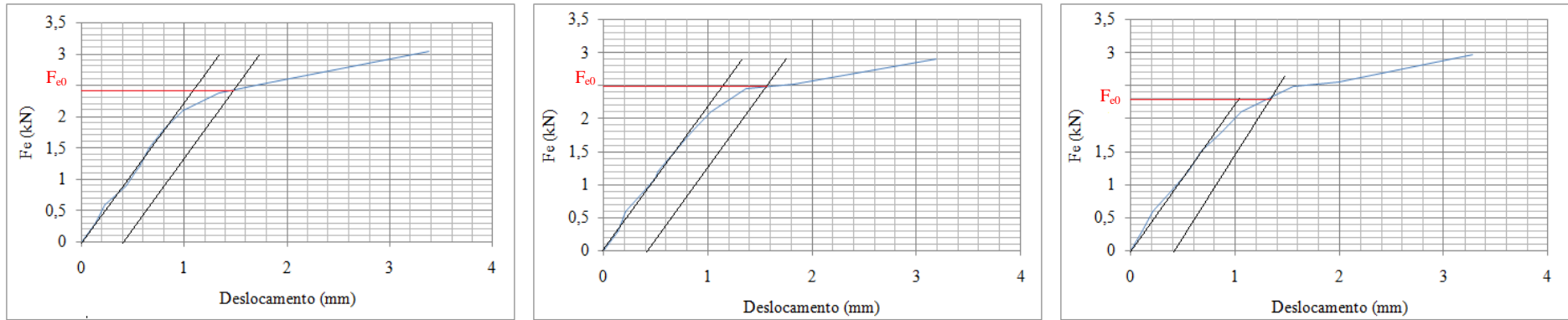


Figura 117: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.

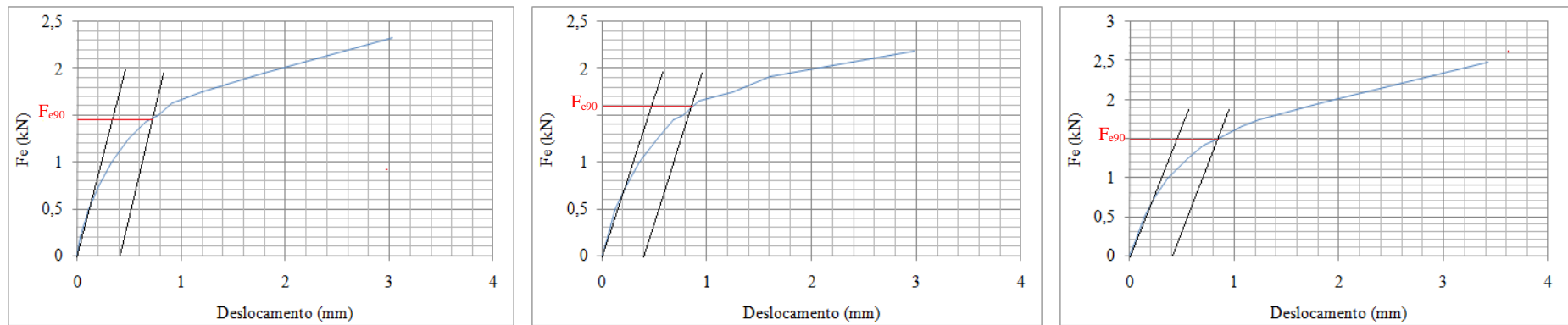


Figura 118: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 8$ mm.

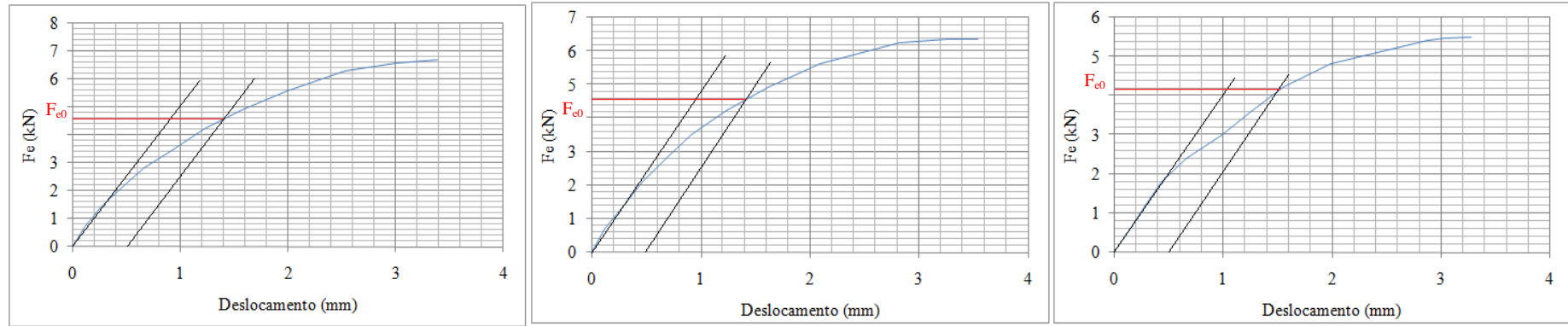


Figura 119: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.

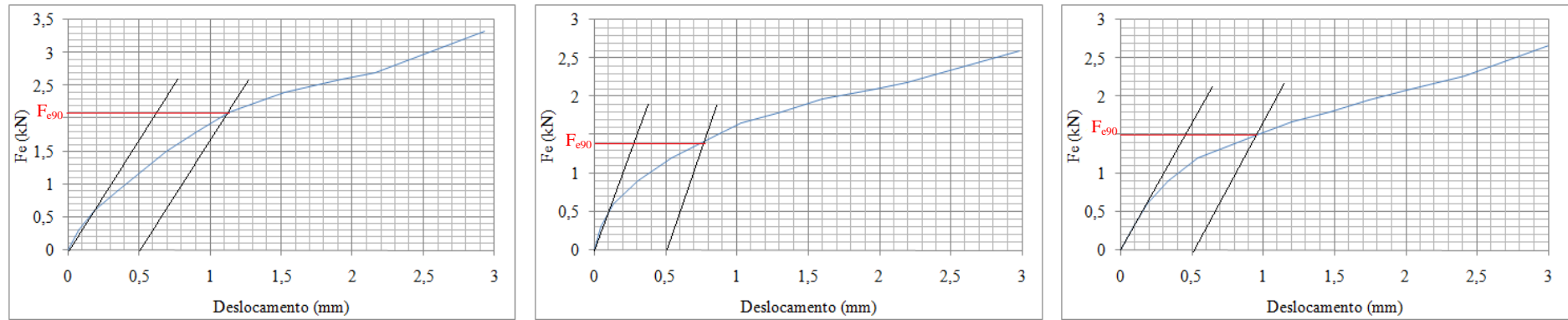


Figura 120: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 10$ mm.

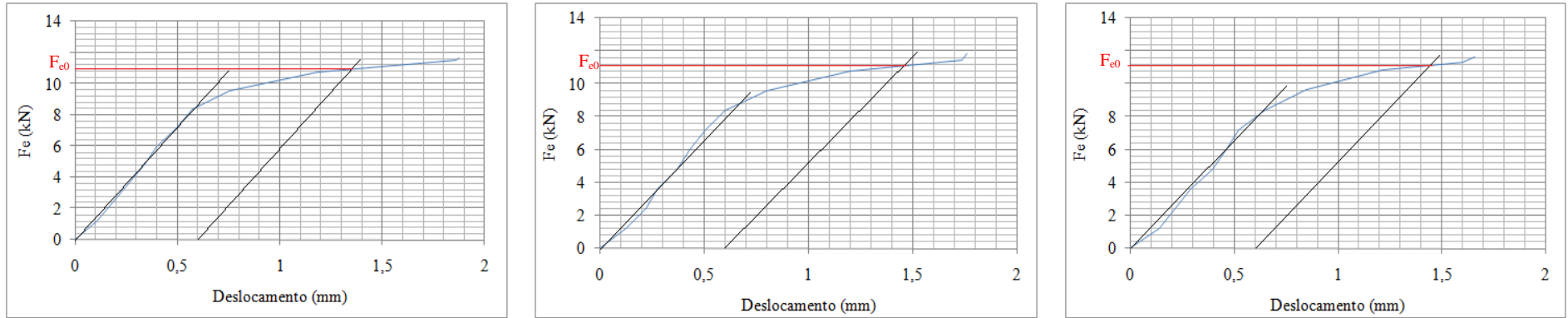


Figura 121: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.

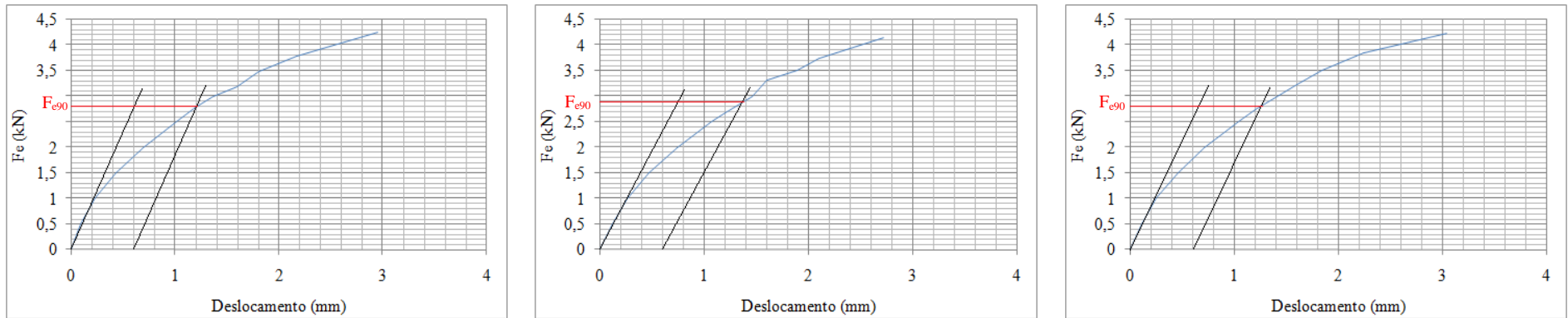


Figura 122: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; $d = 12$ mm.

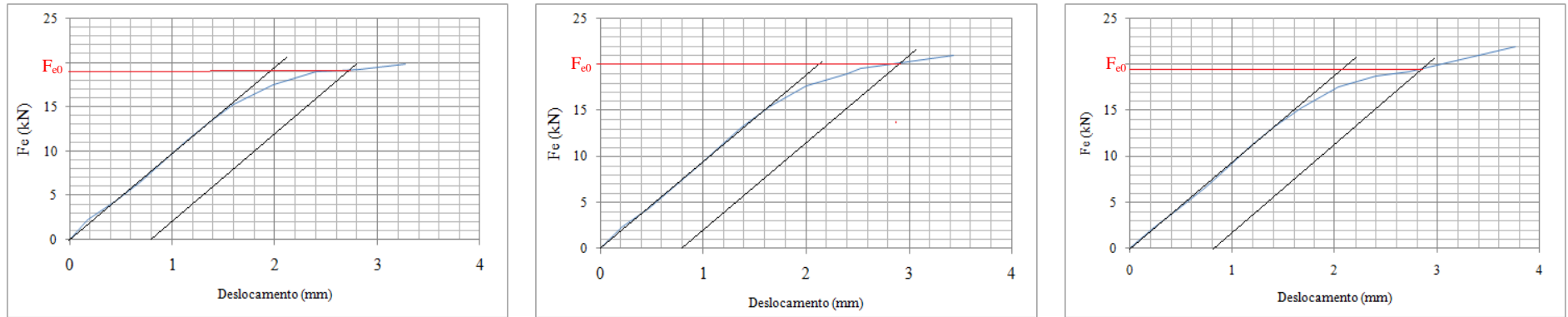


Figura 123: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 16 mm.

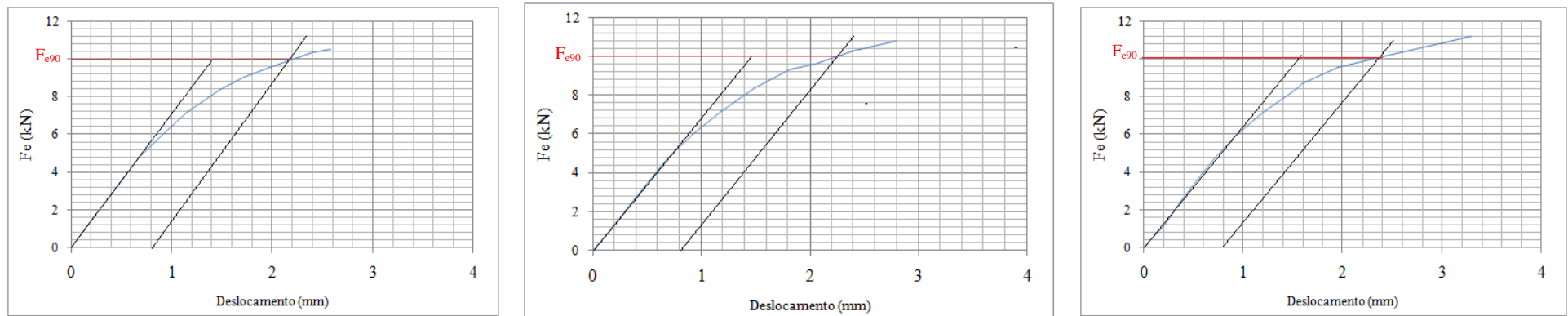


Figura 124: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Pinus oocarpa; d = 16 mm.

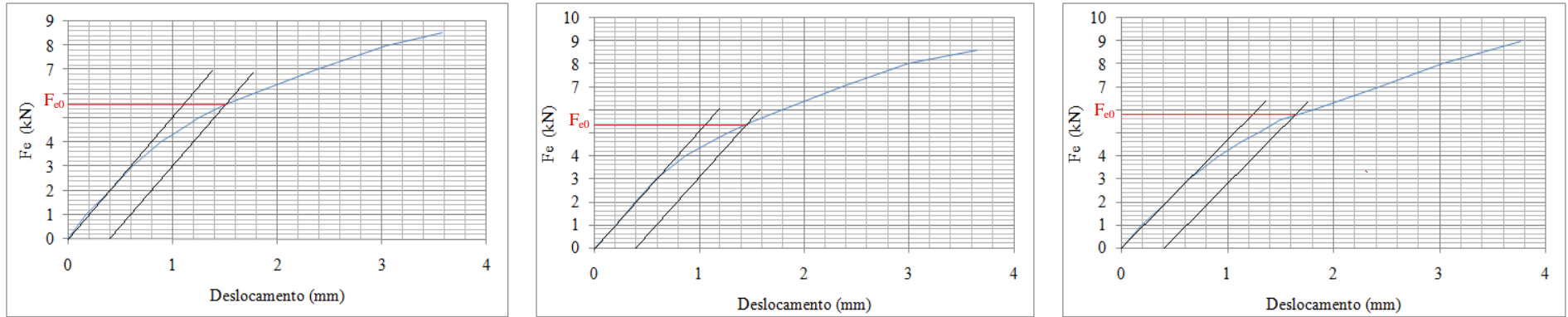


Figura 125: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.

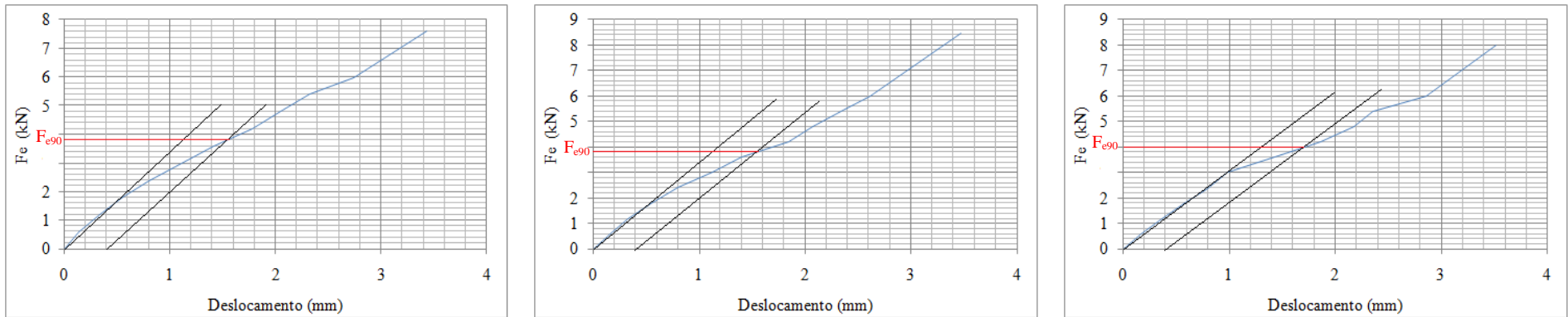


Figura 126: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 8$ mm.

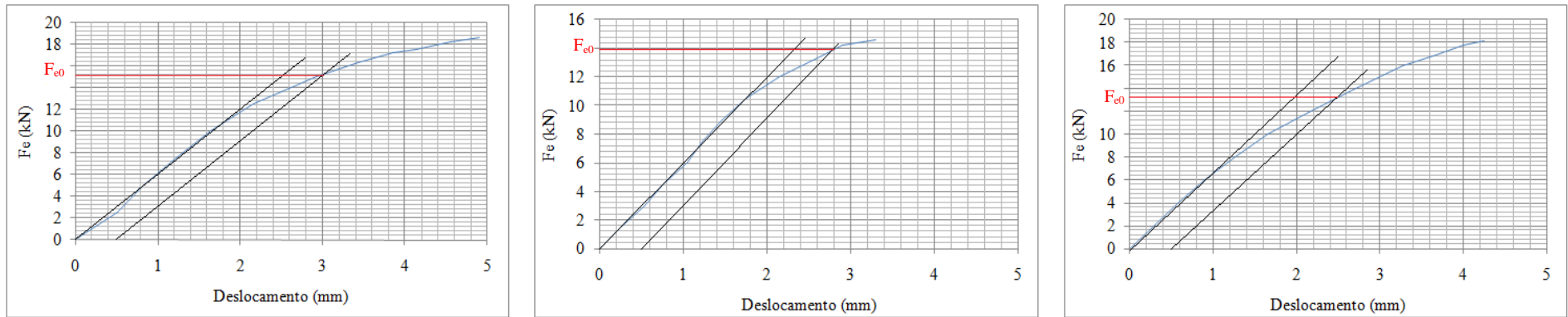


Figura 127: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.

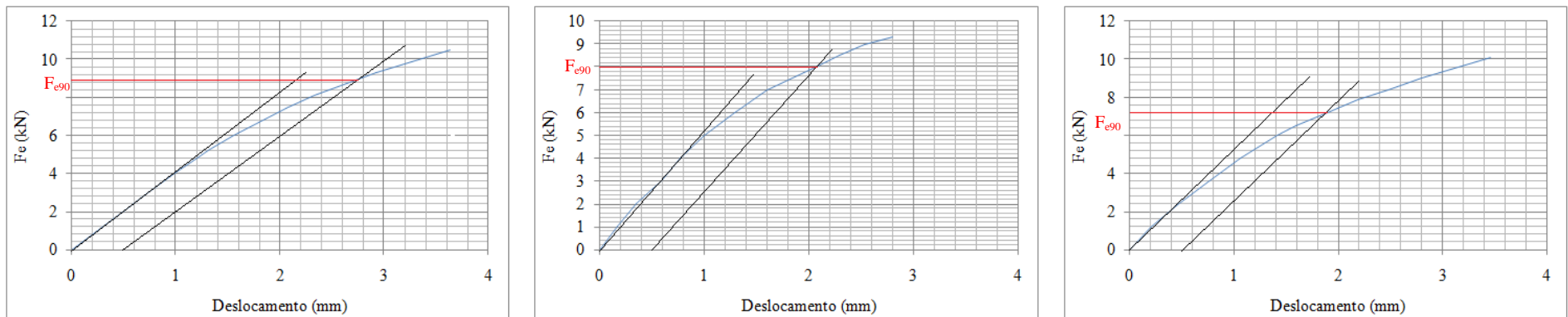


Figura 128: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 10$ mm.

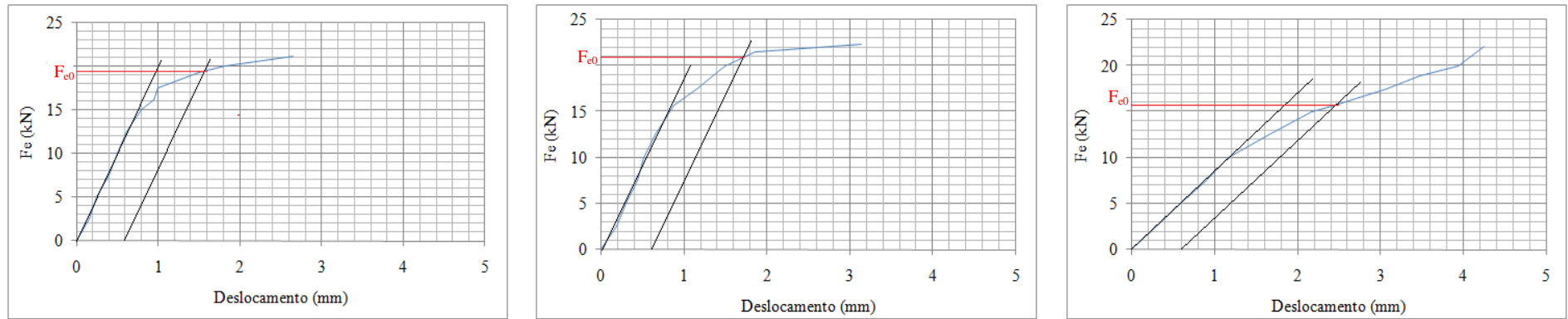


Figura 129: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.

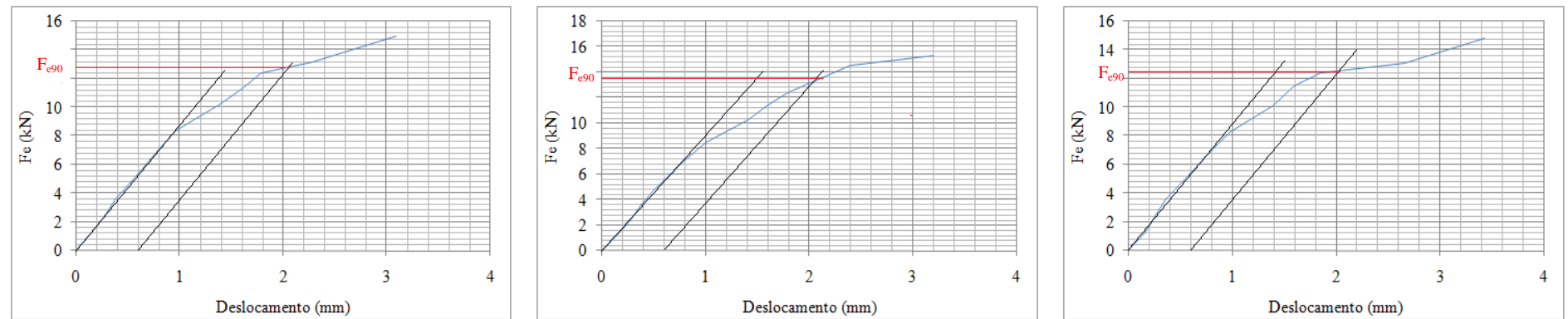


Figura 130: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 12$ mm.

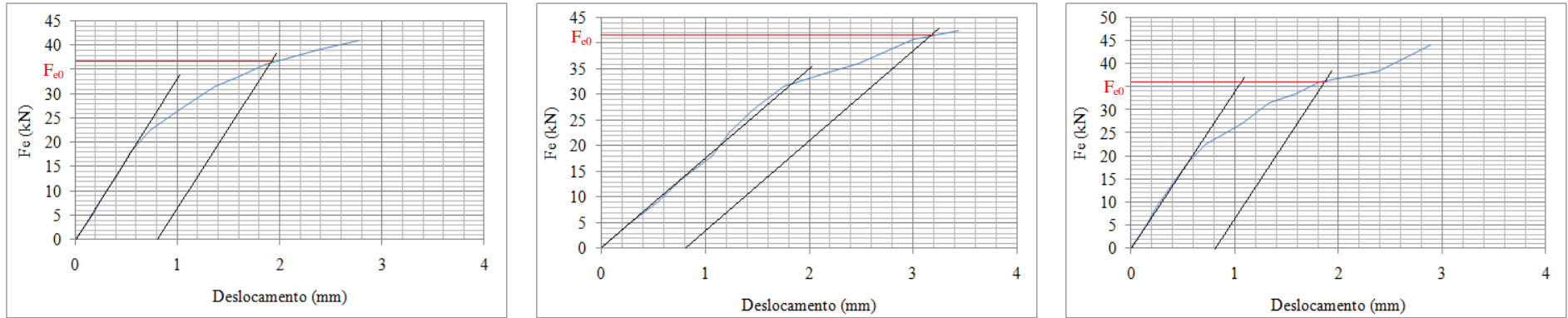


Figura 131: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.

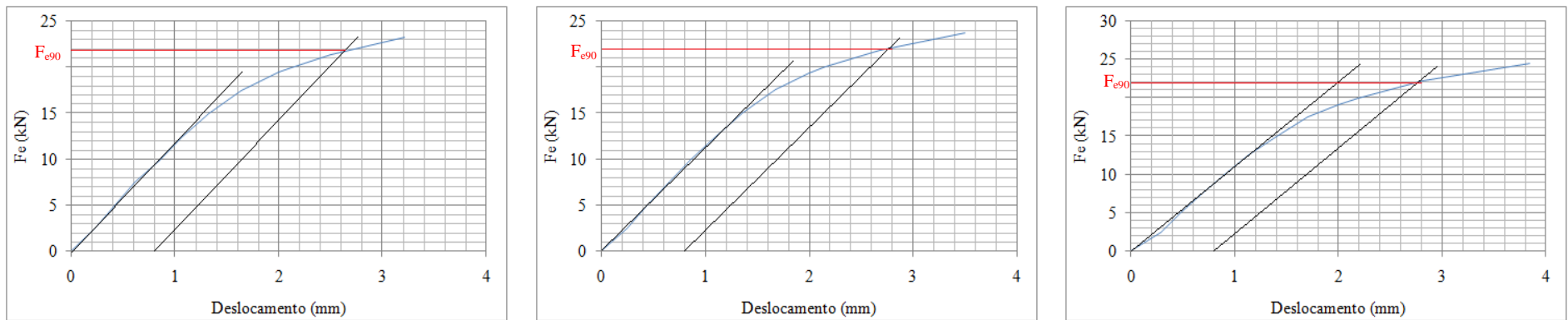


Figura 132: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Jatobá; $d = 16$ mm.

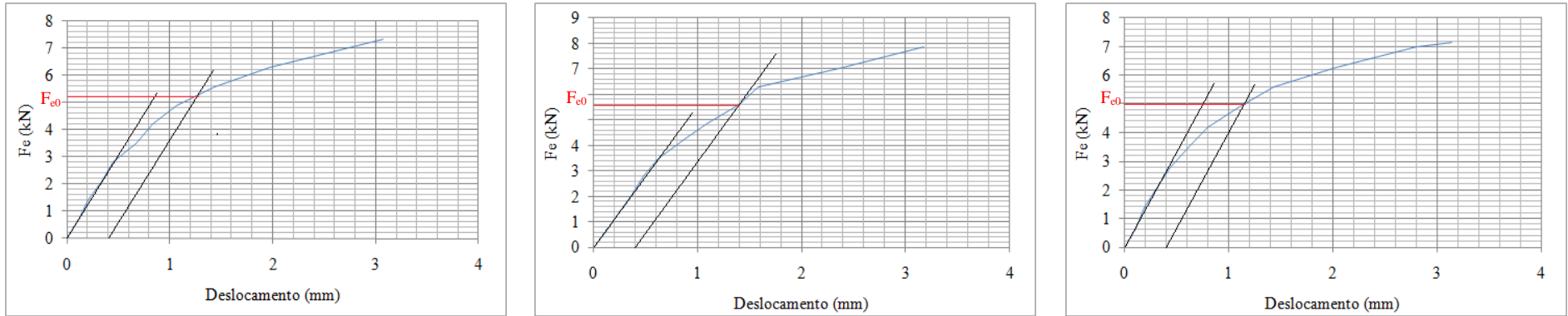


Figura 133: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 8$ mm.

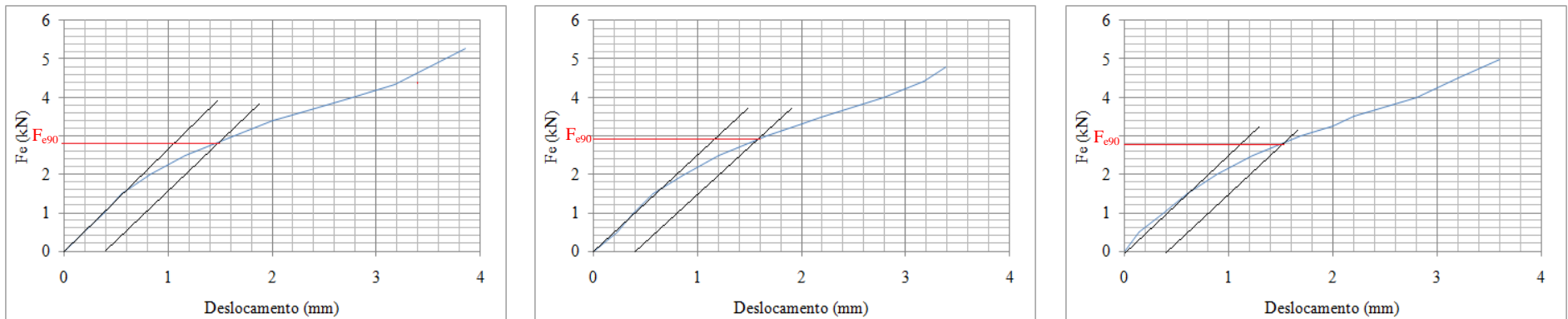


Figura 134: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 8$ mm.

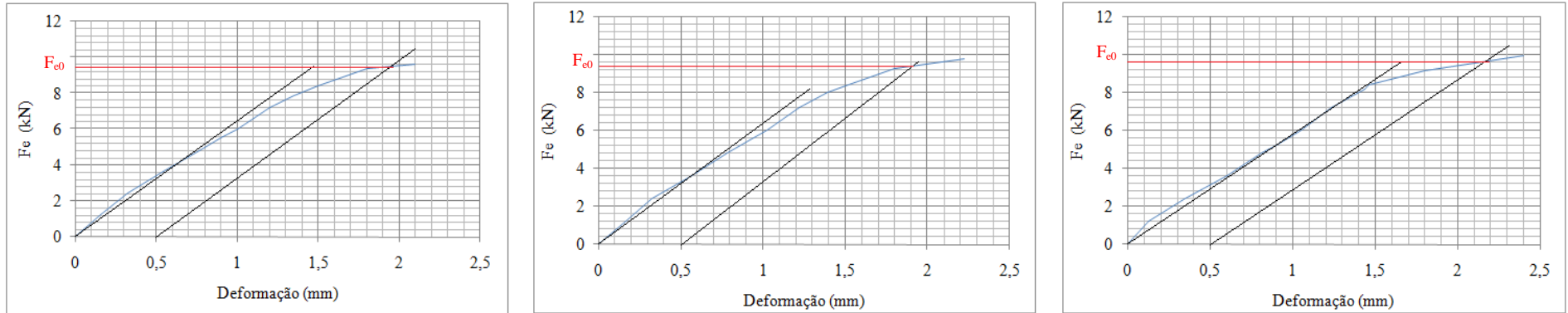


Figura 135: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 10$ mm.

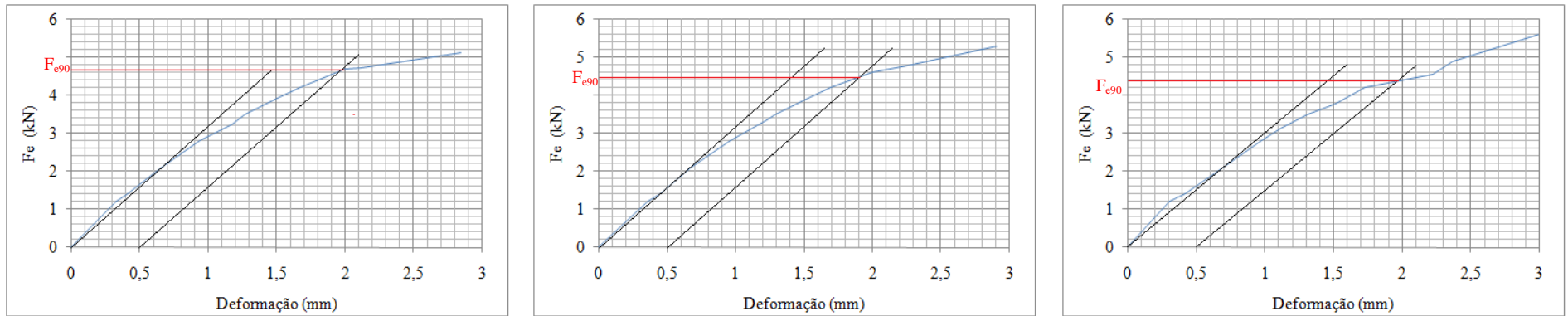


Figura 136: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 10$ mm.

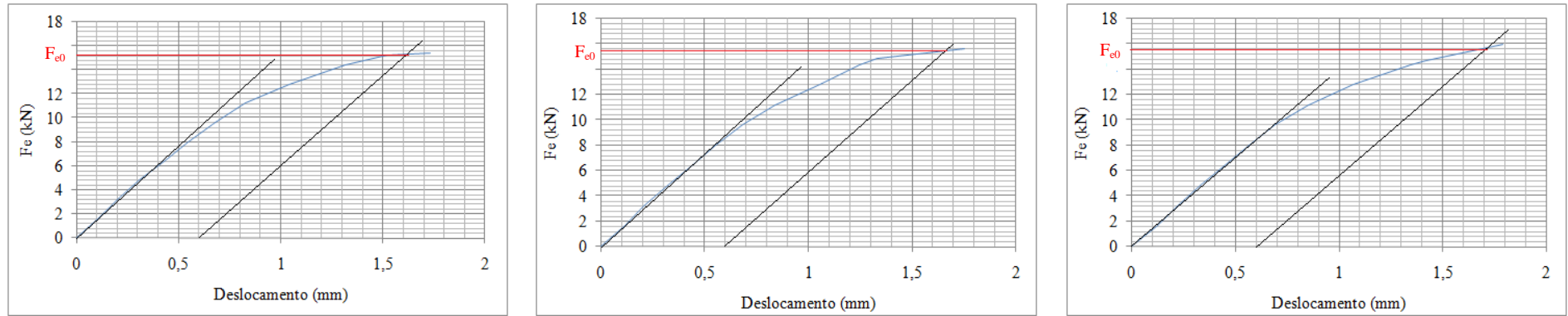


Figura 137: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 12$ mm.

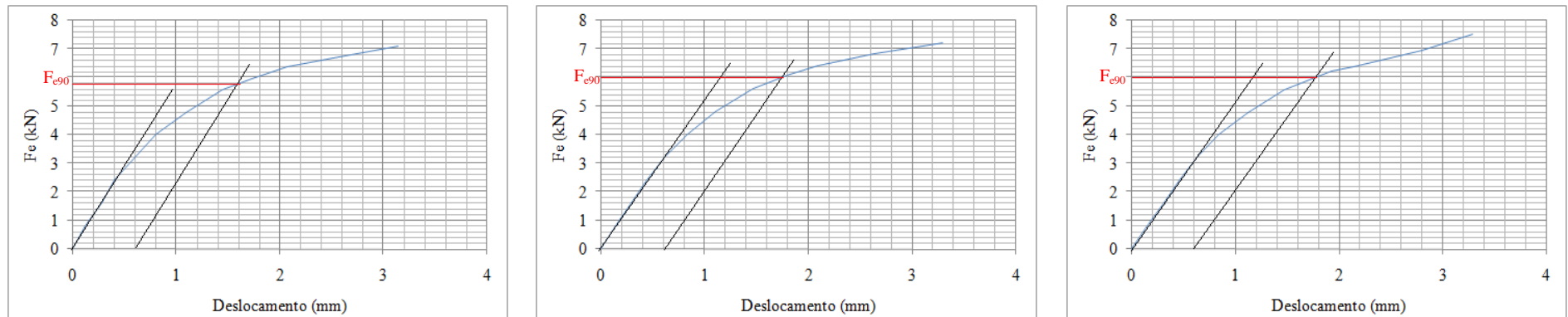


Figura 138: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 12$ mm.

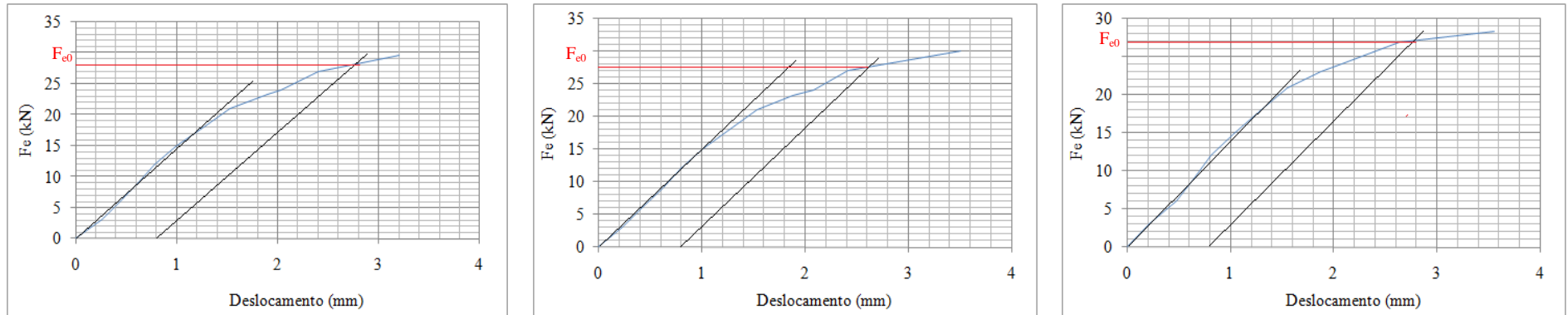


Figura 139: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 16$ mm.

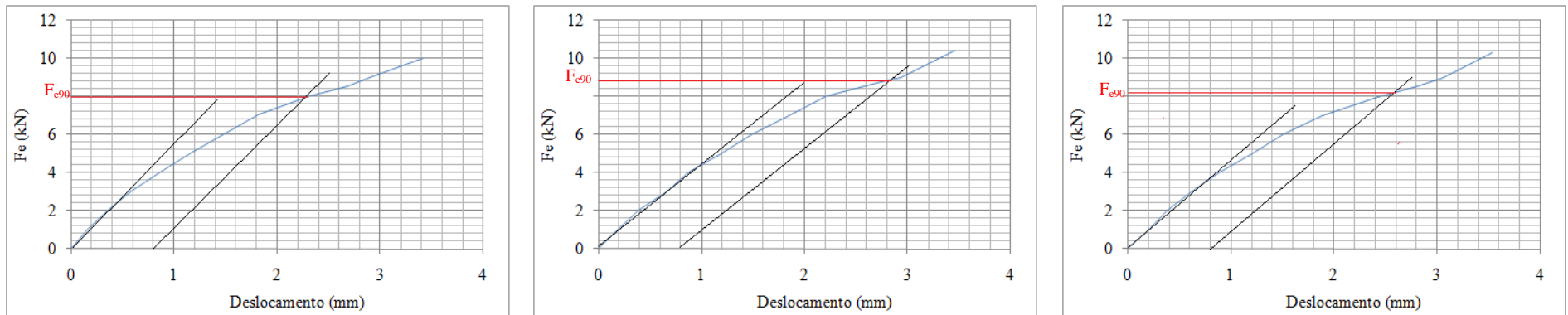


Figura 140: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Lyptus; $d = 16$ mm.

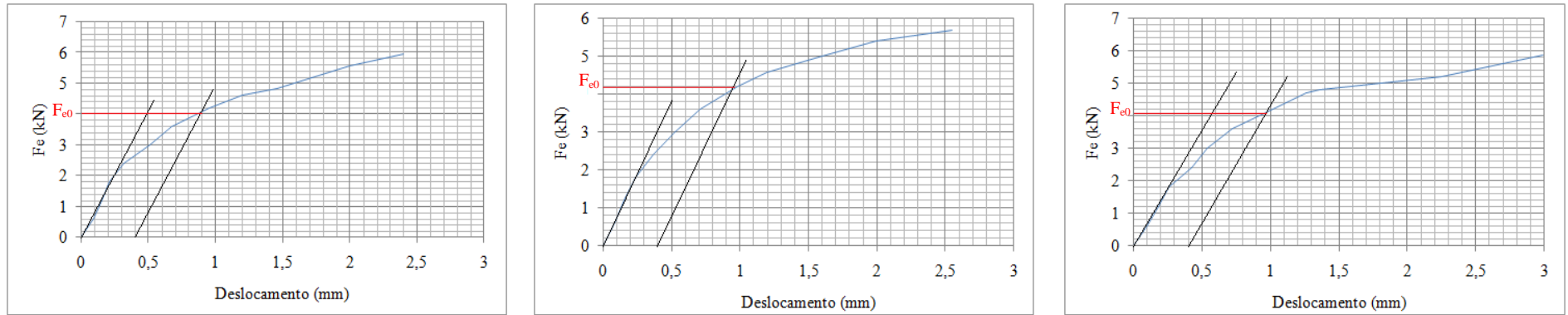


Figura 141: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 8$ mm.

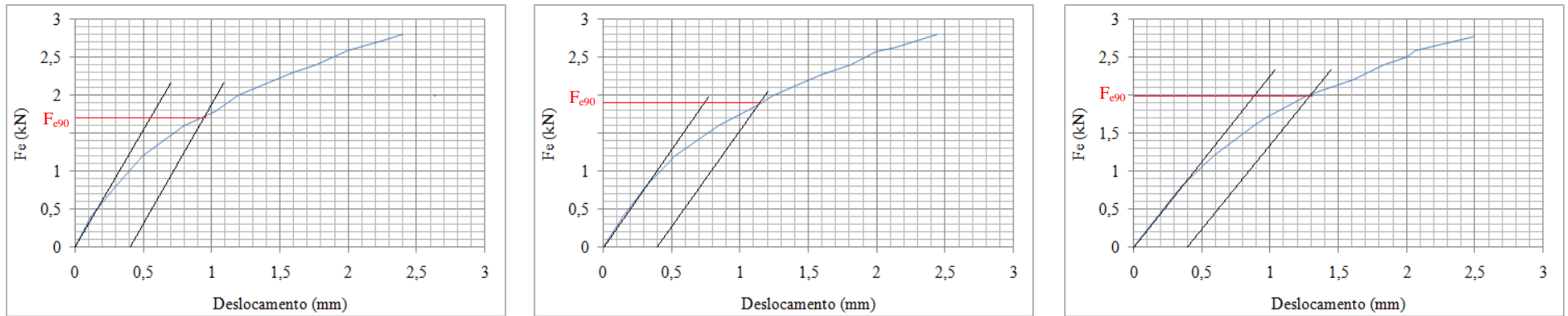


Figura 142: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 8$ mm.

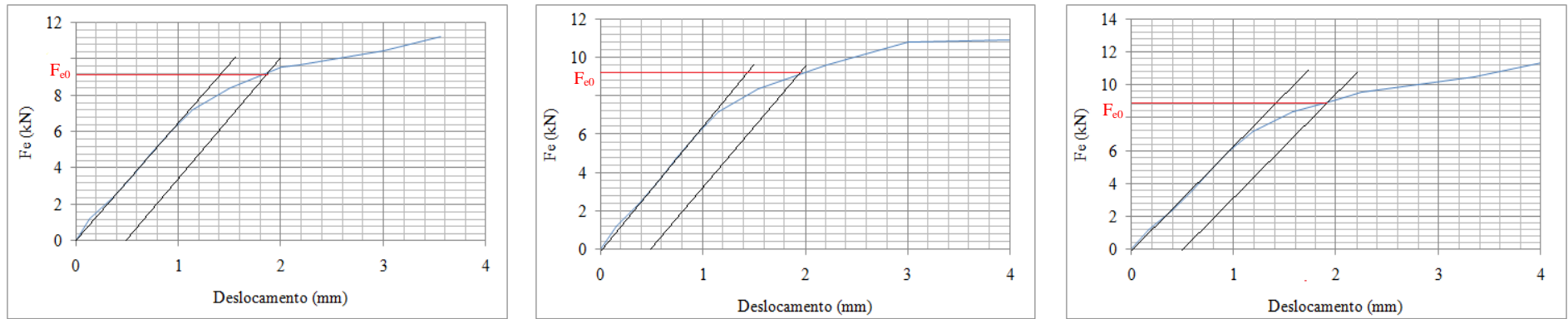


Figura 143: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 10$ mm.

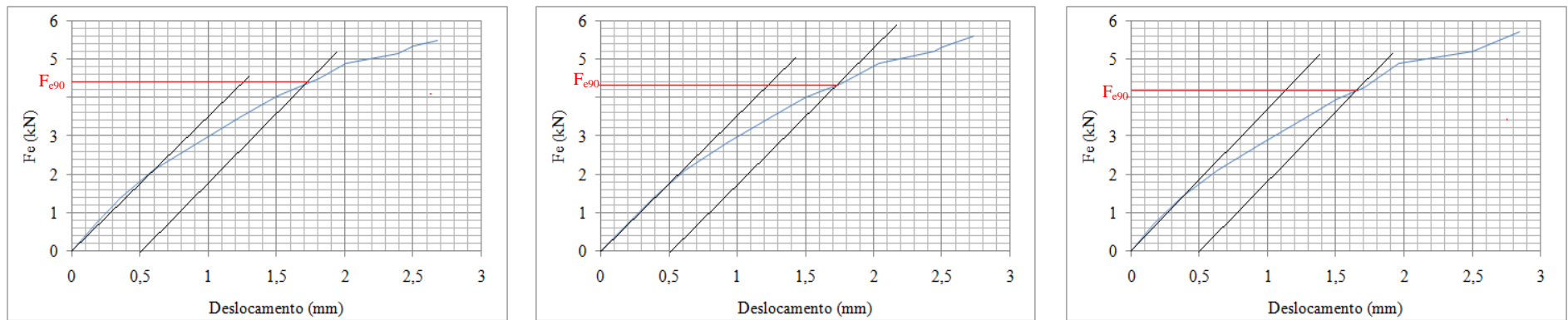


Figura 144: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 10$ mm.

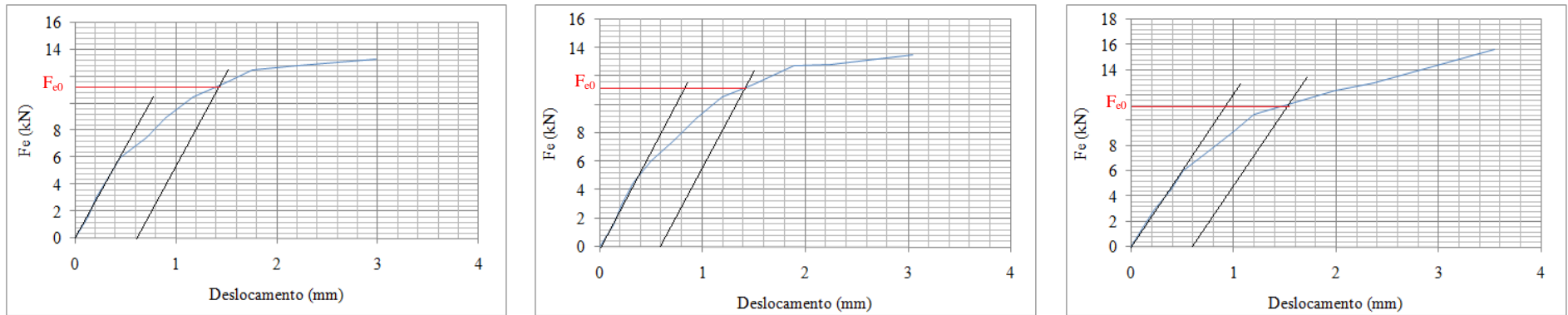


Figura 145: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.

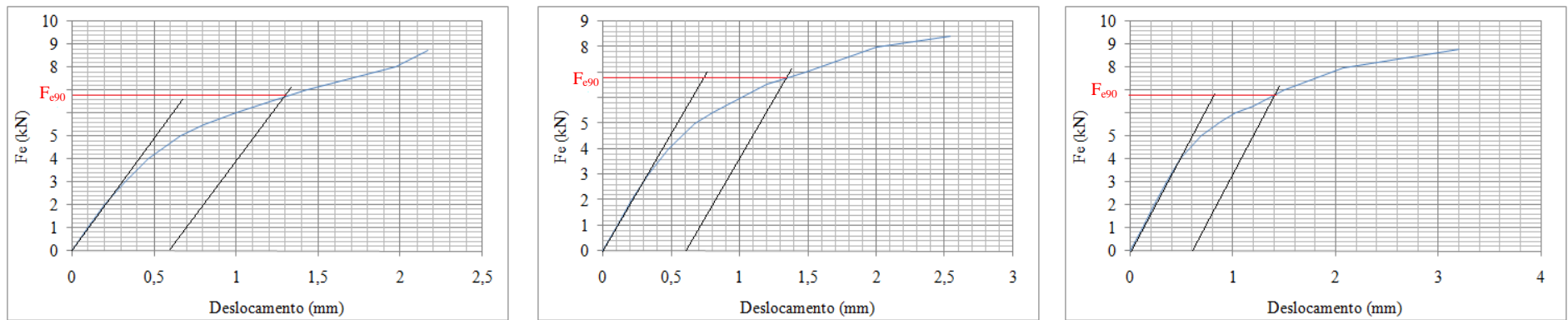


Figura 146: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 12$ mm.

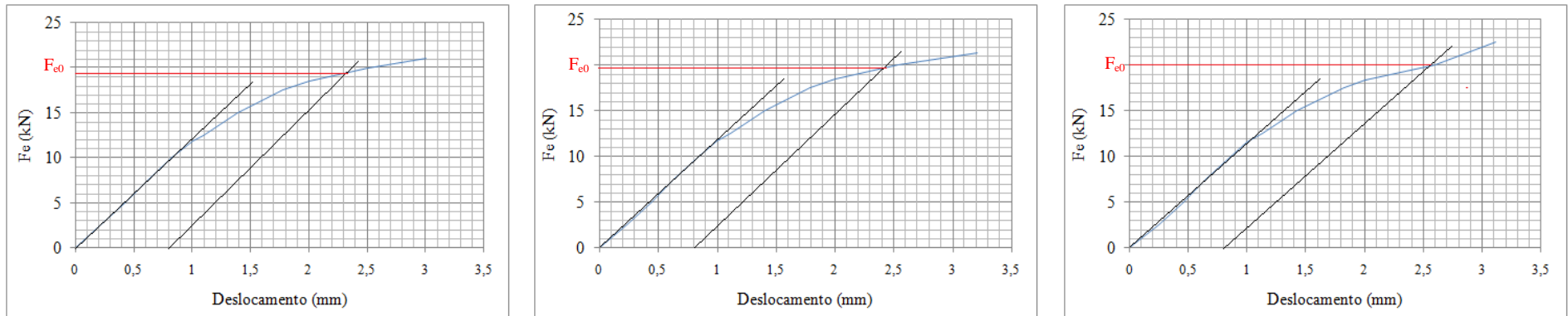


Figura 147: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 16$ mm.

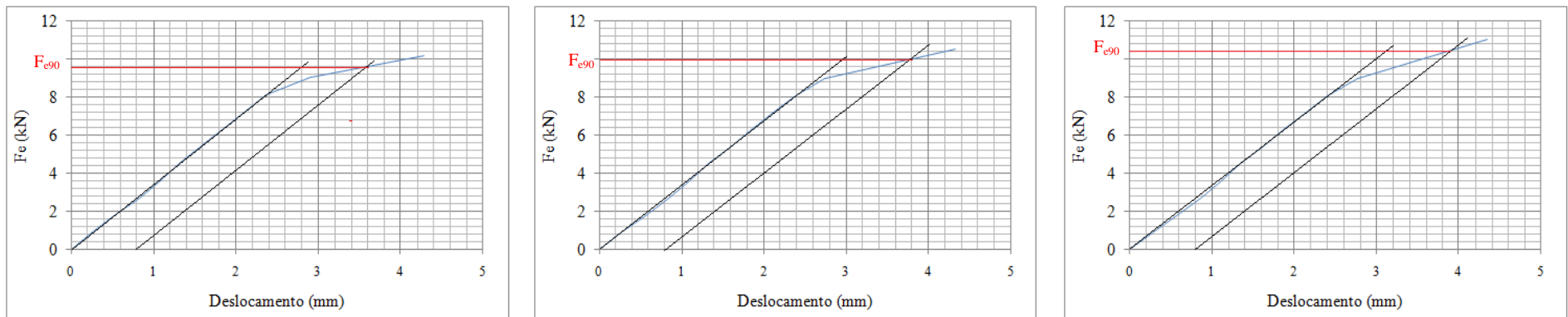


Figura 148: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cupiúba; $d = 16$ mm.