

AMAURI DA SILVA RIBAS JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA, EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO
EMBUTIMENTO DE PINOS DE AÇO EM CORPOS DE PROVA DE MADEIRAS DE
CEDRO INDIANO, CEDRO AUSTRALIANO E GARAPEIRA**

Guaratinguetá - SP
2021

AMAURI DA SILVA RIBAS JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA, EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO
EMBUTIMENTO DE PINOS DE AÇO EM CORPOS DE PROVA DE MADEIRAS DE
CEDRO INDIANO, CEDRO AUSTRALIANO E GARAPEIRA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Vilas Boas

Guaratinguetá - SP
2021

S158i Ribas Junior, Amauri da Silva
Análise teórica, experimental e numérica da resistência ao embutimento de pinos de aço em corpos de prova de madeiras de cedro indiano, cedro australiano e garapeira / Amauri da Silva Ribas Junior – Guaratinguetá, 2021.

126 f : il.

Bibliografia: f. 86-88

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Julio César Molina

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Vilas Boas

1. Resistência de materiais. 2. Método dos elementos finitos – Programas de computador. 3. Normalização. I. Título

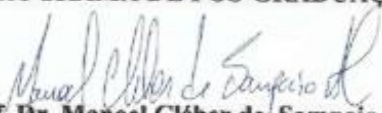
CDU 620.17(043)

AMAURI DA SILVA RIBAS JÚNIOR


**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


PROF. DR. JULIO CESAR MOLINA
Orientador / UNESP/Itapeva
participou por videoconferência


PROF. DR. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA
UNIR/DEC
participou por videoconferência


PROF. DR. PEDRO GUTEMBERG ALCÂNTARA SEGUNDINHO
Universidade Federal do Espírito Santo
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES
AMAURI DA SILVA RIBAS JUNIOR

NASCIMENTO	21.09.1993 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Amauri da Silva Ribas Elenice Chiavini da Silva Ribas
2009/2010	Curso de Nível Médio Técnico em Informática - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza - ETE Dr. Demétrio Azevedo Junior
2013/2018	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira na Universidade Estadual Paulista do Campus de Itapeva.
2018/2020	Curso de Licenciatura em Matemática, na Universidade Norte do Paraná.
2019/2021	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho ao meu pai Amauri,
minha mãe Elenice e minha esposa Taiza.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Julio Cesar Molina* por toda orientação e amizade;

Aos meus pais *Amauri e Elenice*, que, sempre incentivaram meus estudos;

Aos técnicos de laboratório da Unesp de Itapeva em especial aos técnicos Brito e Tiago, por toda ajuda na confecção dos corpos de prova e nos ensaios.

Aos meus amigos de pós-graduação.

Á minha esposa *Taiza* que me ajudou em todos os momentos deste trabalho.

Á a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por financiar essa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – número do processo 88887.480916/2020-00

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a resistência da madeira ao embutimento de pinos metálicos em peças de madeira. Para tanto, foram consideradas três principais abordagens: teórica, numérica e experimental. Inicialmente foi efetuado um levantamento teórico sobre o tema, com base na literatura disponível, para avaliação da normalização nacional e internacional pertinente ao assunto. Na sequência foram realizados os ensaios experimentais em corpos de prova de madeiras de Cedro Indiano, Cedro Australiano e Garapeira com ligações metálicas efetuadas por pinos com diâmetros aproximados de 6,72 mm e 10 mm. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações das normas: ABNT NBR 7190 (1997), EUROCODE 5 (2004) e ASTM D5764 (2007) com posterior comparação entre os resultados obtidos para a resistência ao embutimento. Também foram realizadas simulações numéricas no *software* ANSYS, que tem como base o Método dos Elementos Finitos para avaliação das distribuições de tensões e deformações nas regiões de contato do pino com a madeira. Os resultados obtidos mostram diferenças significativas entre os valores experimentais de resistência ao embutimento obtidos através das normas estudadas quando comparados entre si. Em geral a norma europeia se mostrou mais adequada para confecção dos corpos de prova, maior facilidade de obtenção das forças de embutimento, maiores valores de resistência ao embutimento como também melhor aproximação entre os valores experimentais e analíticos. Os modelos numéricos propostos foram capazes de prever a concentração das tensões nas regiões de contato entre o pino e a madeira justificando os modos de ruptura obtidos nos ensaios experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência. Embutimento. Ligações. Cedro. Garapeira. MEF

ABSTRACT

This work aimed to study the resistance of wood to the embedding of metal pins in wooden parts. Therefore, three main approaches were considered: theoretical, numerical and experimental. Initially, a theoretical survey on the subject was carried out, based on the available literature, to assess the national and international standardization related to the subject. Subsequently, experimental tests were carried out on specimens of Indian Cedar, Australian Cedar and Garapeira wood with metallic connections made by pins with approximate diameters of 6.72 mm and 10 mm. The tests were carried out in accordance with the recommendations of the standards: ABNT NBR 7190 (1997), EUROCODE 5 (2004) and ASTM D5764 (2007) with subsequent comparison between the results obtained for the embedding strength. Numerical simulations were also carried out in ANSYS software, which is based on the Finite Element Method to evaluate the stress and strain distributions in the regions of contact between the post and the wood. The results obtained showed significant differences between the experimental values of embedding strength obtained through the studied standards when compared to each other. In general, the European standard proved to be more suitable for making the specimens, easier to obtain the embedded loads, higher values of embedded strength, and greater approximation between experimental and analytical values. The proposed numerical models were able to predict the stress concentration in the contact regions between the pin and the wood, justifying the failure modes obtained in the experimental tests..

KEYWORDS: Strength. Embedded. Connections. Cedar. Garapeira. FEM

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Embutimento de pino na madeira.	4
Figura 2: Diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento, segundo a norma brasileira.	6
Figura 3: Diagrama tensão de embutimento (f_e) x deformação específica (ϵ).	6
Figura 4: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo norma brasileira.	7
Figura 5: Dimensões do corpo de prova para os ensaios de resistência ao embutimento segundo norma europeia, para direção paralela às fibras;	8
Figura 6: Dimensões do corpo de prova para os ensaios de resistência ao embutimento segundo norma europeia, para direção perpendicular às fibras.	9
Figura 7: Diagrama de ciclo de carregamento para ensaio de embutimento segundo a norma europeia	9
Figura 8: Gráfico de Força (N) x Deslocamento (mm)	10
Figura 9: Dimensões do corpo-de-prova nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo a norma americana.	11
Figura 10: Configuração da EMIC para os ensaios de embutimento.	23
Figura 10: Quantificação das informações para os corpos de prova: (a) Aferição das dimensões do corpo-de-prova; (b) Aferição da massa do corpo-de-prova.	23
Figura 11: Detalhes do ensaio de embutimento: (a) Inserção do pino metálico; (b) Corpo-de-prova acoplado no suporte de ensaio da EMIC; (c) Realização do ensaio de embutimento; (d) Corpo-de-prova pós o ensaio de embutimento.	25
Figura 13: Elemento finito solid45.	28
Figura 14: Ponto de referência para calibração dos modelos.	28
Figura 15: Parâmetros utilizados na definição das malhas dos modelos de embutimento: (a) (b) e (c) Parâmetros para a peça de madeira; (d) e (e) Parâmetros referentes ao pino metálico.	30
Figura 16: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma europeia: (a) Direção paralela; (b) Direção perpendicular.	33
Figura 17: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma brasileira: (a) Direção paralela; (b) Direção perpendicular.	33
Figura 18: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma brasileira para as direções paralela e perpendicular às fibras.	34

Figura 19: Comportamento elasto-plástico adotado para a madeira através de curvas bi-lineares.....	35
Figura 20: Pontos de vinculação e de aplicação do carregamento para os modelos numéricos.	41
Figura 21: Curva de calibração do modelo 1 (CP1) conforme norma EN 383 (2007) para a direção paralela às fibras.	54
Figura 22: Curva de calibração do modelo 2 (CP4), conforme norma EN 383 (2007) para a direção perpendicular às fibras.	55
Figura 23: Curva de calibração do modelo 3 (CP4) conforme norma ABNT NBR 7190 (19977) para a direção paralela às fibras.....	55
Figura 24: Curva de calibração do modelo 4 (CP3), conforme norma ABNT NBR 7190 (1997) para a direção perpendicular às fibras.	56
Figura 25: Curva de calibração do modelo 5 (CP6) conforme norma ASTM D5764 (2007) para a direção paralela às fibras.....	56
Figura 26: Curva de calibração do modelo 6 (CP6) conforme ASTM D5764 (2007) para a direção perpendicular às fibras.	57
Figura 27: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z).....	59
Figura 28: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z). – geometria completa, sem o pino metálico.	59
Figura 29: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z) - visualização de ½ estrutura.	60
Figura 30: Tensões em MPa (direção z) – resultantes do contato entre o pino e a parte superior do furo da peça de madeira (modelo 1).	61
Figura 31: Tensões em MPa (direção z) – na parte inferior do pino (modelo 1).	61
Figura 32: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma EN 383 – paralela às fibras.	62
Figura 33: Tensões em MPa para o modelo 2- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z). – geometria completa, sem o pino metálico.	63
Figura 34: Comparação entre as tensões obtidas no Modelo 2, com o tipo de falha ocorrida no ensaio experimentais para a norma EN 383 – perpendicular às fibras.	64
Figura 35: Tensões no pino de aço – modelo 2 (EN 383:2007) perpendicular as fibras.....	64
Figura 36: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma EN 383 – perpendicular às fibras.....	65

Figura 37: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ABNT NBR 7190 – paralela às fibras.....	66
Figura 38: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ABNT NBR 7190 – perpendicular às fibras.	66
Figura 39: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ASTM D5764 (2007) – paralela às fibras.....	67
Figura 40: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ASTM D5764 (2007) – perpendicular às fibras.	68
Figura 41: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção paralela às fibras; Diâmetro do pino de 6,72 mm.	75
Figura 42: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção paralela às fibras; Diâmetro do pino de 10 mm.	76
Figura 43: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	77
Figura 44: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	78
Figura 45: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	79
Figura 46: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	80
Figura 47: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.....	81
Figura 48: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.....	82
Figura 49: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	83
Figura 50: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	84
Figura 51: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	85
Figura 52: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	86
Figura 53: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	87

Figura 54: Determinação de Fe0; EN 383:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	88
Figura 55: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro de 6,72 mm.	89
Figura 56: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	90
Figura 57: Determinação de Fe0; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	91
Figura 58: Determinação de Fe0; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	92
Figura 59: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	93
Figura 60: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	94
Figura 61: Determinação de Fe0; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	95
Figura 62: Determinação de Fe0; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	96
Figura 63: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	97
Figura 64: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	98
Figura 65: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	99
Figura 66: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	100
Figura 67: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	101
Figura 68: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	102
Figura 69: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	103
Figura 70: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.	104

Figura 71: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.....	15
Figura 72: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.....	16
Figura 73: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.....	17
Figura 74: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.....	18
Figura 75: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.	19
Figura 76: Determinação de Fe0; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de α_c conforme o diâmetro do pino.	12
Tabela 2: Parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento, conforme cada norma.	26
Tabela 3: Malhas testadas para o modelo de corpo de provada norma europeia para a direção paralela às fibras.	31
Tabela 4: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma europeia para a direção perpendicular às fibras.	31
Tabela 5: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma brasileira para a direção paralela às fibras.	32
Tabela 6: Malhas testadas o modelo de corpo de prova da norma brasileira para a direção perpendicular às fibras.	32
Tabela 7: Malhas testadas para o modelo de copo de pova da norma americana para a direção paralela às fibras.	32
Tabela 8: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma americana para a direção perpendicular às fibras.	32
Tabela 9: Nomenclatura utilizada para identificar os modelos numéricos.	37
Tabela 10: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 1.	37
Tabela 11: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 2.	38
Tabela 12: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 3.	38
Tabela 13: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 4.	39
Tabela 14: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 5.	39
Tabela 15: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 6.	40
Tabela 16: Constantes admitidas para o aço dos conectores metálicos (modelos 1 a 6).	40
Tabela 17: Condições de vinculação e de carregamento utilizadas nos modelos.	42
Tabela 18: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova da Garapeira (U=12%).	43
Tabela 19: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova do Cedro Indiano (U=12%).	44
Tabela 20: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova do Cedro Australiano (U=12%).	44
Tabela 21: Caracterização mecânica da Garapeira, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).	45

Tabela 22: Caracterização mecânica do Cedro Indiano, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).....	45
Tabela 23: Caracterização mecânica do Cedro Australiano, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).....	45
Tabela 24: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento da Garapeira, conforme cada norma.....	46
Tabela 25: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento do Cedro Indiano, conforme cada norma.	46
Tabela 26: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento do Cedro Australiano, conforme cada norma.....	47
Tabela 27: Resistência médias ao embutimento analítica na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa.....	47
Tabela 28: Resistência médias ao embutimento analítica na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), em MPa.....	47
Tabela 29: Resistência ao embutimento experimental na direção paralela às fibras (f_{e0}) em MPa.....	49
Tabela 30: Resistência ao embutimento experimental na direção perpendicular às fibras (f_{e90}) em MPa.....	49
Tabela 31: Valores analíticos e experimentais obtidos para a resistência ao embutimento paralela às fibras, em MPa.....	50
Tabela 32: Valores analíticos e experimentais obtidos para a resistência ao embutimento perpendicular às fibras.....	51
Tabela 33: Percentual das diferenças entre os valores das resistências experimentais e analíticas ao embutimento na direção paralela às fibras.....	51
Tabela 34: Percentual das diferenças entre os valores das resistências experimentais e analíticas ao embutimento na direção perpendicular às fibras.	52
Tabela 35: “Teste de Tukey” para a avaliação das resistências de embutimento.....	53

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
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
 E_{c90} – módulo de elasticidade da madeira em esforços de compressão na direção perpendicular às fibras
 f_{c0} – resistência da madeira à compressão na direção paralela às fibras
 f_{c90} – resistência da madeira à compressão na direção perpendicular 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 perpendicular 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_{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
 m^3 – 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	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	MÉTODOS EXPERIMENTAIS NORMALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO	5
2.1.1	Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997).....	5
2.1.1.1	Correção da resistência ao embutimento pela umidade.....	7
2.1.2	Norma Europeia EN 383 (2007).....	7
2.1.3	Norma Americana ASTM D5764 (2007).....	10
2.2	MÉTODOS ANALÍTICOS NORMATIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO	11
2.2.1	Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997).....	11
2.2.2	Norma Europeia EN 383 (2007).....	12
2.2.3	Norma Americana ASTM D5764 (2007).....	13
2.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	13
2.3.1	Método dos elementos finitos.....	14
2.3.2	Etapas da simulação numérica.....	14
2.3.3	Critérios de ruptura para os materiais envolvidos no modelo	15
2.3.3.1	Critério de ruptura para o aço conector	15
2.3.3.2	Critério de ruptura para a madeira.....	16
2.4	TRABALHOS CIENTÍFICOS A RESPEITO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DESENVOLVIDOS NO BRASIL.....	16
2.5	TRABALHOS CIENTÍFICOS A RESPEITO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DESENVOLVIDOS NO EXTERIOR	19
2.6	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3	METODOLOGIAS: EXPERIMENTAL, ANALÍTICA E NUMÉRICA	22
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	22
3.1.1	Amostras.....	22
3.1.2	Equipamentos utilizados.....	22
3.2	MÉTODOS: ANALÍTICO E EXPERIMENTAL	24
3.2.1	Caracterização da madeira.....	24

3.2.2	Ensaio de embutimento.....	24
3.2.3	Resistência analítica da madeira ao embutimento.....	25
3.2.4	Análise estatística	26
3.3	MÉTODOS: NUMÉRICA	27
3.3.1	Definição da malha.....	29
3.3.2	Modelos numéricos analisados.....	32
3.3.3	Propriedades dos materiais utilizados nos modelos	34
3.3.3.1	Madeira.....	34
3.3.3.2	Conector metálico.....	40
3.3.4	Condições de contorno e aplicação do carregamento.....	40
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS	43
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	43
4.2	RESISTÊNCIA ANALÍTICA AO EMBUTIMENTO	46
4.3	RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL AO EMBUTIMENTO.....	48
4.4	COPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS E EXPERIMENTAIS	50
4.5	RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA	54
4.5.1	Calibração dos modelos.....	54
4.5.2	Tensões no corpo de prova de embutimento	58
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – GRÁFICOS PARA ABNT 7190 (1997)	75
	APÊNDICE B – GRÁFICOS PARA EN 383 (2007)	87
	APÊNDICE C – GRÁFICOS PARA ASTM D5764 (2007).....	99

1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil é uma solução promissora sob o aspecto da sustentabilidade, pois trata-se de um material, renovável, biodegradável e que sequestra carbono da atmosfera durante seu crescimento (PUNHAGUI, 2014).

Por outro lado, é de suma importância conhecer as propriedades físicas e mecânicas da madeira, para que o dimensionamento das estruturas de madeira seja feito de forma correta (ALMEIDA, 2014; PALLAROLAS, 2017). É necessária a realização de estudos experimentais para conhecer o comportamento das ligações entre as peças de madeira, pois é justamente nesses pontos onde ocorrem as situações mais críticas e maiores concentrações de tensões em uma estrutura de madeira (MOLINA, CALIL JUNIOR, 2010).

Vários tipos de ligações são utilizados nas estruturas de madeira, a fim de garantir que as conexões entre os diversos elementos estruturais suportem os esforços solicitantes (BAENA, 2015). Entre os tipos de ligações usados em estruturas de madeira, alguns tipos podem ser citados, como, por exemplo, as ligações por pinos (pregos, cavilhas e parafusos), anéis metálicos, além das ligações coladas. Os pinos metálicos são os mais utilizados nas estruturas de madeira, tanto em pequenas estruturas quanto nas estruturas maiores, sendo as mais comuns às pontes e as treliças. As ligações com pinos metálicos possibilitam várias formas de utilização e possuem baixo custo. No que se refere às ligações por pinos se enquadram, além dos pregos e parafusos, também as barras de aço (ALMEIDA, 2014; MOLINA et al. 2009).

Podem ocorrer dois tipos de ruptura nas ligações por pinos metálicos: o embutimento do pino na madeira e/ou a flexão do pino metálico (PALLAROLAS, 2017). O embutimento é caracterizado pelo esmagamento ou fendilhamento da madeira na área de contato entre a madeira e o pino metálico.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em seu documento ABNT NBR 7190 (1997) - “Projeto de Estruturas de Madeira” e as principais normas internacionais como a americana ASTM D5764 (2007) - “American Society for Testing and Materials” e a europeia EN 383 (2007) - “European Committee For Standardization” fornecem metodologias diferentes para se determinar a resistência ao embutimento da madeira. Na ABNT NBR 7190 (1997) a resistência ao embutimento da ligação é convencionada à deformação específica 2‰ (dois por mil). Na ASTM D5764 (2007), a resistência ao embutimento é determinada pela força que provoca o deslocamento entre o pino e a madeira igual a 5% do diâmetro do pino metálico utilizado. Por fim, na EN 383 (2007) a resistência é determinada pela força que

provoca o deslocamento entre o pino e a madeira de 5 mm (MOLINA e RIBAS JUNIOR, 2020).

Diferente das outras normas, na ABNT NBR 7190 (1997) a resistência ao embutimento está relacionada à deformação específica 2‰, (valor adimensional), do pino na madeira, sendo essa uma deformação muito baixa e, conseqüentemente, a força necessária para realizar essa deformação também é baixa, o que resulta em um valor baixo para a resistência ao embutimento, sendo este muito inferior aos valores fornecidos pelas outras normas analisadas como a europeia e americana (MOLINA et al. 2020).

Essas diferenças fazem com que as estruturas dimensionadas pela norma brasileira apresentem um número elevado de conectores, no caso das ligações parafusadas de treliças, por exemplo, não correspondendo ao comportamento ideal de dimensionamento para a estrutura (ALMEIDA et al. 2019).

O objetivo deste trabalho consistiu em realizar comparações, analítica, experimental e numérica, entre a norma ABNT NBR7190 (1997) e as normas ASTM D5764 (2007) e EN 383 (2007), a partir da utilização de três diferentes tipos de madeiras e dois diâmetros de pinos metálicos, a fim de reavaliar os critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos proposto pela norma brasileira, uma vez que a mesma encontra-se em fase de revisão, atualmente.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar por abordagens teórica, numérica, e experimental os métodos normativos propostos pelas normas ABNT NBR 7190 (1997), EN 383 (2007) e ASTM D5764 (2007) para determinação da resistência ao embutimento de pinos metálicos em peças de madeira.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliação da normalização existente sobre os métodos de cálculo e de ensaio para a determinação da resistência ao embutimento em ligações efetuadas por pinos metálicos (pregos) em corpos de prova de madeira;
- Investigação experimental dos métodos de ensaio para determinação da resistência ao embutimento com base nas recomendações da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), europeia EN 383 (2007) e americana ASTM D5764 (2007);
- Comparação dos resultados de resistência ao embutimento obtidos pelas normas brasileira, europeia e americana;

- Realização de simulações numéricas para avaliação das distribuições de tensões e deformações nos corpos de prova de embutimento analisados.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

As ligações são os pontos onde ocorrem o maior acúmulo de tensões em uma estrutura de madeira. Logo, é a parte mais frágil da estrutura. Quanto o maior número de pesquisas sobre o tema, melhor será a sua utilização da madeira na construção civil, e conseqüentemente, estruturas mais seguras serão desenvolvidas e com menores custos.

A metodologia proposta pela norma ABNT NBR 7190 (1997), define que a resistência ao embutimento é obtida para um valor de deformação específica de 2 ‰. Este valor de deformação específica é obtido dividindo-se os deslocamentos, devido à força aplicada ao corpo de prova, pela base de medida 14d (14 vezes o diâmetro do pino), resultando em uma deformação adimensional. Para as normas ASTM D5764 (2007) e EN 383 (2007) as resistências ao embutimento são definidas a partir de deslocamentos absolutos em milímetros, sendo estas metodologias mais práticas para a obtenção da resistência ao embutimento. Percebe-se que a norma brasileira propõe um valor de deformação adimensional para calcular a resistência ao embutimento, enquanto que as normas americana e europeia utilizam valores de deslocamento em milímetros, ficando difícil a comparação dos resultados, neste caso, sendo necessária a padronização destes valores.

Em alguns trabalhos já analisados na literatura, observa-se uma grande diferença entre os resultados dos valores de resistência ao embutimento obtidos pelas três normas. Portanto, não se conhece a exata capacidade de resistência da madeira ao embutimento.

O dimensionamento de ligações com pinos metálicos da norma ABNT NBR 7190 (1997) resulta em um elevado número de conectores, se comparada com as outras normas (americana e europeia). O elevado número de conectores na ligação, neste caso, conduz a um elevado custo para a estrutura e dificuldade de colocação dos pinos metálicos nas peças de madeira devido aos espaços disponíveis para tal finalidade. Sendo assim, é necessária a verificação dos critérios de dimensionamento da atual norma brasileira para obtenção de um critério de dimensionamento e de ensaio mais consistente para a realidade brasileira.

Este trabalho complementa outras pesquisas desenvolvidas na mesma temática na EESC/USP por Almeida (2014) e na UNESP/Itapeva por Pallarolas (2017).

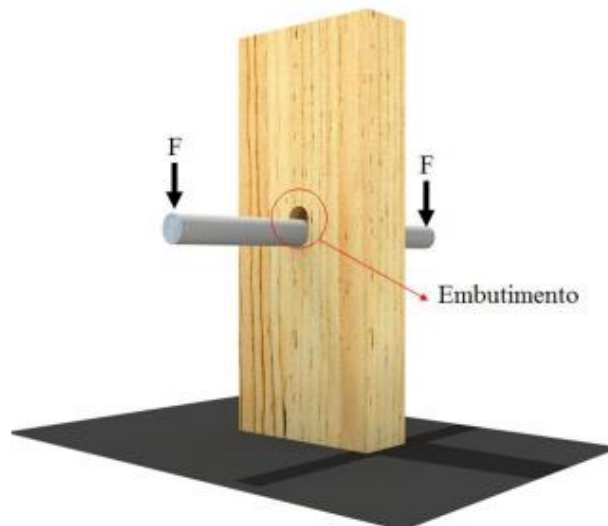
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As estruturas de madeira necessitam da união de seus elementos, pois as peças de madeira possuem comprimentos limitados, e essas uniões são feitas através das ligações. A partir do uso das ligações as estruturas são capazes de cobrir maiores vãos e resistir grandes esforços (BAENA, 2015; OLIVEIRA, 2001).

Para o desenvolvimento das estruturas de madeira, é importante o conhecimento do comportamento das ligações (STAMATO, 2002). Os maiores esforços são concentrados nas regiões das ligações, sendo que estas regiões são consideradas os pontos fundamentais para a segurança da estrutura (MOLINA et al. 2014; CALIL JUNIOR et al. 2010). Em seu dimensionamento considera-se a ocorrência de duas formas de ruptura, sendo elas a flexão do pino metálico ou o embutimento da madeira (ALMEIDA, 2014).

O embutimento pode ser caracterizado pelo esmagamento localizado, ou fendilhamento ocorrido na madeira, por meio das tensões de compressão, originadas do contato do pino metálico com a madeira, sendo este fenômeno mais comumente ocorrido nas ligações (MAIA, 2019). A Figura 1 exemplifica uma ligação entre peças de madeira, na qual o pino metálico está sujeito à flexão e a madeira submetida a tensões de compressão localizada (tensões de embutimento).

Figura 1: Embutimento de pino na madeira.



Fonte: Maia, 2019.

Para o correto dimensionamento das ligações em estruturas de madeira é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira, sendo fundamental o conhecimento da resistência ao embutimento e resistência a compressão da madeira, nas direções paralela e perpendicular às fibras (BAENA, 2015; ALMEIDA, 2014).

A seguir são apresentados os métodos propostos por cada norma considerada neste trabalho para a determinação da resistência da madeira ao embutimento tanto analítica quanto experimental como também os trabalhos técnico-científicos que enfocam o tema embutimento.

2.1 MÉTODOS EXPERIMENTAIS NORMALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO

Nos próximos itens são apresentadas as metodologias experimentais para a determinação da resistência ao embutimento da madeira, conforme as normas ABNT NBR 7190 (1997), EN 383 (2007) e ASTM D5764 (2007).

2.1.1 Norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997)

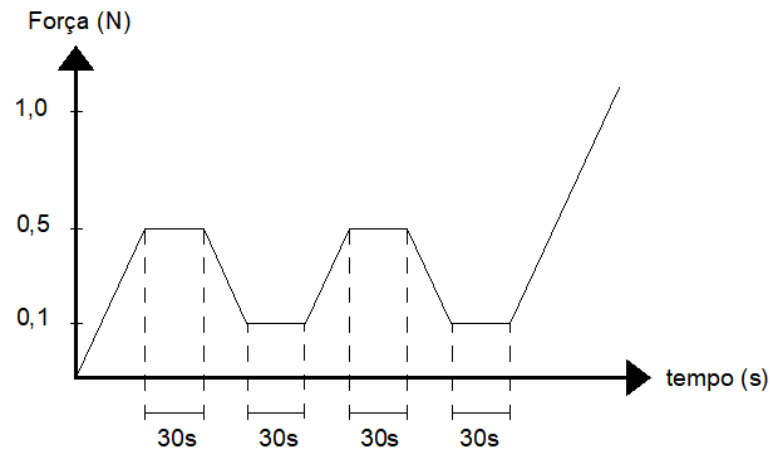
No documento normativo ABNT NBR 7190 (1997), da Associação Brasileira de Normas Técnicas, é definido que a resistência ao embutimento, paralela ou perpendicular às fibras, (f_{e0} ou f_{e90}) é obtida pela razão entre a força que causa a deformação específica residual 2‰ ($F_{e2‰}$), e área de contato ($A_e = t \cdot d$) onde ocorre o embutimento do pino, de acordo com a Equação 1. Essa área é caracterizada pelo produto entre o diâmetro do pino (d) e a espessura do corpo-de-prova (t).

$$f_e = \frac{F_{2‰}}{t \cdot d} \quad (1)$$

Inicialmente deve-se realizar um ensaio para estimar a resistência ao embutimento ($f_{e,est}$), através da realização de um ensaio em um corpo-de-prova gêmeo, o qual deve ser do mesmo lote da amostra a ser ensaiada.

Após o conhecimento da resistência estimada, deve-se iniciar os ensaios, de forma que seja aplicado um carregamento com dois ciclos de carga e descarga variado entre 10% e 50% da carga da resistência estimada, sendo o terceiro e último ciclo considerado na determinação da resistência ao embutimento. A Figura 2 mostra o diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento.

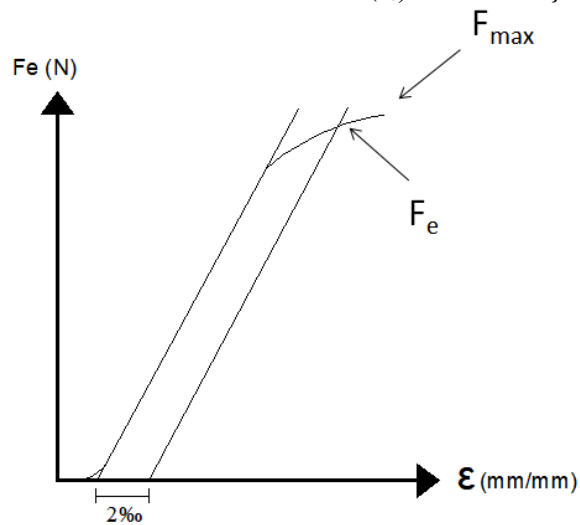
Figura 2: Diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento, segundo a norma brasileira.



Fonte: Adaptado de 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).

Figura 3: Diagrama tensão de embutimento (f_e) x deformação específica (ϵ).



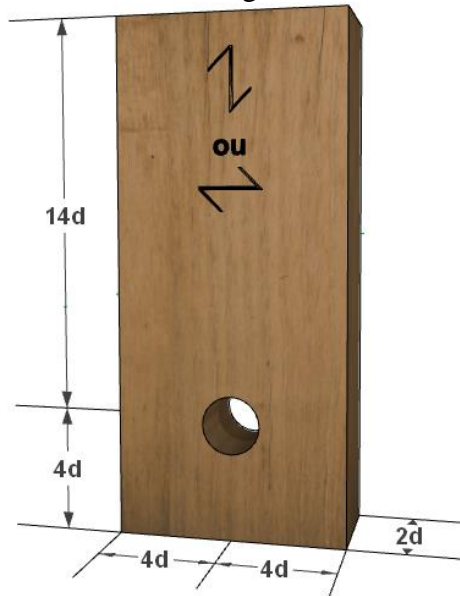
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Para determinação da deformação específica 2‰ deve-se dividir os valores do deslocamento do pino metálico na madeira (em milímetros), pela base de referência 14.d (14 vezes o diâmetro do pino), gerando um valor adimensional.

Os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e, para ensaios na direção paralela às fibras, devem possuir forma prismática, de seção retangular, com dimensões de 8.d (oito vezes o diâmetro do pino) de largura, 2.d (duas vezes o diâmetro do pino) de espessura e comprimento ao longo das fibras de 18.d (dezoito vezes o diâmetro do pino). As mesmas dimensões são utilizadas para os corpos-de-prova para ensaios de embutimento na direção perpendicular ou normal às fibras. A Figura 4 mostra as dimensões dos corpos de prova para

ensaios de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo norma brasileira. Segundo a norma brasileira, para a determinação da resistência ao embutimento, as medidas dos lados dos corpos-de-prova, durante sua confecção, devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Figura 4: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo norma brasileira.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Dependendo do diâmetro do pino metálico, a confecção do corpo-de-prova, para os ensaios na direção perpendicular às fibras, é dificultada, pois é difícil encontrar peças de madeira largas o suficiente, para retirar corpos-de-prova de forma que comprimento fique na direção perpendicular às fibras (ALMEIDA, 2015; MOLINA et al., 2020).

2.1.1.1 Correção da resistência ao embutimento pela umidade

A norma brasileira propõe que a resistência ao embutimento seja corrigida, nos casos em que os corpos-de-prova possuírem teores de umidade diferentes de 12%, estando os corpos de prova entre 10% e 20%, de umidade no momento do ensaio. Esta correção é feita através da Equação 2.

$$f_{e,12} = f_{e,u} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2)$$

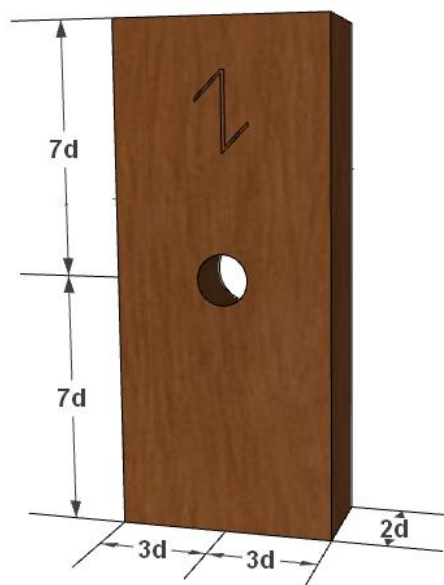
2.1.2 Norma europeia EN 383 (2007)

O EUROCODE 5 (2004), propõe a utilização do documento normativo EN 383 (2007) para determinação da resistência ao embutimento da madeira. Para isso, o documento propõe que a resistência ao embutimento (f_e) seja dada pela razão entre a máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que provoca o deslocamento relativo, entre o pino metálico e a madeira, de 5 mm (F_{5mm}), pelo produto entre a espessura do corpo-de-prova (t), e o diâmetro do parafuso (d), conforme a Equação 3.

$$f_e = \frac{\text{maior valor entre } (F_{m\acute{a}x} \text{ ou } F_{5mm})}{t \cdot d} \quad (3)$$

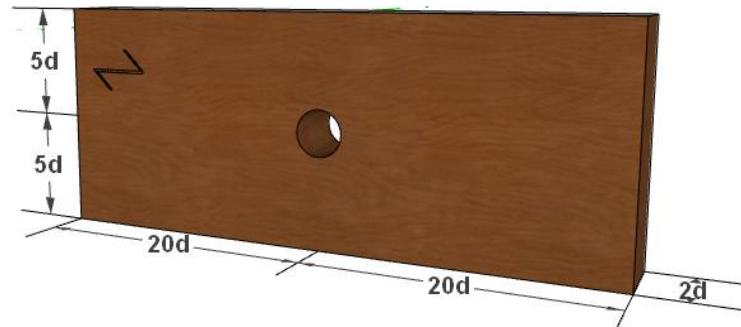
Os corpos-de-prova, para os ensaios na direção perpendicular e paralela às fibras, são diferentes entre si. Para o ensaio na direção perpendicular às fibras, os corpos-de-prova devem ter forma prismática, de seção retangular, com dimensões de 10.d (dez vezes o diâmetro do pino) de largura, 2.d (duas vezes o diâmetro do pino) de espessura e comprimento de 40.d (quarenta vezes o diâmetro do pino). Para o ensaio na direção paralela às fibras, os corpos-de-prova devem ter forma prismática, de seção retangular, com dimensões de 6.d (seis vezes o diâmetro do pino) de largura, 2.d (duas vezes o diâmetro do pino) de espessura e comprimento de 14.d (catorze vezes o diâmetro do pino). As Figuras 5 e 6 mostram as dimensões dos corpos de prova para ensaios de resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, segundo norma europeia.

Figura 5: Dimensões do corpo de prova para os ensaios de resistência ao embutimento segundo norma europeia, para direção paralela às fibras;



Fonte: Adaptado da EN 383 (2007).

Figura 6: Dimensões do corpo de prova para os ensaios de resistência ao embutimento segundo norma europeia, para direção perpendicular às fibras.

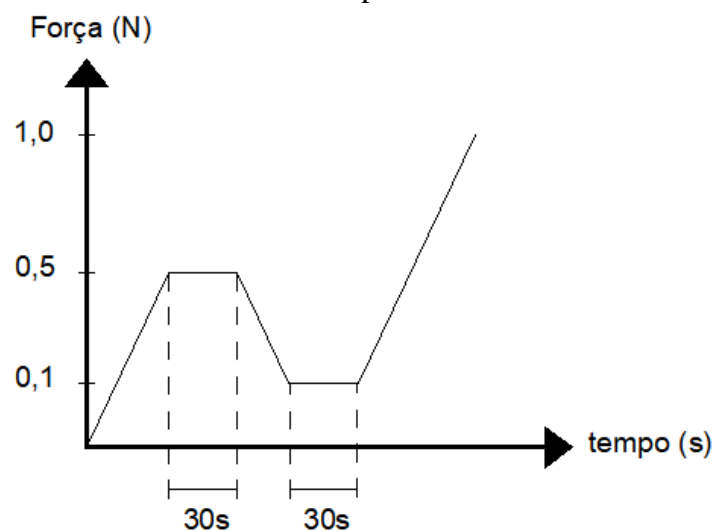


Fonte: Adaptado da EN 383 (2007).

Inicialmente deve-se realizar um ensaio para estimar a resistência ao embutimento ($f_{e,est}$), através da realização de um ensaio em corpo-de-prova gêmeo, o qual deve ser do mesmo lote da amostra a ser ensaiada, até que ocorra o deslocamento de 5 mm no pino metálico na madeira.

Após conhecer a resistência estimada, deve-se iniciar os ensaios, de forma que seja aplicado um carregamento de 40% do valor da resistência estimada ($f_{e,est}$), mantendo este por 30 segundos, liberando a carga até 10% do valor da resistência estimada ($f_{e,est}$), e novamente mantendo por 30 segundos. Por fim, deve-se realizar um carregamento até ocorrer a ruptura do corpo do prova, ou então até que haja um deslocamento de 5 mm do pino metálico na madeira, o que ocorrer primeiro. A Figura 7 mostra o diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento segundo a norma europeia.

Figura 7: Diagrama de ciclo de carregamento para ensaio de embutimento segundo a norma europeia



Fonte: Adaptado de EN 383 (2007).

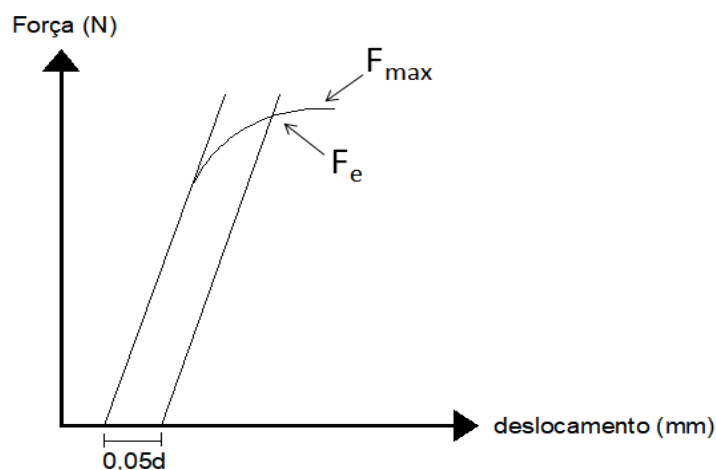
2.1.3 Norma americana ASTM D5764 (2007)

Pela norma americana ASTM D5764 (2007), a resistência da madeira ao embutimento é dada através da razão entre a força que causa um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino metálico ($F_{5\%}$), pela área de embutimento da madeira. A área de embutimento é o produto entre o diâmetro do pino (d) e a espessura da peça de madeira (t). A Equação 4 mostra a forma de obtenção da resistência ao embutimento, conforme a norma americana.

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t \cdot d} \quad (4)$$

Diferente das outras normas, na norma americana não há realização de ciclos de carregamento. A única recomendação é que seja aplicado um carregamento constante com velocidade de 1,0 m/min, durante o deslocamento, até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova. A Figura 8 mostra o gráfico de força pelo deslocamento do pino, para obtenção da resistência ao embutimento.

Figura 8: Gráfico de Força (N) x Deslocamento (mm)

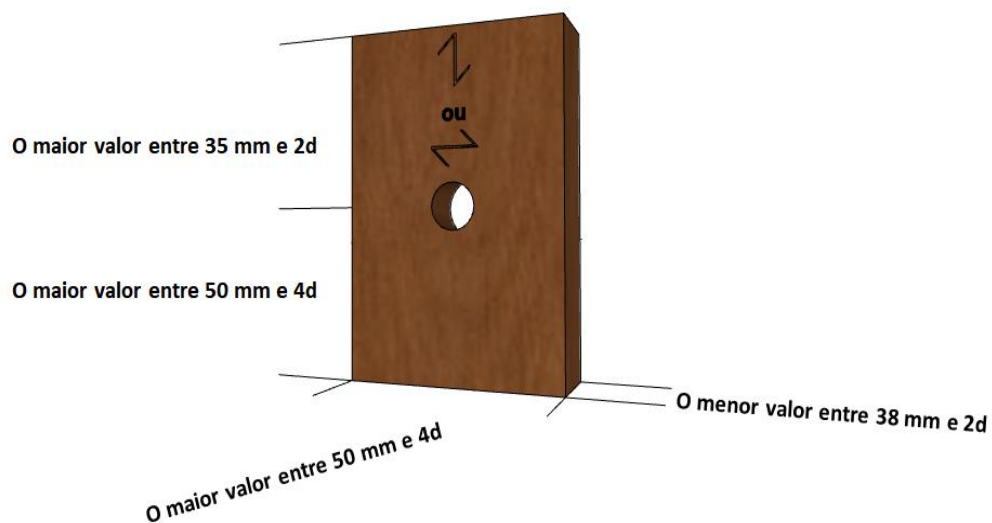


Fonte: Adaptado de ASTM D5764 (2007).

Segundo essa norma, os corpos-de-prova devem seguir a seguinte metodologia, tanto para os ensaios na direção paralela ou perpendicular às fibras: os corpos-de-prova devem possuir formato prismático retangular com furo na sua face; sua largura deve ser o maior valor

entre 50 mm ou 4.d (quatro vezes o diâmetro do pino), a espessura deve ser o menor valor entre 38 mm ou 2.d (duas vezes o diâmetro do pino), a dimensão da base inferior até o centro do furo deve ser o maior valor entre 50 mm ou 4.d (quatro vezes o diâmetro do pino) e a dimensão do centro do furo até a base superior deve ser o maior valor entre 25 mm ou 2.d (duas vezes o diâmetro do pino). A Figura 9 ilustra as dimensões do corpo-de-prova nas direções normal e paralela às fibras, segundo a norma americana.

Figura 9: Dimensões do corpo-de-prova nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo a norma americana.



Fonte: Adaptado de ASTM D5764 (2007).

2.2 MÉTODOS ANALÍTICOS NORMALIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO

A seguir são apresentados os métodos de determinação analítica da resistência de madeira ao embutimento, por meio de equacionamentos, considerando os diversos parâmetros da madeira, proposto por cada norma.

2.2.1 Norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997)

Pela norma brasileira, é possível obter as resistências analíticas ao embutimento na direção paralela (f_{e0}) e na direção normal (f_{e90}), através de uma correlação com a resistência à compressão paralela às fibras. No caso da resistência o embutimento na direção perpendicular às fibras, é feito um ajuste utilizando um fator de correção (α_e), sendo este um valor adimensional, sendo que os valores, neste caso, variam conforme o diâmetro do pino e podem ser visualizados na Tabela 1. As equações para obtenção da resistência ao embutimento

analítico, nas direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, estão descritos nas Equações 5 e 6. O valor analítico da resistência ao embutimento é dado em MPa.

Tabela 1: Valores de α_e conforme o diâmetro do pino.

Diâmetro do pino (cm)	Fator α_e (adimensional)
$\leq 0,62$	2,50
0,95	1,95
1,25	1,68
1,60	1,52
1,90	1,41
2,20	1,33
2,50	1,27
3,10	1,19
3,80	1,14
4,40	1,10
5,00	1,07
$\geq 7,50$	1,00

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (5)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (6)$$

2.2.2 Norma europeia EN 383 (2007)

Para a norma europeia, obtém-se a resistência analítica ao embutimento através da Equação 7. Essa equação é utilizada para parafusos com até 30 mm de diâmetro, e para forças aplicadas com ângulos α ($\alpha = 90$ para força perpendicular às fibras), em peças com pré-furação. A unidade de medida do valor da resistência analítica ao embutimento ($f_{h,\alpha,k}$) é MPa.

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

Para determinar o valor da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ($f_{h,0,k}$) utiliza-se a Equação 8. O cálculo desta equação leva em conta a densidade

característica da madeira (ρ_k) e o diâmetro do pino metálico (d). A unidade de medida de $f_{h,0,k}$ é MPa.

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

O valor do fator k_{90} é obtido através da Equação 9 ou 10. Para madeiras macias (coníferas) utiliza-se a Equação 9 e para madeiras duras (dicotiledôneas) utiliza-se a equação 10. A unidade de medida de k_{90} é milímetros.

Nas Equações 8, 9 e 10 as unidades de medidas utilizadas para o pino metálico e para a densidade aparente da madeira são, respectivamente, milímetros e kg/m^3 .

2.2.3 Norma americana ASTM D5764 (2007)

Pela norma americana as resistências analíticas ao embutimento nas direções paralela (f_{e0}) e na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), são dadas a partir das Equações 11 e 12. Estas equações utilizam parâmetros como a densidade aparente da madeira (ρ) e o diâmetro do pino metálico (d) para obtenção da resistência analítica ao embutimento. A unidade de medida da resistência ao embutimento, pelas Equações 11 e 12, é MPa, ou N/mm^2 e as unidades de medidas utilizadas para o pino metálico e para a densidade aparente da madeira são, respectivamente, milímetros e kg/m^3 .

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

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

2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Atualmente, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica destacam-se *softwares* específicos como o ANSYS. Esse *software* tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF) que possibilita reproduzir numericamente o comportamento dos elementos estruturais e até mesmo das estruturas evitando-se custos inerentes à realização de ensaios experimentais (MOLINA, 2008). A simulação numérica permite a análise detalhada dos aspectos de interesse como, por exemplo, a concentração de tensões nas regiões próximas nas regiões mais solicitadas do elemento analisado, o que não é possível de se observar claramente nos ensaios experimentais. A maioria das simulações numéricas observadas na literatura envolvendo as estruturas de madeira são efetuadas a partir da consideração de uma análise linear elástica. Neste caso, os

resultados são válidos na medida em que as deformações plásticas dos materiais são pequenas (GOMES, 2018).

2.3.1 Método dos elementos finitos

O método propõe que o domínio a ser analisado seja substituído por um número limitado de elementos de comportamento bem definido (elementos finitos). Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós. O conjunto de elementos e nós recebe o nome de malha.

Assim pode-se determinar a deformação de uma estrutura a partir do deslocamento dos nós. A partir dos deslocamentos nodais é possível determinar as tensões, esforços internos e avaliar a resistência estrutural do objeto (FILHO, 2013).

A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Em outras palavras, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (MIRLISENNA, 2016).

2.3.2 Etapas da simulação numérica

De forma geral uma simulação numérica é dividida em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

O pré-processamento é responsável por definir a geometria do modelo, dividir a geometria em elementos finitos, selecionar o tipo de elemento finito a ser utilizado, definir as características e propriedades dos materiais, definir as cargas atuantes no modelo e as restrições impostas pelos apoios.

A solução é a etapa onde é realizada a solução das equações diferenciais em cada nó. Nesta etapa o tempo de processamento e o esforço computacional são proporcionais ao grau de refinamento da malha (número de divisões da malha), definido na etapa de pré-processamento.

O pós-processamento consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos. Nesta etapa o programa fornece várias ferramentas para interpretação dos resultados como valores de deformações, deslocamentos, entre outros.

2.3.3 Critérios de ruptura para os materiais envolvidos no modelo

A grande maioria dos trabalhos científicos, principalmente nacionais, que abordam o tema de modelagem numérica, propõem formas simplificadas de análise sem considerar os critérios de ruptura a ser considerado. Esses trabalhos, na grande maioria, restringem o comportamento das estruturas a limites linearmente elásticos. Porém, as tensões e deformações geradas pelas solicitações externas frequentemente excedem os limites elásticos dos materiais e, portanto, a resposta estrutural dos materiais não deve ser estudada como linearmente elástica (MOLINA e CALLIL JUNIOR, 2009).

A finalidade de um critério de ruptura é estabelecer um padrão capaz de prever a condição de ruptura de um material sob qualquer tipo de combinação de tensões, ou seja, através destes critérios é possível interpretar os casos de solicitações combinadas, partindo-se de um número restrito de parâmetros do material (NICOLAS, 2006).

De forma geral, a definição de um critério de ruptura, leva em conta os estímulos mecânicos (tensões aplicadas no material) que induzem a ruptura e a identificação da resposta do material a estes estímulos, quando há uma descontinuidade na resposta do material, interpreta-se como ocorrência de uma falha (NICOLAS, 2006).

Como há uma variedade de materiais utilizados na engenharia, e também nos modelos numéricos, não se pode adotar um único critério, além de que certos materiais não se enquadram em nenhum dos critérios conhecidos, como, por exemplo, os materiais não homogêneos, como o concreto armado, e os materiais anisotrópicos, como a madeira.

Vários critérios de ruptura foram elaborados, cada um específico para determinado material, sendo que os mais conhecidos são os critérios de: Rankine, Tresca, von Mises, Mohr-Coulomb, Hill, Tsai-Hill, Norris, Hoffman, Tsai e Hill (NICOLAS, 2006).

2.3.3.1 Critério de ruptura para o aço conector

Molina (2008) adotou na modelagem de conectores de cisalhamento para estruturas mistas de madeira e concreto um modelo bi-linear, com encruamento isótropo, e critério de plastificação de von Mises. O critério de ruptura de von Mises, também conhecido como critério da máxima energia de distorção é baseado em conceitos de energia de deformação, e é frequentemente utilizado para simular o comportamento de materiais dúcteis e isotrópicos. A caracterização do comportamento isotrópico admitido para do aço exigiu a utilização de quatro constantes: E (Módulo de elasticidade), σ_p (tensão de plastificação), E_T (módulo tangente) e ν (coeficiente de Poison).

Neste modelo a energia elástica total do sistema é dividida em duas partes: uma associada a mudanças volumétricas do material e a outra causando distorções por cisalhamento. Igualando-se a energia de cisalhamento no ponto de escoamento à tração simples, com aquela sob tensão combinada, é estabelecido o critério de escoamento para a tensão combinada (NICOLAS, 2006).

2.3.3.2 Critério de ruptura para a madeira

De forma geral, o critério de Hill é uma extensão do critério de von Mises (critério da máxima energia de distorção), e considera a anisotropia dos materiais, onde a ruptura do material independe das tensões hidrostáticas e considera, neste caso, uma regra de fluxo associada, um endurecimento de trabalho, junto com diferentes tensões de plastificação nas três direções principais do material (MOLINA e CALLIL JUNIOR, 2009).

Dentro deste contexto, para a madeira considera-se, de forma simplificada, a partir do critério de Hill, um comportamento ortotrópico (diferentes propriedades físicas para cada uma das três direções consideradas), associado ao encruamento isótropo. O critério de Hill utilizado para a madeira admite a simetria de resistência, ou seja, mesmo comportamento do material na tração e na compressão.

Molina (2008) na modelagem da madeira a partir do critério generalizado de Hill (1950) utilizou um total de 21 constantes, sendo estas constantes referentes às propriedades elásticas e plásticas do material utilizado.

2.4 TRABALHOS CIENTÍFICOS A RESPEITO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DESENVOLVIDOS NO BRASIL

Oliveira (2001) avaliou os critérios de dimensionamento do documento normativo ABNT NBR7190: 1997 a partir de ensaios experimentais. Neste estudo foi determinada, para cinco espécies diferentes, a resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, através de ensaios com pinos metálicos de diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm. O autor conclui que a norma brasileira ABNT NBR7190 (1997) é a única que utiliza a deformação residual de 2%, e com isso os valores da resistência da ligação são menores do que calculados em outros documentos normativos que consideram uma deformação residual maior.

Almeida (2014) realizou ensaios de embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras de acordo a norma brasileira, europeia e americana. O autor utilizou madeiras das

espécies: Paricá (*Schizolobium amazonicum*), *Pinus elliottii*, *Pinus oocarpa*, Jatobá (*Hymenaea* spp.), *Lyptus* (híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*) e Cupiúba (*Goupia glabra*), com pinos metálicos de 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm. A partir dos resultados obtidos, observou que os valores de resistência ao embutimento foram maiores para o procedimento da norma europeia, seguido pelos valores da norma americana e então brasileira, nesta ordem. O autor concluiu também que a metodologia proposta pela norma europeia, foi mais adequada que a proposta da norma brasileira.

Santos et al (2015) realizaram ensaios de embutimento, nas direções paralela e perpendicular às fibras, para a madeira de *Pinus pinaster* e também realizaram uma simulação numérica, baseada no método de elementos finitos, para comparação com os resultados experimentais. Os resultados experimentais e numéricos apresentaram boas aproximações, porém os autores ressaltam que, para uma boa calibração do modelo numérico, é de suma importância aderir ao modelo numérico o coeficiente de atrito entre o pino metálico e a madeira, pois no referido trabalho, o coeficiente de atrito teve grande influência nos resultados da simulação.

Nos estudos realizados por Molina et al. (2017a) e Molina et al. (2017b) onde foram feitos ensaios de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, conforme as normas brasileira, europeia e americana, com madeiras das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, utilizando um pino metálico de 6,35 mm de diâmetro, houve concordância com os resultados de Oliveira (2001) e Almeida (2014). Os resultados experimentais foram inferiores aos analíticos quando estes foram comparados com a norma brasileira. Utilizando os critérios da norma europeia, os resultados experimentais foram superiores aos analíticos, tanto na direção paralela quanto na direção perpendicular às fibras da madeira, para as duas espécies ensaiadas. Em todos os casos, os resultados obtidos de acordo com as normas europeia e americana foram superiores aos resultados obtidos segundo a norma brasileira. Foi concluído por Molina et al. (2017a, 2017b) que a deformação residual de 2%, utilizada na metodologia da norma brasileira, resulta em valores menores de resistência ao embutimento.

Pallarolas (2017) realizou um estudo analítico, teórico e experimental, baseando-se nas normas brasileira, europeia e americana, com madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, utilizando pinos metálicos (pregos) com diâmetro de 6,5 mm. O autor concluiu que houve uma grande diferença entre os valores experimentais de resistência ao embutimento obtidos através das normas quando comparados entre si. Também concluiu que os valores analíticos calculados superestimam a resistência ao embutimento experimental para todas as normas. O

autor realizou ainda uma análise estatística associada ao método bent cable para estimar o valor da resistência ao embutimento da madeira como também a parte não linear da curva obtida como resposta do ensaio experimental.

Terrin, et al (2018) realizaram ensaios experimentais de resistência ao embutimento conforme a norma europeia com as madeiras de Caixeta (*Tabebuia cassinoies*), Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Itaúba (*Mazilaurus itauba*), com utilização de seis diâmetros diferentes de pinos metálicos (3, 6, 8, 10, 12 e 16 milímetros). Os autores concluíram que a resistência ao embutimento, obtida de maneira experimental, decresceu com o aumento do diâmetro do pino metálico. Os autores também concluíram que a norma europeia possui uma metodologia para determinação da resistência analítica ao embutimento melhor que a norma brasileira, sendo que para a norma brasileira, quanto menor o diâmetro do pino metálico, mais subestimada é a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras. Segundo os autores, é prejudicial à utilização da resistência à compressão paralela às fibras como único parâmetro para realizar a estimativa da resistência ao embutimento da madeira.

Molina et al (2020) realizaram um estudo, comparando os resultados analíticos e experimentais, conforme as normas brasileira, europeia e americana, com madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, utilizando pregos com diâmetro de 6,35 mm. Os autores concluíram que, em geral, a norma europeia resultou em valores experimentais de resistência ao embutimento superiores aos resultados obtidos segundo as normas brasileira e americana, sendo que essa superioridade nos valores experimentais foi observada para as direções paralela e perpendicular às fibras, para ambas as madeiras (*Pinus elliottii* ou *Eucalyptus saligna*). Os autores também concluíram que os valores de deslocamento usados pelas normas brasileira e americana, para determinar a força de embutimento experimental, foram valores próximos e resultam em baixas forças de embutimento, quando comparados à norma europeia. Por fim os autores recomendaram, para o processo de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), a adoção da metodologia da norma europeia para determinar a resistência ao embutimento da madeira. Também recomendaram a adoção de pinos metálicos com diâmetros iguais ou superiores a 10 mm para os ensaios de embutimento.

2.5 TRABALHOS CIENTÍFICOS A RESPEITO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DESENVOLVIDOS NO EXTERIOR

Schoenmakers et al (2010) realizaram ensaios de embutimento, conforme a norma europeia, para determinação resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras, utilizando uma madeira da espécie *Picea Abies* e pinos metálicos de 8 mm e 16 mm de diâmetro, variando a distância entre o parafuso e a borda carregada, para avaliar se este parâmetro tem influência na determinação da resistência ao embutimento. Os autores concluíram que o embutimento é um fenômeno local, que não depende da distância da borda carregada e quanto maior o diâmetro do pino metálico, menor a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras.

Sandhaas et al. (2013) realizaram ensaios de embutimento na direção paralela às fibras, segundo o método da EN 383, com as madeiras de *Picea Abies*, *Fagus sylvaticak*, *Lophira alata*, *Peltogyne sp.* e *Dipteryx odorata* (Cumaru), utilizando pinos metálicos de duas diferentes classes de resistência. Os autores concluíram que os pinos metálicos com maior limite de escoamento (acima de 700 MPa) resultaram em maiores valores de resistência ao embutimento quando comparados com pinos metálicos com menor limite de escoamento (entre 400 MPa e 600 MPa).

Xu et al (2014) analisaram os comportamentos das ligações metálicas (pino metálico de 16 mm) submetidas à forças de embutimento paralelas, perpendiculares e a 45° às fibras, através de comparações numéricas (baseada no método de elementos finitos) e experimentais. Na direção paralela às fibras as curvas numérica e experimental foram similares durante a fase elástica da madeira, porém no período plástico da madeira a curva numérica superestimou os valores experimentais. Houve uma boa correlação, no sentido perpendicular às fibras, entre as curvas experimentais e numéricas. Na situação em que a carga foi aplicada a 45 ° em relação às fibras, o modelo numérico mostrou uma tendência semelhante às curvas experimentais, mas subestimou a ductilidade da madeira. Os autores concluíram que a modelagem numérica foi satisfatória para simular o comportamento não-linear de ligações da madeira. Os autores também concluíram que o modelo foi capaz de simular a rigidez e a carga de ruptura das ligações juntas e prever a posição potencial da ruptura. Além disso, o modelo pode identificar com eficiência a localização do crescimento inicial da trinca.

Málaga-Chuquitaype et al (2016), estudaram o comportamento do embutimento na madeira, nas direções paralela e perpendicular às fibras, da espécie de madeira de Abeto Escandinavo (*Picea abies*), com utilização de pinos metálicos diâmetros de 12 mm e 16 mm. Os autores realizaram uma abordagem experimental e numérica. Através da simulação

numérica, os autores observaram uma grande concentração de tensões na madeira ao redor do pino metálico, onde houve uma tendência de aglomeração das tensões se alinhando na direção paralela às fibras. Por fim os autores concluíram que houve uma boa concordância entre a resposta experimental e as simulações numéricas.

2.6 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É fundamental o estudo e o entendimento do comportamento das ligações das estruturas de madeira, pois possibilita a realização de estruturas mais seguras e com menores custos.

A norma brasileira utiliza critérios diferentes assim como corpos-de-prova diferentes para a determinação da resistência ao embutimento quando comparada com as normas europeia e americana. A norma brasileira define a resistência ao embutimento com base na deformação específica (adimensional) causada pelo contato do pino na madeira, enquanto que as normas europeia e americana definem a resistência ao embutimento em função de valores em milímetros. Dessa forma, observa-se que o modelo da norma brasileira não é o mais adequado, pois na prática, muitas vezes, conduz a um número excessivo de conectores, e também impede o estabelecimento de conclusões gerais por não permitir uma comparação direta entre os resultados obtidos com as demais normas citadas em função de deslocamentos em milímetros.

A maioria dos trabalhos analisados na literatura, principalmente os trabalhos nacionais, tratam de abordagens experimentais para determinação da resistência ao embutimento da madeira. Poucos trabalhos utilizam simulações numéricas para avaliação da distribuição de tensões nas regiões de contato entre o pino e a madeira e para a determinação da resistência ao embutimento. Além disso, a maioria dos modelos utiliza análises simplificadas com base em modelos lineares.

Com a utilização de simulações numéricas é possível observar a concentração de tensões no interior da madeira, o qual não é possível observar nos ensaios experimentais. Com uma boa calibração do modelo numérico é possível prever o comportamento da madeira, mediante aos esforços de embutimento.

A resistência calculada analiticamente pela norma brasileira é obtida de maneira diferente para cada uma das direções das fibras. Na direção paralela às fibras, a norma brasileira iguala a resistência ao embutimento com a resistência a compressão nesta direção. Na direção perpendicular às fibras, além da resistência a compressão paralela às fibras, um coeficiente relacionado ao diâmetro do pino metálico também é utilizado. Por outro lado, as

normas europeia e americana levam em consideração a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico para o cálculo analítico da resistência da madeira ao embutimento.

3 METODOLOGIAS: EXPERIMENTAL, ANALÍTICA E NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentadas as informações referentes aos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizadas três espécies de madeiras de reflorestamento, sem tratamento preservativo, para realização dos ensaios de embutimento.

As espécies de madeira utilizadas foram a Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), o Cedro Indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*) e o Cedro Australiano (*Toona ciliata*). Todas as madeiras utilizadas apresentavam, durante o ensaio, um teor de umidade aproximado de $12\% \pm 1\%$. A escolha destas espécies baseou-se no fato da abrangência de classes de resistência definidas pela ABNT NBR 7190 (1997) e também devido à disponibilidade destas espécies na região de Itapeva – SP. Para a realização dos ensaios em corpos-de-prova foram utilizados pregos com diâmetro de 6,72 mm com tensão de escoamento de 600 MPa e pinos metálicos lisos com diâmetro de 10 mm e tensão de escoamento de 500 MPa.

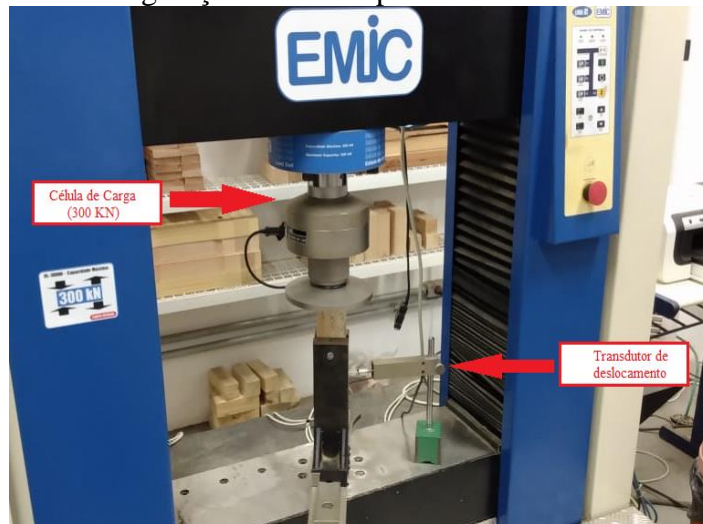
3.1.1 Amostras

Os corpos-de-prova foram confeccionados conforme cada norma específica. Foram confeccionados seis corpos-de-prova para cada espécie de madeira, direção das fibras, norma específica e diâmetro do pino, totalizando 216 ensaios em corpos-de-prova para realização dos ensaios de embutimento. Após a confecção, os corpos-de-prova ficaram por 90 dias em uma sala climatizada para estabilizarem a umidade relativa em $12 \pm 1\%$.

3.1.2 Equipamentos utilizados

Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando a máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL30000, com atuador servo hidráulico com capacidade de 300 KN (30.00 Kgf). A referida máquina de ensaios possui um sistema de aquisição de dados totalmente informatizado. A quantificação dos deslocamentos e deformações nos ensaios de embutimento foi feita por um transdutor de deslocamentos externo, do tipo LVDT, com percurso máximo de 10 mm, sendo este um acessório próprio da EMIC. A Figura 10 mostra a configuração da EMIC para os ensaios de embutimento.

Figura 10: Configuração da EMIC para os ensaios de embutimento.



Fonte: O Autor.

Foi utilizada uma balança eletrônica OHAUS, modelo “Adventurer”, com parâmetros: peso máximo de 3100 g, peso mínimo de 0,5 g, divisão mínima de 0,01 g, erro de $\pm 0,1$ g, para aferição da massa dos corpos de prova. As medidas das dimensões dos corpos-de-prova foram realizadas utilizando um paquímetro com leitura digital com erro de $\pm 0,01$ mm.

A Figura 11a mostra a aferição das dimensões do corpo-de-prova e a Figura 11b mostra a aferição da massa do corpo-de-prova.

Figura 11: Quantificação das informações para os corpos de prova: (a) Aferição das dimensões do corpo-de-prova; (b) Aferição da massa do corpo-de-prova.



(a)



(b)

Fonte: O Autor.

A máquina de ensaios e os instrumentos de medida encontram-se disponíveis no Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP, Campus Itapeva, local este onde toda a pesquisa foi desenvolvida.

3.2 MÉTODOS: ANALÍTICO E EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentadas as informações para determinação da resistência ao embutimento de forma experimental e de forma analítica, conforme as normas brasileira, europeia e americana.

3.2.1 Caracterização da madeira

Para o cálculo analítico das resistências de embutimento e para alimentação dos dados para a simulação numérica, foi necessária à caracterização das espécies de madeiras utilizadas neste trabalho.

Foram determinadas as resistências à compressão paralela (f_{c0}) e perpendicular às fibras (f_{c90}), o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), a resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}), a densidade aparente (ρ_{ap}) e a umidade (U%) da madeira, para realização de uma caracterização mínima.

Após a confecção dos corpos-de-prova de caracterização das madeiras, estes foram pesados para a determinação de sua massa inicial (m_u) e, posteriormente, submetidos à secagem em estufa a $103^\circ\text{C} \pm 1$, para obtenção de suas massas secas (m_s). Com estes valores de massas obtidos foi possível calcular os teores de umidade de todas as madeiras dos corpos de prova dos ensaios de embutimento. Os teores de umidade das madeiras foram obtidos, neste caso, através da Equação 13 e sua unidade de medida foi dada em porcentagem (%).

$$U\% = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

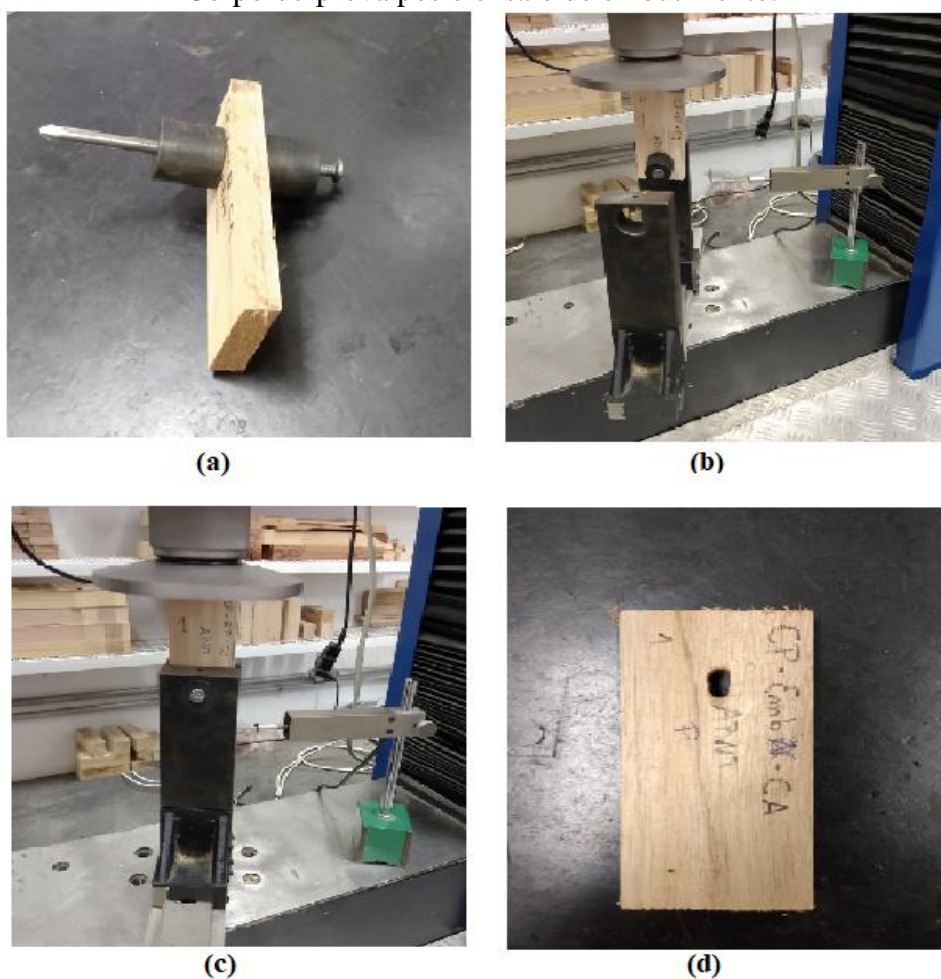
Toda a caracterização física e mecânica das madeiras utilizadas foi realizada de acordo com as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997) “Determinação das Propriedades das Madeiras para Projeto de Estruturas”. Para cada ensaio, foram confeccionados um total de 6 corpos-de-prova de umidade e densidade, isentos de defeitos e estes foram retirados das mesmas peças que foram usadas para realização dos ensaios de embutimento.

3.2.2 Ensaios de embutimento

Os corpos-de-prova, para os ensaios de embutimento, nas direções paralela e perpendicular às fibras, foram confeccionados de acordo com as normas ABNT NBR 7190 (1997), EN 383 (2007) e ASTM D5764 (2007), citados nos itens 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3.

Nas situações em que foi necessária a realização de mais de um ciclo de carregamento, foi confeccionado um corpo de prova adicional para estimar, preliminarmente, a resistência ao embutimento, como foi o caso das normas ABNT NBR 7190 (1997) e EN 383 (2007). A Figura 12 mostra os detalhes do ensaio de embutimento sendo realizado na Máquina Universal de Ensaio EMIC.

Figura 12: Detalhes do ensaio de embutimento: (a) Inserção do pino metálico; (b) Corpo-de-prova acoplado no suporte de ensaio da EMIC; (c) Realização do ensaio de embutimento; (d) Corpo-de-prova pós o ensaio de embutimento.



Fonte: O Autor.

3.2.3 Resistência analítica da madeira ao embutimento

Na seção 2.2 foi exemplificado todos os procedimentos para determinação analítica da resistência de madeira ao embutimento, nas direções paralela e perpendicular às fibras (f_{e0} e f_{e90}), os quais utilizam diversos parâmetros, todos estes parâmetros estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento, conforme cada norma.

Norma	f_{e0}	f_{e90}
ABNT NBR 7190:1997	f_{c0}	f_{c0}, α_c
EN 383: 2007	d, ρ_k	d, ρ_k, k_{90}
ASTMD5764 (2007)	ρ	d, ρ

Fonte: O Autor.

f_{c0} = resistência a compressão paralela às fibras;

α_c = fator de correção em relação ao diâmetro do pino metálico;

d = diâmetro do pino;

ρ_k = densidade aparente característica;

k_{90} = parâmetro referente ao tipo de madeira (conífera ou dicotiledônea);

ρ = densidade aparente.

Segundo a norma brasileira, para a determinação analítica de f_{e90} utiliza-se o parâmetro α_c . Esse parâmetro está relacionado ao diâmetro do pino metálico (vide Tabela 1). Foi realizada uma interpolação linear para determinação deste parâmetro para os pinos utilizados neste trabalho até o momento, sendo obtido, neste caso, o valor de $\alpha_c = 2,41$, para o pino de 6,72 mm. Para a determinação de f_{e0} , segundo a norma brasileira, foram utilizados os valores da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), determinados a partir dos ensaios de caracterização da madeira, conforme mencionado na seção 3.2.2.

A densidade aparente (ρ) e a densidade aparente característica da madeira (ρ_k) utilizadas nas normas americana e europeia, respectivamente, foram também obtidas através da caracterização das madeiras.

Para o cálculo do parâmetro k_{90} , utilizado na norma europeia, foram considerados o Cedro Indiano e o Cedro Australiano como madeiras menos densas e a Garapeira como madeira mais densa.

A partir dos valores de resistência ao embutimento analítica experimental foi feita uma comparação entre os resultados obtidos para observação da tendência dos mesmos.

3.2.4 Análise estatística

Para verificar se há diferença significativa entre os valores experimentais e analíticos será utilizado um processo estatístico de comparação de médias denominado teste Tukey.

O teste Tukey é um dos testes mais utilizado para comparação entre duas médias. Ele consiste em comparar todos os possíveis pares de médias e se baseia na diferença mínima

significativa (DMS), considerando os percentis do grupo. A DMS representa o menor valor que a estimativa deve apresentar para que se possa considera-lo significativo.

Para a realização desta análise será utilizado o *software Minitab* versão 19. Dessa forma serão informados os valores das resistências experimentais ao embutimento de cada corpo de prova, o valor da resistência analítica o nível de significância adotado (5%). O *software* irá fornecer os valores de p (p value), se esses valores forem maiores que o nível de significância adotado (5%), significa que a diferença entre os valores analíticos e experimentais não foi significativa. Por outro lado, para p-value menor que o nível de significância, há diferença significativa entre os valores analíticos e experimentais de resistência de embutimento.

3.3 MÉTODOS: NUMÉRICA

Nesta seção são apresentados os modelos numéricos tridimensionais confeccionados neste trabalho.

Foi utilizado o software ANSYS, versão 20.0, que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF), para produzir os modelos numéricos.

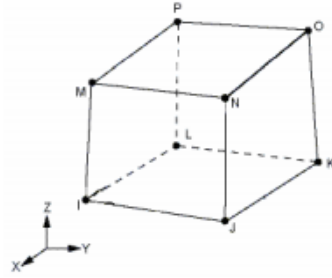
Esses modelos buscam simular o comportamento dos corpos de prova nos ensaios experimentais de embutimento, realizados para cada uma das normas avaliadas, neste trabalho.

Foram produzidos um total de seis modelos numéricos, sendo estes relativos às normas europeia, brasileira e americana, nas direções paralela e perpendicular às fibras, para o pino de 6,72 milímetros, considerando a madeira de Cedro Australiano.

Na construção dos modelos foram considerados basicamente dois tipos de materiais: o corpo de prova prismático de madeira e o conector do tipo pino metálico com seção circular. Em cada elemento do conjunto foi utilizada uma discretização diferente de malha como diferentes propriedades para os materiais.

Os elementos utilizados nos modelos para representação dos comportamentos da madeira e do conector de aço foram aqueles disponíveis na biblioteca interna do ANSYS Para a discretização da madeira e do conector metálico foi utilizado o elemento solid45. Este elemento foi escolhido por sua representatividade perante o comportamento a ser simulado. O solid45 consiste em um elemento hexaédrico, com oito nós, e três graus de liberdade por nó (translações segundo os eixos x, y e z) e permite a implementação de propriedades importantes para os modelos como a plasticidade e ortotropia para os materiais envolvidos. A Figura 13 mostram os detalhes do elemento solid45.

Figura 13: Elemento finito solid45.



Fonte: Documentação do ANSYS

A calibração dos modelos foi realizada com base nas curvas força versus deslocamento vertical obtidas nos ensaios experimentais de embutimento. Considerou-se como referência para obtenção das curvas numéricas o ponto na peça de madeira onde o transdutor de deslocamento (LVDT) foi posicionado durante a realização dos ensaios experimentais, conforme Figura 14.

Figura 14: Ponto de referência para calibração dos modelos.



Ponto de medida dos deslocamentos



Detalhe do transdutor de deslocamento (LVDT)

Fonte: O Autor.

As propriedades elásticas e plásticas utilizadas nas simulações foram obtidas através dos ensaios experimentais de caracterização dos materiais.

As sequências de comandos utilizados nas simulações deste trabalho foram escritas em forma de scripts, permitindo-se assim a geração e análise automática dos modelos, com possibilidade de alteração e correção posterior dos comandos caso necessária.

Os modelos da norma europeia foram tomados como referência neste trabalho por apresentarem os melhores resultados experimentais quando comparados com o modelo analítico para determinação das resistências de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Na sequência estão apresentados os principais detalhes e os aspectos mais relevantes das estratégias de modelagem utilizadas para a construção dos modelos.

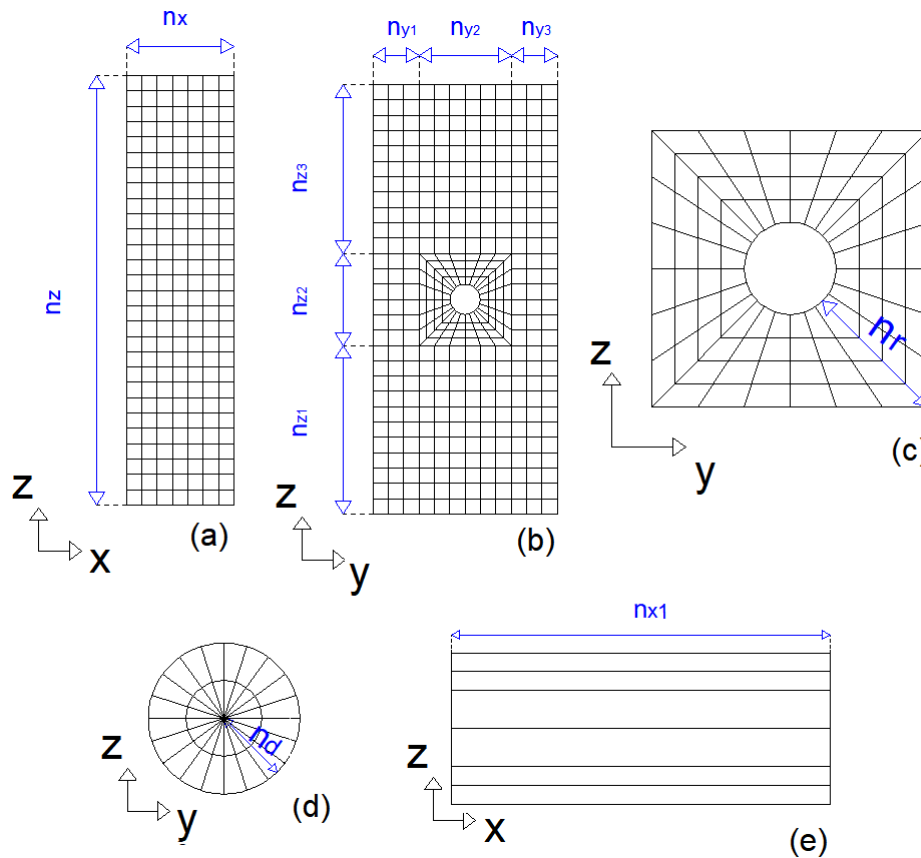
3.3.1 Definição da malha

As malhas de elementos finitos foram geradas e discretizadas no próprio ANSYS. A madeira e o conector metálico foram gerados de formas separadas, porém, nas regiões dos furos dos corpos de prova, as discretizações das malhas, do pino e da peça de madeira, consideraram nós coincidentes na interface de contato entre os mesmos. Essa estratégia foi utilizada para evitar problemas de convergência durante o processamento dos modelos.

O processo de refinamento das malhas foi feito até que os resultados obtidos pelas simulações, em termos de deslocamentos e deformações, fossem satisfatórios. Foram testados, em média, três níveis de refinamento para as malhas dos modelos construídos.

O refinamento das malhas, em cada uma das direções x , y e z , foi definido por nove principais parâmetros, sendo que esses parâmetros determinaram o número de divisões realizadas em cada direção de interesse do corpo de prova. A Figura 15 apresenta os referidos parâmetros utilizados na confecção do modelo de corpo de prova segundo a norma europeia, para a direção paralela às fibras da madeira. Esta estratégia de construção e refinamento da malha foi também considerada para os demais modelos numéricos referentes às demais normas analisadas neste trabalho. Vale mencionar ainda que, para evitar que o texto ficasse repetitivo, optou-se pela apresentação dos principais detalhes relativos às estratégias de modelagem numérica dos modelos de corpos de prova das normas americana e brasileira e o detalhamento completo da estratégia de modelagem usada para o corpo de prova da norma europeia para a direção paralela às fibras.

Figura 15: Parâmetros utilizados na definição das malhas dos modelos de embutimento: (a) (b) e (c) Parâmetros para a peça de madeira; (d) e (e) Parâmetros referentes ao pino metálico.



Fonte: O Autor.

onde:

n_x = número de elementos na direção da espessura da peça de madeira;

$n_{x,1}$ = número de elementos na direção do comprimento do conector metálico;

$n_{y,1}$ = número de elementos na direção da largura da peça de madeira;

$n_{y,2}$ = número de elementos na direção da largura da peça de madeira, na região ao redor do furo;

$n_{z,1}$ = número de elementos na direção da altura da peça de madeira, na região superior do corpo de prova;

$n_{z,2}$ = número de elementos na direção da altura da peça de madeira na região ao redor do furo;

$n_{z,3}$ = número de elementos na direção da altura da peça de madeira, na região inferior do corpo de prova;

n_r = número de elementos na região ao redor do furo da peça de madeira e na direção do raio do conector metálico;

n_d = número de elementos na direção da espessura ou raio do conector metálico.

A Tabela 3 apresenta as configurações de malha testadas para o modelo de corpo de prova da norma europeia para direção paralela às fibras.

Tabela 3: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma europeia para a direção paralela às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 2}$	n_r	n_d
m1	4	28	2	6	8	6	8	3	1
m2	5	35	3	6	9	6	9	3	2
m3	6	42	3	6	11	6	11	4	3

Fonte: O Autor.

A malha m3 foi a mais discretizada e apresentou os melhores resultados e foi considerada para a construção do modelo, neste caso. As malhas m1 e m2 apresentaram erros de convergência durante o processamento do modelo, sendo esses erros referentes à deslocamentos e deformações excessivos nas direções x, y e z.

Como as geometrias dos corpos de prova nas direções paralela e perpendicular às fibras, segundo a norma europeia, eram diferentes entre si, foi necessária a criação de uma segunda configuração de malha para o modelo de corpo de prova referente à direção perpendicular às fibras. Foram testadas, neste segundo caso, duas configurações diferentes de malhas, onde a segunda configuração apresentou os melhores resultados.

A Tabela 4 apresenta as configurações de malha testadas para o modelo de corpo de prova referente à direção perpendicular às fibras, sendo os valores da malha m2 escolhidos para a confecção do corpo de prova, neste caso.

Tabela 4: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma europeia para a direção perpendicular às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 3}$	n_r	n_d
m1	5	35	4	6	10	6	10	4	3
m2	6	42	3	6	15	6	15	4	3

Fonte: O Autor.

A norma brasileira recomenda a mesma geometria de corpo de prova para o ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras. Essa também é a recomendação da norma americana. Assim, utilizou-se a mesma discretização de malha para os modelos de corpos de prova das normas brasileira e americana referentes às direções paralela e perpendicular às fibras.

As Tabelas 5, 6, 7 e 8 apresentam as configurações de malha testadas para os modelos das normas brasileira e americana, nas direções paralela e perpendicular às fibras, onde valores apresentados nas últimas linhas das tabelas (valores em negrito) corresponderam às discretizações admitidas para cada um dos respectivos modelos numéricos.

Tabela 5: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma brasileira para a direção paralela às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 3}$	n_r	n_d
m1	5	35	2	6	2	6	11	4	3
m2	5	35	3	6	3	6	15	4	3
m3	4	28	5	10	5	10	30	10	3

Fonte: O Autor.

Tabela 6: Malhas testadas o modelo de corpo de prova da norma brasileira para a direção perpendicular às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 3}$	n_r	n_d
m1	5	35	3	6	3	6	15	4	3

Fonte: O Autor.

Tabela 7: Malhas testadas para o modelo de copo de pova da norma americana para a direção paralela às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 3}$	n_r	n_d
m1	5	35	2	6	2	6	6	4	3
m2	5	35	3	6	3	6	9	4	3

Fonte: O Autor.

Tabela 8: Malhas testadas para o modelo de corpo de prova da norma americana para a direção perpendicular às fibras.

Malha	n_x	$n_{x, 1}$	$n_{y, 1}$	$n_{y, 2}$	$n_{z, 1}$	$n_{z, 2}$	$n_{z, 3}$	n_r	n_d
m1	5	35	3	6	3	6	9	4	3

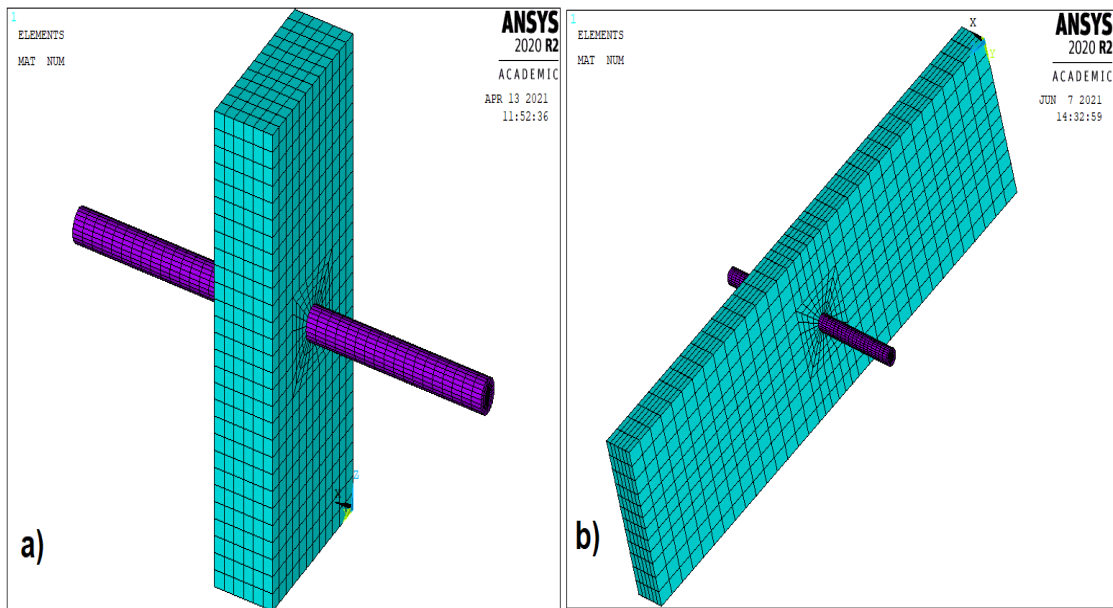
Fonte: O Autor.

3.3.2 Modelos numéricos analisados

A seguir estão apresentados os modelos numéricos gerados a partir das discretizações mencionadas anteriormente.

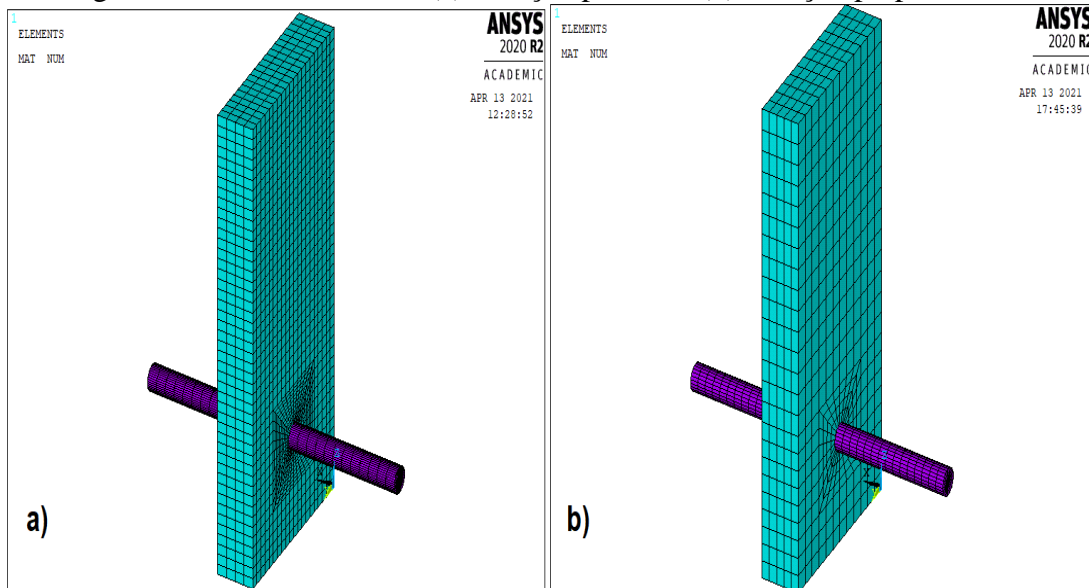
As Figuras 16, 17 e 18 mostram os detalhes da malha de elementos finitos para os modelos de corpos de prova construídos segundo as normas europeia, brasileira e americana para as direções paralela e perpendicular às fibras.

Figura 16: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma europeia: (a) Direção paralela; (b) Direção perpendicular.



Fonte: O Autor.

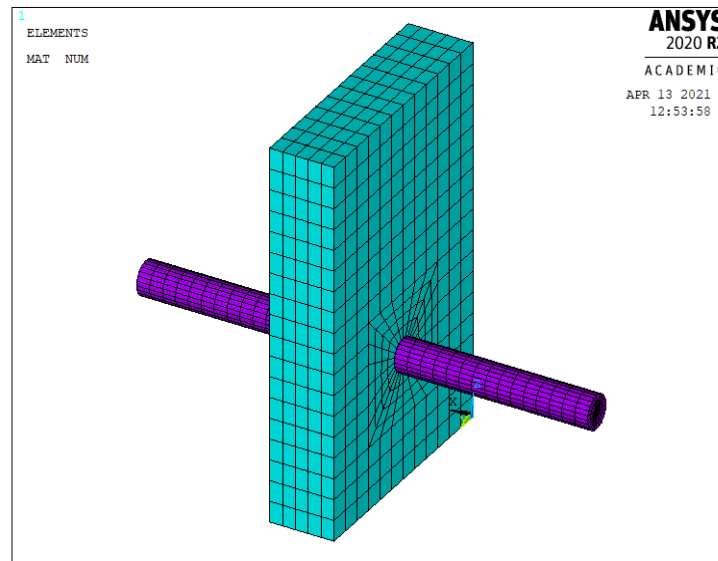
Figura 17: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma brasileira: (a) Direção paralela; (b) Direção perpendicular.



Fonte: O Autor.

Para os modelos de corpos de prova, referentes à norma americana para a direção paralela e perpendicular às fibras, utilizou-se a mesma discretização para a malha de elementos finitos.

Figura 18: Detalhes das malhas de elementos finitos para os modelos de corpos de prova segundo a norma brasileira para as direções paralela e perpendicular às fibras.



Fonte: O Autor.

3.3.3 Propriedades dos materiais utilizados nos modelos

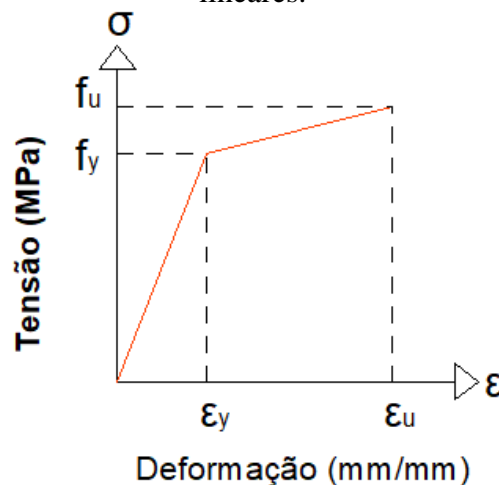
A seguir serão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas, assim como as relações entre as propriedades utilizadas para os modelos numéricos, tanto para a madeira, quanto para os conectores metálicos.

3.3.3.1 Madeira

Foi admitido para a madeira, conforme Molina (2008) um comportamento ortotrópico, ou seja, diferentes propriedades mecânicas para cada uma das três direções ortogonais consideradas (longitudinal, transversal e radial). Além disso, foi utilizado o critério de resistência de Hill, associado ao encruamento isotrópico para a madeira.

O modelo constitutivo utilizado para a madeira foi do modelo elasto-plástico, através de curvas bi-lineares. Tal modelo possui uma região com comportamento puramente elástico tendo o restante do comportamento em regime plástico, conforme representado na Figura 19.

Figura 19: Comportamento elasto-plástico adotado para a madeira através de curvas bilineares.



Fonte: Adaptado Molina, 2008.

Foram utilizadas 21 constantes, para a modelagem da madeira, sendo estas constantes referentes às propriedades físicas, e mecânicas (elásticas e plástica) da madeira. As propriedades físicas e mecânicas foram obtidas através dos ensaios de caracterização da madeira. As relações entre as propriedades elásticas da madeira foram admitidas com base no trabalho desenvolvido por Molina (2008).

Foi admitido o valor da tensão última de plastificação (σ_z), como sendo o valor da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira.

No ANSYS, o eixo z, de coordenadas globais, correspondeu à direção longitudinal das fibras da madeira, o eixo x à direção tangencial e o eixo y à direção radial. Por simplicidade, os comportamentos da madeira na tração e na compressão foram considerados iguais. Nenhuma distinção foi feita entre as direções radial e tangencial (isotropia transversal) e os valores considerados, neste caso, corresponderam à direção perpendicular às fibras da madeira (direção radial).

Na sequência estão apresentadas todas as constantes utilizadas para a modelagem da madeira.

- **Propriedades elásticas da madeira:**

E_x^\pm = Módulo de elasticidade na direção tangencial;

E_y^\pm = Módulo de elasticidade na direção radial;

E_z^\pm = Módulo de elasticidade na direção longitudinal (compressão);

ν_{xy} = Coeficiente de Poisson no plano xy;

ν_{yz} = Coeficiente de Poisson no plano yz;

ν_{xz} = Coeficiente de Poisson no plano xz;

G_{xy} = Módulo de elasticidade transversal no plano xy;

G_{yz} = Módulo de elasticidade transversal no plano yz;

G_{xz} = Módulo de elasticidade transversal no plano xz.

• **Propriedades plásticas da madeira:**

σ_x^{\pm} = Tensão de plastificação (tração e compressão) na direção x;

σ_y^{\pm} = Tensão de plastificação (tração e compressão) na direção y;

σ_z^{\pm} = Tensão de plastificação (tração e compressão) na direção z;

τ_{xy} = Tensão cisalhante de plastificação na direção xy;

τ_{yz} = Tensão cisalhante de plastificação na direção yz;

τ_{xz} = Tensão cisalhante de plastificação na direção xz;

E_{Tx}^{\pm} = Módulo tangente (tração e compressão) na direção x;

E_{Ty}^{\pm} = Módulo tangente (tração e compressão) na direção y;

E_{Tz}^{\pm} = Módulo tangente (tração e compressão) na direção z;

G_{Txy} = Módulo tangente de corte no plano xy;

G_{Tyz} = Módulo tangente de corte no plano yz;

G_{Txz} = Módulo tangente de corte no plano xz.

• **Relações admitidas entre as propriedades elásticas da madeira:**

$E_x = E_y = (E_z/10)$;

$G = G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = (E_z/20)$;

$\nu_{xy} = 0,23$; $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,013$.

• **Relações admitidas entre as propriedades plásticas da madeira:**

$\sigma_z = f_{e0} = f_u$

$(\sigma_y / \sigma_z) = (\sigma_x / \sigma_z) = 0,19$;

$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0,38\sigma_z$; $\tau_{xz} = 0,038 \sigma_z$;

$E_{tx} = E_{ty} = E_{tz}$;

Os modelos de corpos de prova foram nomeados de acordo com a Tabela 9. Todos os modelos foram construídos utilizando-se madeira de Cedro Australiano a pinos metálicos de aço do tipo 1020.

Tabela 9: Nomenclatura utilizada para identificar os modelos numéricos.

Modelo	Norma	Direção das fibras
1	EN 383 (2007)	Paralela
2	EN 383 (2007)	Perpendicular
3	ABNT NBR 7190 (1997)	Paralela
4	ABNT NBR 7190 (1997)	Perpendicular
5	ASTM D5764 (2007)	Paralela
6	ASTM D5764 (2007)	Perpendicular

Fonte: O Autor.

Nas tabelas de 10 a 15 estão apresentadas as propriedades elásticas e plásticas admitidas para os modelos numéricos. Esses valores foram utilizados na calibração dos modelos para obtenção das curvas força versus deslocamento.

Tabela 10: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 1.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	560	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	5600	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,23	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,013	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	4,37	MPa	E_{Tx}^{\pm}	3,43	MPa
σ_y^{\pm}	4,37	MPa	E_{Ty}^{\pm}	3,43	MPa
σ_z^{\pm}	23,1	MPa	E_{Tz}^{\pm}	234,33	MPa
τ_{xy}	8,74	MPa	G_{Txy}	15,06	MPa
τ_{yz}	8,74	MPa	G_{Tyz}	15,06	MPa
τ_{xz}	0,874	MPa	G_{Txz}	0,015	MPa

Fonte: O Autor.

Tabela 11: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 2.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	5600	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	560	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,23	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	4,37	MPa	E_{Tx}^{\pm}	3,43	MPa
σ_y^{\pm}	4,37	MPa	E_{Ty}^{\pm}	3,43	MPa
σ_z^{\pm}	23,1	MPa	E_{Tz}^{\pm}	234,33	MPa
τ_{xy}	8,74	MPa	G_{Txy}	15,06	MPa
τ_{yz}	8,74	MPa	G_{Tyz}	15,06	MPa
τ_{xz}	0,874	MPa	G_{Txz}	0,015	MPa

Fonte: O Autor.

Tabela 12: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 3.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	560	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	5600	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,23	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,013	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	3,36	MPa	E_{Tx}^{\pm}	2,64	MPa
σ_y^{\pm}	3,36	MPa	E_{Ty}^{\pm}	2,64	MPa
σ_z^{\pm}	17,70	MPa	E_{Tz}^{\pm}	180,23	MPa
τ_{xy}	6,73	MPa	G_{Txy}	11,58	MPa
τ_{yz}	6,73	MPa	G_{Tyz}	11,58	MPa
τ_{xz}	0,67	MPa	G_{Txz}	0,012	MPa

Fonte: O Autor.

Tabela 13: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 4.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	5600	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	560	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,23	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	1,39	MPa	E_{Tx}^{\pm}	1,09	MPa
σ_y^{\pm}	7,33	MPa	E_{Ty}^{\pm}	74,69	MPa
σ_z^{\pm}	1,39	MPa	E_{Tz}^{\pm}	1,09	MPa
τ_{xy}	0,28	MPa	G_{Txy}	0,005	MPa
τ_{yz}	2,79	MPa	G_{Tyz}	4,80	MPa
τ_{xz}	2,79	MPa	G_{Txz}	4,80	MPa

Fonte: O Autor.

Tabela 14: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 5.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	560	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	5600	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,23	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,013	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	2,86	MPa	E_{Tx}^{\pm}	2,24	MPa
σ_y^{\pm}	2,86	MPa	E_{Ty}^{\pm}	2,24	MPa
σ_z^{\pm}	15,04	MPa	E_{Tz}^{\pm}	153,18	MPa
τ_{xy}	5,72	MPa	G_{Txy}	9,84	MPa
τ_{yz}	5,72	MPa	G_{Tyz}	9,84	MPa
τ_{xz}	0,57	MPa	G_{Txz}	0,010	MPa

Fonte: O Autor.

Tabela 15: Constantes admitidas para a madeira na calibração do modelo 6.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	560	MPa	G_{xy}	280	MPa
E_y^{\pm}	5600	MPa	G_{yz}	280	MPa
E_z^{\pm}	560	MPa	G_{xz}	280	MPa
ν_{xy}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{yz}	0,013	adimensional	-	-	-
ν_{xz}	0,23	adimensional	ρ	4,18E-06	N/mm ³
σ_x^{\pm}	1,71	MPa	E_{Tx}^{\pm}	1,34	MPa
σ_y^{\pm}	9,01	MPa	E_{Ty}^{\pm}	91,75	MPa
σ_z^{\pm}	1,71	MPa	E_{Tz}^{\pm}	1,34	MPa
τ_{xy}	0,34	MPa	G_{Txy}	0,006	MPa
τ_{yz}	3,42	MPa	G_{Tyz}	5,90	MPa
τ_{xz}	3,42	MPa	G_{Txz}	5,90	MPa

Fonte: O Autor.

3.3.3.2 Conector metálico

Foi adotado um modelo bi-linear, com encruamento isótropo, para representar o conector metálico, com critério de plastificação de von Mises. Foram utilizadas 4 constantes, para a modelagem do conector metálico, sendo elas: σ_p (tensão de plastificação), E_T (módulo tangente), ρ (densidade) e ν (coeficiente de Poisson). Esses valores foram admitidos com base no trabalho desenvolvido por Molina (2008) e podem ser visualizados na Tabela 16. Para todos os modelos de 1 a 6 foram adotadas as mesmas propriedades para o pino de aço.

Tabela 16: Constantes admitidas para o aço dos conectores metálicos (modelos 1 a 6).

Parâmetro	Valor	Unidade
E_T	6328	MPa
σ_p	337	MPa
ν	0,3	Adimensional
ρ	7,85E-4	N/mm ³

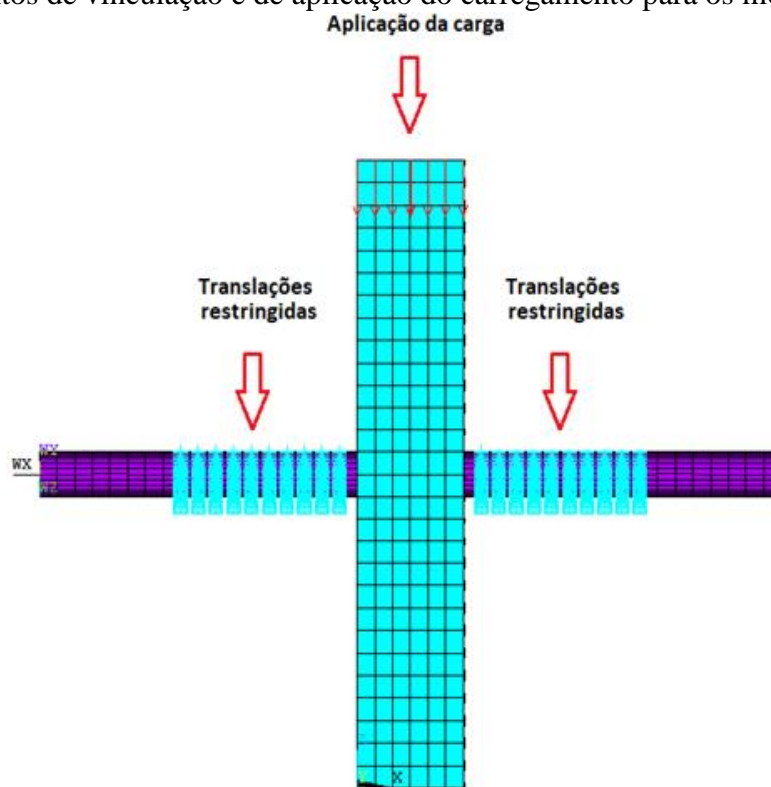
Fonte: O Autor.

3.3.4 Condições de contorno e aplicação do carregamento

Todos os modelos elaborados neste trabalho utilizaram as mesmas condições de contorno e de aplicação de carregamentos, de forma a reproduzir as condições dos ensaios experimentais.

A Figura 20 associada à Tabela 17 indica os pontos e valores de carga aplicada como também as direções de vinculação (restrição) dos modelos numéricos. A força nos modelos numéricos foi aplicada de forma distribuída em todos os nós na superfície do corpo de prova. Para tanto, a intensidade da força, em cada nó, foi aplicada dividindo-se a força máxima (F_e), obtida no ensaio experimental de embutimento, pelo número de nós da superfície superior da peça de madeira. As forças nos modelos foram aplicadas de forma incremental, devido à consideração da não linearidade física dos materiais. O incremento de carga foi controlado utilizando-se o recurso do ANSYS denominado “Automatic Time Stepping”. O recurso citado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15%, ou ainda, deslocamentos excessivos. O controle dos passos de carga foi efetuado a partir da opção “Time increment” e utilizou-se como parâmetro de convergência uma tolerância igual a 0,001.

Figura 20: Pontos de vinculação e de aplicação do carregamento para os modelos numéricos.



Fonte: O Autor.

Tabela 17: Condições de vinculação e de carregamento utilizadas nos modelos.

Modelo	Força F_e (N)	Nº de nós da superfície da peça madeira	Força aplicada nos nós (N) ($F_e/nós$)	Translação impedida nos apoios
1	3064,90	91	33,68	Em y e z
2	2424,20	91	26,64	Em y e z
3	1960,00	105	18,67	Em y e z
4	800,20	78	10,26	Em y e z
5	1626,10	78	20,84	Em y e z
6	984,20	78	12,62	Em y e z

Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

Nesta seção foram apresentados primeiramente os resultados experimentais e analíticos desta pesquisa. Os resultados obtidos foram: Valores da caracterização das madeiras (Garapeira, Cedro Indiano e Cedro Australiano) e Resistências ao embutimento analítica e experimental. Apresenta-se por fim uma comparação entre os resultados de resistência de embutimento obtidos de madeira analítica e experimental. Posteriormente foram apresentados os principais resultados numéricos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Conforme mencionado na seção 3.2.2 foi realizada a caracterização da madeira para determinação da resistência analítica da madeira ao embutimento e para alimentação da análise numérica a ser posteriormente realizada.

As Tabelas 18, 19 e 20 mostram, respectivamente, as dimensões, massas e densidades aparentes (ρ_{ap}) das madeiras Garapeira, Cedro Indiano e Cedro Australiano.

Tabela 18: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova da Garapeira (U=12%).

Corpo de Prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade aparente (kg/m ³)
CP1	51,20	20,58	30,75	31,70	978,36
CP2	51,05	20,70	30,88	31,75	972,97
CP3	50,74	20,63	30,70	28,08	873,79
CP4	50,92	20,51	30,86	28,11	872,19
CP5	51,22	20,63	30,83	28,63	878,84
CP6	51,02	20,57	30,74	32,15	996,56
Média					928,79

Fonte: O Autor.

Tabela 19: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova do Cedro Indiano (U=12%).

Corpo de Prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade aparente (kg/m ³)
CP1	50,82	30,48	20,60	13,18	413,05
CP2	50,95	30,84	20,78	16,16	494,92
CP3	50,93	30,71	20,80	14,64	450,01
CP4	50,89	30,86	20,68	16,77	516,36
CP5	50,92	30,66	20,72	17,41	538,21
CP6	50,95	30,75	20,73	17,75	546,52
Média					493,18

Fonte: O Autor.

Tabela 20: Dimensões, massas e densidade aparente dos corpos-de-prova do Cedro Australiano (U=12%).

Corpo de Prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade aparente (kg/m ³)
CP1	50,82	30,93	20,74	14,18	427,97
CP2	50,95	30,68	20,68	11,93	363,84
CP3	50,93	30,68	20,67	12,15	370,23
CP4	50,89	30,81	20,60	12,48	380,26
CP5	50,92	30,72	20,69	15,59	475,54
CP6	50,95	30,61	20,60	12,85	394,47
Média					402,05

Fonte: O Autor.

As densidades aparentes médias obtidas da Garapeira, Cedro Indiano e Cedro Australiano para a umidade de 12%, foram, respectivamente, 928,79, 493,18 e 402,05 kg/m³. Analisando esses resultados foi possível afirmar que a Garapeira apresentou uma densidade aparente muito maior que as densidades aparentes do Cedro Indiano e do Cedro Australiano.

As Tabelas 21, 22 e 23 apresentam os resultados da caracterização mecânica da Garapeira, Cedro Indiano e Cedro Australiano. Estão apresentadas, neste caso, as resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras (f_{c0} e f_{c90}), o módulo de elasticidade em esforços de compressão paralela e perpendicular às fibras (E_{c0} e E_{c90}) e a resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}). Todos os ensaios foram conduzidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), para a umidade de 12%.

Tabela 21: Caracterização mecânica da Garapeira, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).

Corpo de Prova	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c90} (MPa)	f_{v0} (MPa)
CP1	116,67	21,33	21476,00	1978,30	14,00
CP2	113,54	20,15	20698,26	1830,20	13,62
CP3	81,44	20,05	15974,45	3351,70	9,77
CP4	83,72	20,25	15000,58	2875,90	10,05
CP5	115,34	17,64	21693,62	2758,40	13,84
CP6	115,82	16,77	22967,15	1399,80	13,90
Média	104,42	19,36	19635,01	2365,72	12,53

Fonte: O Autor.

Tabela 22: Caracterização mecânica do Cedro Indiano, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).

Corpo de Prova	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c90} (MPa)	f_{v0} (MPa)
CP1	27,69	6,05	1558,58	617,00	4,15
CP2	29,32	6,03	3240,91	784,00	4,40
CP3	31,12	6,09	2900,15	635,50	4,67
CP4	28,40	6,17	1682,03	734,40	4,26
CP5	28,62	5,84	2545,74	559,40	4,29
CP6	29,02	5,67	2058,48	589,50	4,35
Média	29,03	5,97	2330,98	653,30	4,35

Fonte: O Autor.

Tabela 23: Caracterização mecânica do Cedro Australiano, para a umidade de 12%, obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997).

Corpo de Prova	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{c90} (MPa)	f_{v0} (MPa)
CP1	27,13	2,60	5600,28	144,30	4,07
CP2	26,82	2,65	6114,70	154,20	4,02
CP3	27,16	2,70	6342,16	150,10	4,07
CP4	25,12	2,74	4873,80	155,80	3,77
CP5	30,42	2,60	7491,46	151,80	4,56
CP6	30,22	2,71	7087,65	165,80	4,53
Média	27,81	2,67	6251,68	153,67	4,17

Fonte: O Autor.

Portanto, as madeiras utilizadas, neste estudo, se enquadraram nas seguintes classes de resistência dadas de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997): Garapeira (C60); Cedro Indiano (C20) e Cedro Australiano (C20).

4.2 RESISTÊNCIA ANALÍTICA AO EMBUTIMENTO

Nas Tabelas 24, 25 e 26 estão apresentados todos os parâmetros utilizados neste trabalho, para determinação analítica da resistência ao embutimento da Garapeira, Cedro Indiano e Cedro Australiano. Alguns desses parâmetros foram obtidos após os ensaios experimentais de caracterização.

Tabela 24: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento da Garapeira, conforme cada norma.

Norma	Parâmetro	Valor
	f_{c0}	104,42 MPa
ABNT NBR 7190 (1997)	α_e (para o pino de 6,72 mm)	2,41 (adimensional)
	α_e (para o pino de 10 mm)	1,91 (adimensional)
EN 383 (2007)	k_{90} (para o pino de 6,72 mm)	1,00 (adimensional)
	k_{90} (para o pino de 10 mm)	1,05 (adimensional)
	d	6,72 e 10 mm
	ρ_k	953,86 kg/m ³
ASTMD5764 (2007)	ρ	928,79 kg/m ³
	d	6,72 e 10 mm

Fonte: O Autor.

Tabela 25: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento do Cedro Indiano, conforme cada norma.

Norma	Parâmetro	Valor
	f_{c0}	104,42 MPa
ABNT NBR 7190 (1997)	α_e (para o pino de 6,72 mm)	2,41 (adimensional)
	α_e (para o pino de 10 mm)	1,91 (adimensional)
EN 383: 2007	k_{90} (para o pino de 6,72 mm)	1,00 (adimensional)
	k_{90} (para o pino de 10 mm)	1,05 (adimensional)
	d	6,72 e 10 mm
	ρ_k	404,95 kg/m ³
ASTMD5764 (2007)	ρ	493,18 kg/m ³
	d	6,72 mm

Fonte: O Autor.

Tabela 26: Valores dos parâmetros utilizados para determinação analítica da resistência ao embutimento do Cedro Australiano, conforme cada norma.

Norma	Parâmetro	Valor
	f_{c0}	104,42 MPa
ABNT NBR 7190 (1997)	α_c (para o pino de 6,72 mm)	2,41 (adimensional)
	α_c (para o pino de 10 mm)	1,91 (adimensional)
EN 383: 2007	k_{90} (para o pino de 6,72 mm)	1,00 (adimensional)
	k_{90} (para o pino de 10 mm)	1,05 (adimensional)
	d	6,72 e 10 mm
	ρ_k	389,19 kg/m ³
ASTMD5764 (2007)	ρ	402,05 kg/m ³
	d	6,72 mm

Fonte: O Autor.

As Tabelas 27 e 28 mostram, respectivamente, os resultados das resistências de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, para o pinos de 6,72 e 10 mm, de acordo com as normas ABNT NBR 7190(1997), EN 383(2007) e ASTM D 5764(2007).

Tabela 27: Resistência médias ao embutimento analítica na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	104,42	104,42	71,75	71,75	72,96	70,39
Cedro Indiano	29,03	29,03	38,10	38,10	30,97	29,89
Cedro Australiano	27,81	27,81	31,06	31,06	29,77	28,72

Fonte: O Autor.

Tabela 28: Resistência médias ao embutimento analítica na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), em MPa.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	63,00	49,73	73,47	60,23	72,90	67,04
Cedro Indiano	17,51	13,82	29,34	24,05	21,35	19,92
Cedro Australiano	16,78	13,25	21,82	17,89	20,52	19,15

Fonte: O Autor.

De forma geral, os valores na direção paralela foram maiores que na direção perpendicular. Isso fica claro para a norma brasileira. No entanto, para as demais normas mesmo os valores do embutimento paralelo também foram maiores que os valores de embutimento perpendicular, mas, no entanto, estes valores ficaram mais próximos entre si. A utilização da densidade na equação para determinação da resistência de embutimento parece ser uma boa alternativa para a determinação de f_{e0} e f_{e90} . Porém, como as madeiras brasileiras tem densidades muito variadas deve-se analisar melhor para que faixa de densidade os valores de resistência analíticas de embutimento ficam melhores: para madeiras moles ou para madeiras de alta densidade.

Segundo a metodologia da norma ABNT NBR 7190 (1997), para a determinação da resistência analítica ao embutimento no sentido perpendicular às fibras é utilizada uma constante (0,25) para diminuir o valor da resistência perpendicular às fibras. Assim, o valor da resistência ao embutimento perpendicular às fibras, pela norma brasileira, foi menor do que os valores de resistência ao embutimento perpendicular, obtidos pelas normas europeia e americana.

4.3 RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL AO EMBUTIMENTO

As forças de embutimento foram obtidas através dos gráficos correspondentes a cada norma. Todos os detalhes dos gráficos utilizados para obtenção das forças de embutimento 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 29 e 30 mostram, respectivamente, os resultados das resistências ao embutimento, nas direções paralela e perpendicular às fibras, de acordo com as normas ABNT NBR 7190 (1997), EN 383 (2007) e ASTM D 5764 (2007).

Tabela 29: Resistência ao embutimento experimental na direção paralela às fibras (f_{e0}) em MPa.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	84,07	71,67	82,87	65,83	90,13	87,18
Cedro Indiano	31,41	29,22	32,59	28,29	41,80	30,03
Cedro Australiano	18,40	13,95	20,90	21,77	26,25	24,43

Fonte: O Autor.

Tabela 30: Resistência ao embutimento experimental na direção perpendicular às fibras (f_{e90}) em MPa.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	54,46	41,67	59,89	54,08	69,71	67,43
Cedro Indiano	23,89	14,01	18,21	16,50	26,60	27,34
Cedro Australiano	9,58	7,08	12,75	12,28	19,63	15,48

Fonte: O Autor.

Analisando as Tabelas 29 e 30 observou-se que os valores das resistências de embutimento obtidas através da norma EN 383 (2007) foram maiores, quando comparados com os resultados das outras normas. Isso pode ser explicado pelos baixos valores de deslocamento das normas ASTMD 5764 (2007) e ABNT NBR 7190 (1997), referentes à obtenção da força de embutimento. O método europeu adota o valor máximo entre 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.

Observando os gráficos para obtenção das forças de embutimento segundo as normas ABNT NBR 7190 (1997) e ASTMD 5764 (2007), apresentados nos Apêndice A e C, observou-se que, para a maioria dos casos, a força máxima, ou força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm, foi maior que a força referente ao deslocamento residual de 5% (norma americana) ou a força referente à deformação 2% (norma brasileira).

Foi possível observar que para quase todos os ensaios (com exceção apenas para o ensaio do Cedro Australiano, direção paralela às fibras, segundo a norma americana) os valores de resistência ao embutimento para o pino de 10 mm foram menores que os valores obtidos para o pino de 6,72 mm.

Os valores das resistências de embutimento obtidos pelas normas ABNT NBR 7190 (1997) e ASTM D 5764 (2007), ficaram bem próximos entre si. Na grande maioria dos casos houve uma diferença de aproximadamente 7% entre os valores obtidos. Essa proximidade entre os referidos valores de embutimento se deve ao fato de ambas as normas adotarem um baixo valor de deslocamento para obtenção da força de embutimento.

Em alguns ensaios conduzidos conforme a norma EN 383 (2007) observou-se que o corpo-de-prova de embutimento rompeu antes de atingir um deslocamento de 5 mm para o valor de força máxima. Esse fenômeno ocorreu, na maioria dos casos, para a madeira de Garapeira. Isso pode ter ocorrido devido à alta densidade da madeira que a torna mais rígida e consequentemente com ruptura do tipo elasto-frágil.

4.4 COPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS E EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta uma comparação entre os resultados obtidos de forma experimental e analítica.

As Tabelas 31 e 32 mostram, respectivamente, os valores da resistência analíticas e experimentais ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Tabela 31: Valores analíticos e experimentais obtidos para a resistência ao embutimento paralela às fibras, em MPa.

Espécie de Madeira	Método	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTM D 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
		6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	Analítico	104,42	104,42	71,75	71,75	72,96	70,39
	Experimental	84,07	71,67	82,87	65,83	90,13	87,18
Cedro Indiano	Analítico	29,03	29,03	38,10	38,10	30,97	29,89
	Experimental	31,41	29,22	32,59	28,29	41,80	30,03
Cedro Australiano	Analítico	27,81	27,81	31,06	31,06	29,77	28,72
	Experimental	18,40	13,95	20,90	21,77	26,25	24,43

Fonte: O Autor.

Tabela 32: Valores analíticos e experimentais obtidos para a resistência ao embutimento perpendicular às fibras

Espécie de Madeira	Método	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
		6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	Analítico	63,00	49,73	73,47	60,23	72,90	67,04
	Experimental	54,46	41,67	59,89	54,08	69,71	67,43
Cedro Indiano	Analítico	17,51	13,82	29,34	24,05	21,35	19,92
	Experimental	23,89	14,01	18,21	16,50	26,60	27,34
Cedro Australiano	Analítico	16,78	13,25	21,82	17,89	20,52	19,15
	Experimental	9,58	7,08	12,75	12,28	19,63	15,48

Fonte: O Autor.

Com exceção do Cedro Indiano, os valores médios de f_{e0} e f_{e0} determinados pelo método de ensaio ABNT NBR 7190:1997 foram inferiores ao calculado pela mesma. Isso indicou que o método experimental adotado pela norma brasileira subestima os valores da resistência ao embutimento em relação ao valor que vem sendo mais utilizado atualmente. As características físicas e mecânicas da madeira Cedro Indiano servem como um bom parâmetro para calcular a resistência analítica, para o pino de 10 mm, conforme a norma brasileira, uma vez que os valores analíticos e experimentais ficaram muito próximos, para as direções paralela e perpendicular às fibras.

As Tabelas 33 e 34 mostram, respectivamente, o percentual das diferenças entre os valores das resistências experimentais e analíticas de embutimento para as direções paralela e perpendicular às fibras.

Tabela 33: Percentual das diferenças entre os valores das resistências experimentais e analíticas ao embutimento na direção paralela às fibras.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Diâmetro						
Garapeira	19,49%	31,36%	13,42%	8,25%	19,05%	19,26%
Cedro Indiano	7,58%	0,65%	14,46%	25,75%	25,91%	0,47%
Cedro Australiano	33,84%	49,84%	32,71%	29,91%	11,82%	14,94%

Fonte: O Autor.

Tabela 34: Percentual das diferenças entre os valores das resistências experimentais e analíticas ao embutimento na direção perpendicular às fibras.

Norma	ABNT NBR 7190 (1997)		ASTMD 5764 (2007)		EN 383 (2007)	
	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm	6,72 mm	10 mm
Garapeira	13,56%	16,21%	18,48%	10,21%	4,38%	0,58%
Cedro Indiano	26,71%	1,36%	37,93%	31,39%	19,74%	27,14%
Cedro Australiano	42,91%	46,57%	41,57%	31,36%	4,34%	19,16%

Fonte: O Autor.

Para a direção paralela, a menor diferença entre o método analítico e experimental foi para a Garapeira, com a utilização do pino de 10 mm, pela norma europeia (0,47%). A maior diferença foi para o Cedro Australiano, com utilização do pino de 10 mm, pela norma brasileira (49,84%). Em média, nesta direção, a normas EN 383 (2007) apresentou as menores diferenças em relação aos resultados experimentais e analíticos.

Na direção normal, a menor diferença foi para a Garapeira pela norma europeia (0,58%). A maior diferença foi novamente para o Cedro Australiano pela norma brasileira (46,57%). Em média, nesta direção, a norma EN 383 (2007) apresentou as menores diferenças em relação aos resultados experimentais e analíticos.

De forma geral, a norma EN 383 (2007) apresentou as menores diferenças entre os valores analíticos e experimentais. As normas ASTMD 5764 (2007) e ABNT NBR 7190 (1997) apresentaram as maiores diferenças em ambas as direções.

Foi realizado um teste de significância, teste Tukey, para verificar se houve significância entre os valores analíticos e experimentais. Esse teste está apresentado na Tabela 35.

Tabela 35: “Teste de Tukey” para a avaliação das resistências de embutimento.

Norma	Madeira	Direção	Diâmetro	p value	Diferença Significativa
ABNT NBR 7190 (1997)	Garapeira	Paralela	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,001	sim
		Perpendicular	6,7 mm	0,035	não
			10 mm	0,007	não
	Cedro Indiano	Paralela	6,7 mm	0,240	não
			10 mm	0,915	não
		Perpendicular	6,7 mm	0,001	sim
			10 mm	0,874	não
	Cedro Australiano	Paralela	6,7 mm	0,001	sim
			10 mm	0,000	sim
		Perpendicular	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,000	sim
ASTM D5764 (2007)	Garapeira	Paralela	6,7 mm	0,022	não
			10 mm	0,061	não
		Perpendicular	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,262	não
	Cedro Indiano	Paralela	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,000	sim
		Perpendicular	6,7 mm	0,001	sim
			10 mm	0,000	sim
	Cedro Australiano	Paralela	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,000	sim
		Perpendicular	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,000	sim
EN 383 (2007)	Garapeira	Paralela	6,7 mm	0,001	sim
			10 mm	0,000	sim
		Perpendicular	6,7 mm	0,183	não
			10 mm	0,856	não
	Cedro Indiano	Paralela	6,7 mm	0,004	sim
			10 mm	0,936	não
		Perpendicular	6,7 mm	0,106	não
			10 mm	0,000	sim
	Cedro Australiano	Paralela	6,7 mm	0,000	sim
			10 mm	0,410	não
		Perpendicular	6,7 mm	0,392	não
			10 mm	0,148	não

Fonte: O Autor.

Foi possível observar a partir da Tabela 35, que para os “p value” maiores que 0,05, a diferença entre os valores analíticos e experimentais não foi significativa. Por outro lado, para p-value menor que 0,05, houve diferença significativa entre os valores analíticos e experimentais de resistência de embutimento. Essa diferença significativa pode significar baixa qualidade de ajuste para os valores de resistência analítica com relação aos resultados experimentais.

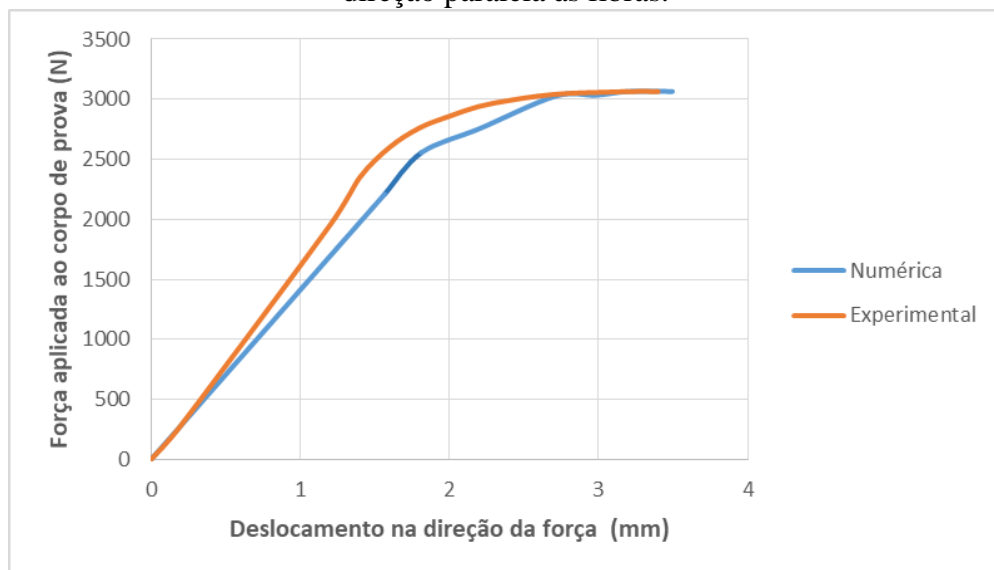
Comparando os dados das Tabelas 33 e 34, observou-se, que na grande maioria dos casos, os ensaios que obtiveram as maiores porcentagens de diferença nestas tabelas, foram os ensaios que tiveram diferença significativa registradas na Tabela 35.

4.5 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

4.5.1 Calibração dos modelos

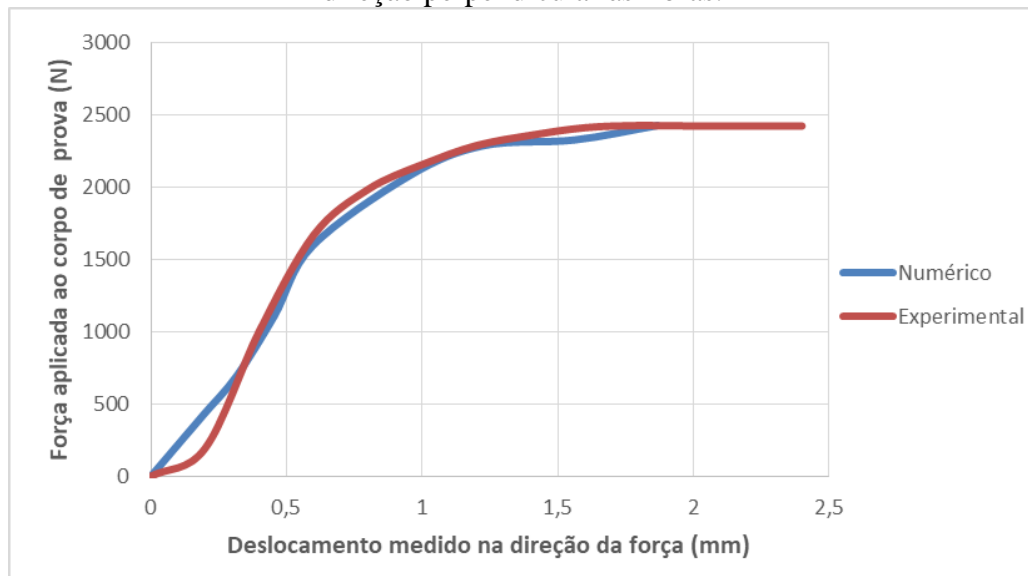
Na sequência estão apresentadas as curvas de calibração para os modelos numéricos seguidas dos comentários mais relevantes. As curvas de calibração (Figuras 21 a 26) comparam a resposta da força de embutimento (F_e) versus deslocamento (δ) do ponto inferior de referência do corpo de prova (Figura 14) para os ensaios de embutimento experimental e computacional. As curvas numéricas foram plotadas até onde foi possível a convergência dos modelos numéricos

Figura 21: Curva de calibração do modelo 1 (CP1) conforme norma EN 383 (2007) para a direção paralela às fibras.



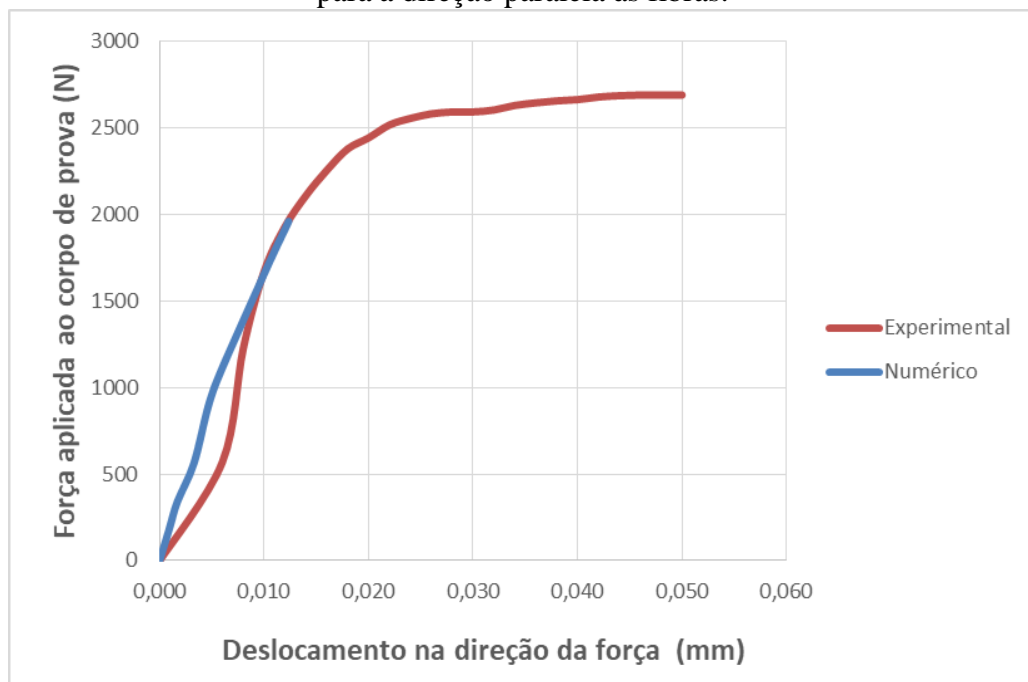
Fonte: O Autor.

Figura 22: Curva de calibração do modelo 2 (CP4), conforme norma EN 383 (2007) para a direção perpendicular às fibras.



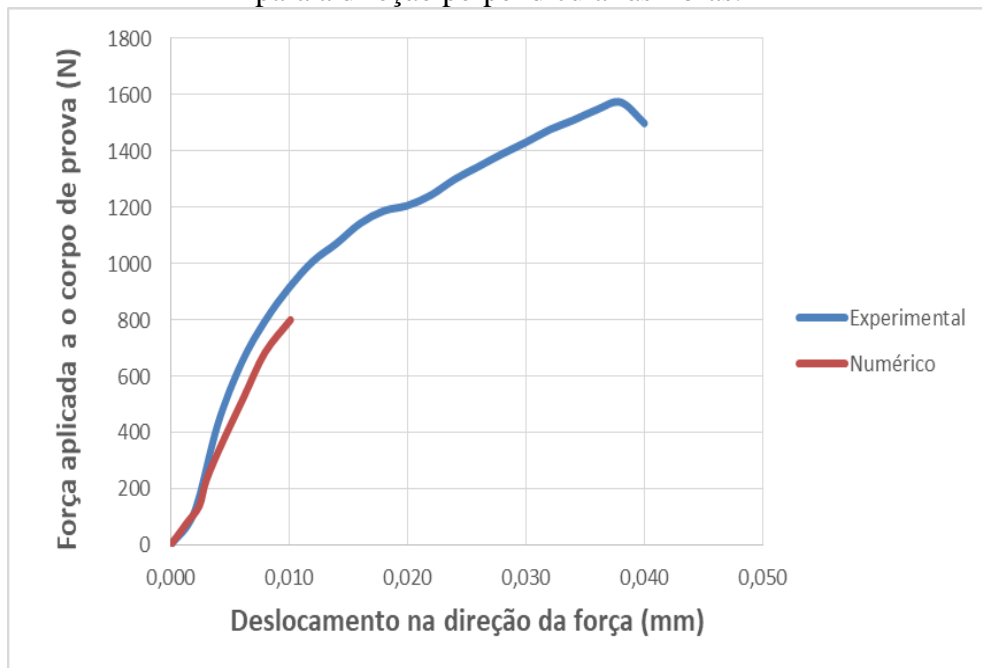
Fonte: O Autor.

Figura 23: Curva de calibração do modelo 3 (CP4) conforme norma ABNT NBR 7190 (1997) para a direção paralela às fibras.



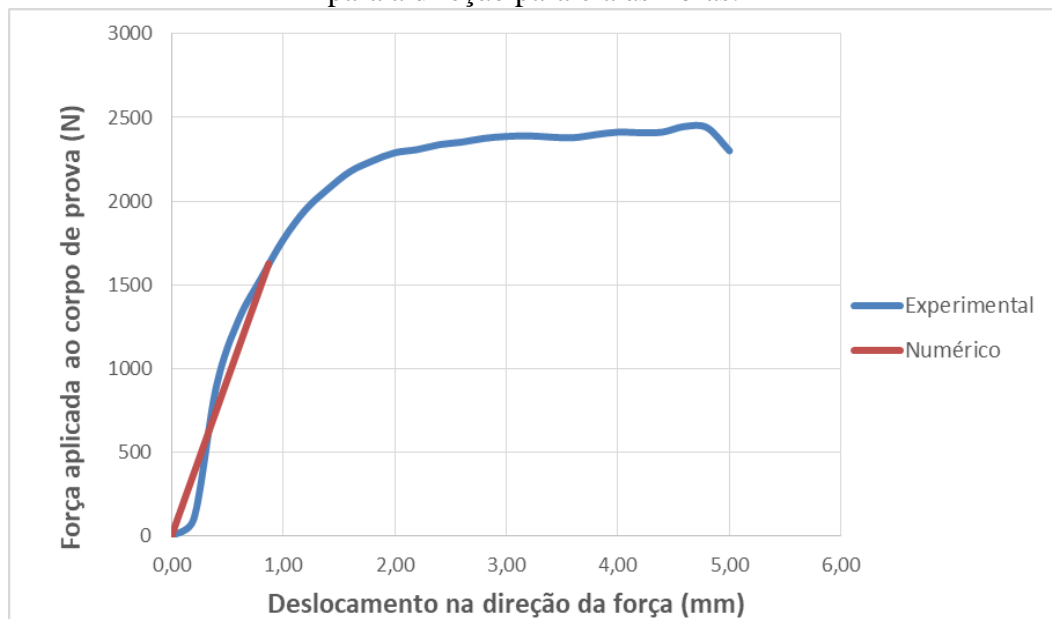
Fonte: O Autor.

Figura 24: Curva de calibração do modelo 4 (CP3), conforme norma ABNT NBR 7190 (1997) para a direção perpendicular às fibras.



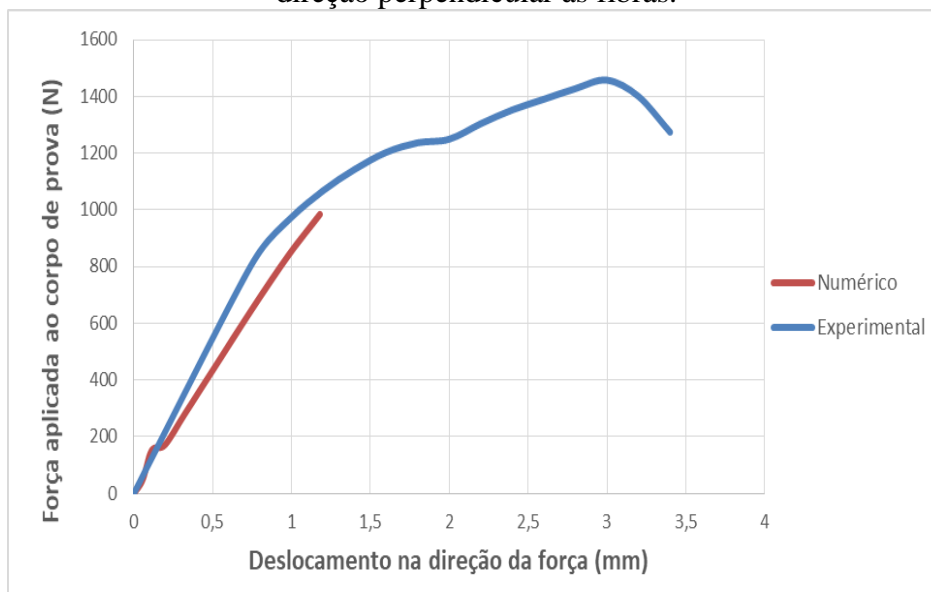
Fonte: O Autor.

Figura 25: Curva de calibração do modelo 5 (CP6) conforme norma ASTM D5764 (2007) para a direção paralela às fibras.



Fonte: O Autor.

Figura 26: Curva de calibração do modelo 6 (CP6) conforme ASTM D5764 (2007) para a direção perpendicular às fibras.



Fonte: O Autor.

De forma geral, a maioria das curvas força versus deslocamento numéricas se aproximaram das curvas experimentais e apresentam um trecho linear e outro trecho não linear, após o início da plastificação dos materiais.

No trecho inicial da curva numérica (parte linear), as rigidezes (caracterizadas pela inclinação das curvas) foram menores ou maiores que as rigidezes experimentais dependendo do modelo de corpo de prova. A segunda parte das curvas, referente ao trecho não linear, apresentaram comportamentos similares aos comportamentos das curvas experimentais, até se igualar para valores próximos ao valor da força de ruptura experimental.

As diferenças apresentadas entre as curvas numérica e experimental se devem ao fato da modelagem da madeira não ser uma tarefa simples devido a existência de imperfeições (distorções nas direções das fibras, presença de nós, etc.). Em cada uma das direções ortogonais (longitudinal, radial e tangencial) a madeira apresenta propriedades mecânicas diferentes assim como diferentes comportamentos na tração e na compressão. Na compressão, o comportamento é aproximadamente plástico podendo ser aproximado por uma lei constitutiva elasto-plástica. Por outro lado, na tração, o comportamento da madeira é elasto-frágil e, neste caso, o comportamento elasto-plástico não representa verdadeiramente o comportamento do material.

Para os modelos da norma americana e brasileira, as curvas numéricas de calibração se aproximaram das curvas experimental com razoável aproximação até o início da plastificação da madeira. Vale mencionar que, nestes casos, as curvas experimentais foram obtidas para um deslocamento total de 5 mm. No entanto, as curvas numéricas nestes casos respeitara o limite

de ruptura referentes a deformação de 2‰ (norma brasileira) e 5‰ (norma americana), valores estes inferiores quando comparados com o critério de ruptura da norma europeia que foi de 5 mm ou a força máxima obtida no ensaio.

Nos casos dos modelos referentes a norma brasileira (modelos 3 e 4), os comportamentos das curvas de calibração podem estar relacionados com a menor densidade de malha utilizada para a direção normal quando comparada com a direção paralela do modelo 3. Portanto, o modelo 4, da norma brasileira, na direção perpendicular, mostrou-se um modelo mais flexível quando comparado com o modelo 3 proposto para a direção paralela da ABNT NBR 7190 (1997).

Vale mencionar ainda que as propriedades elásticas da madeira não tiveram grande influência no comportamento da curva numérica calibração do modelo. Porém, as propriedades plásticas foram as que mais influenciaram na resposta da curva numérica força versus deslocamento, pois aumentos no valor da tensão de plastificação resultaram em acréscimos na resistência e rigidez do sistema como um todo.

4.5.2 Tensões no corpo de prova de embutimento

Os resultados das simulações computacionais fornecidos possibilitaram a avaliação dos níveis tensões nos corpos de prova avaliados indicando os esmagamentos e danificações (modos de ruptura) da madeira nas regiões de interesse, conforme observados nos ensaios experimentais.

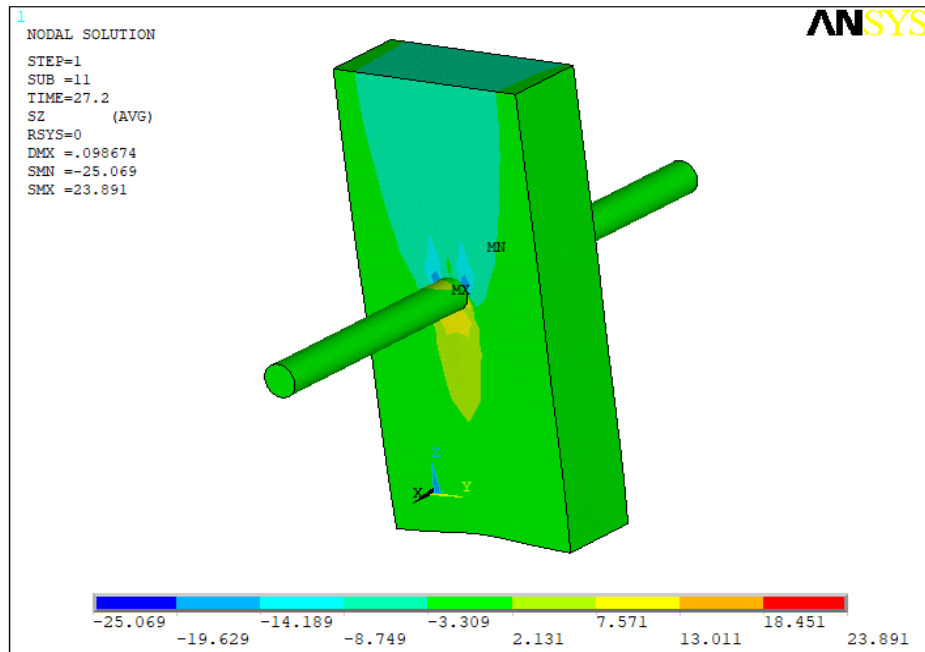
Os modelos da norma europeia (Modelos 1 e 2) foram tomados como exemplo neste trabalho e, nesse sentido, para estes modelos os resultados foram apresentados de forma completa e detalhada. A análise de forma completa, neste caso, envolveu, além da avaliação das tensões na madeira, também no pino aço.

Para evitar repetição dos conteúdos similares, referentes aos procedimento de simulação, para os modelos das normas brasileira e americana (Modelos 3, 4, 5 e 6), os principais resultados obtidos das tensões no corpo de prova de madeira foram apresentados e comentados, de forma simplificada, uma vez que o comportamento da madeira no que se refere ao embutimento foi o principal objetivo deste trabalho.

MODELO 1

A Figura 27 apresenta uma vista geral dos resultados de tensão obtidos para o modelo 1, após a simulação, com indicação das regiões de maior solicitação na madeira e no pino.

Figura 27: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z).

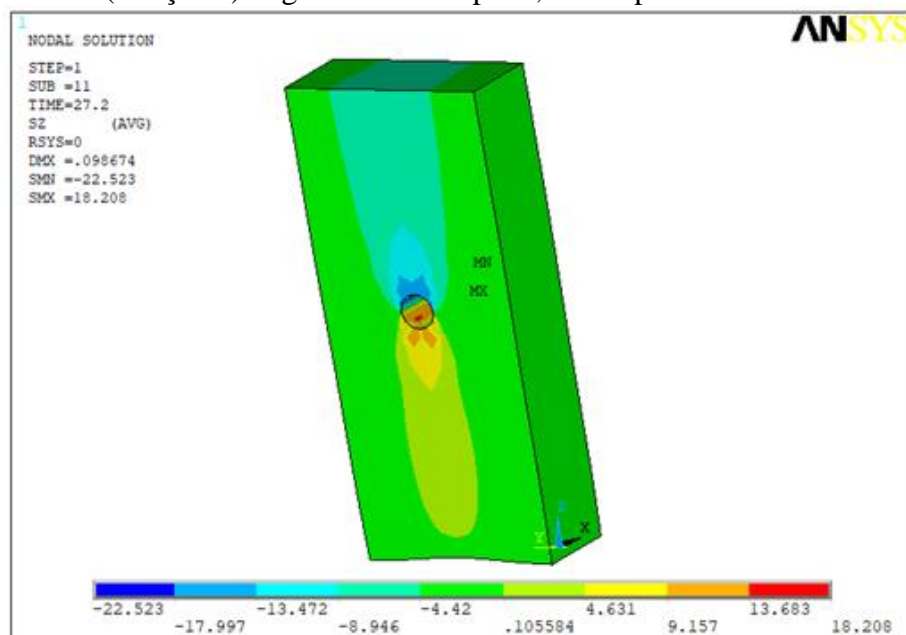


Fonte: O Autor.

Observou-se claramente a concentração de tensões nas regiões ao redor do furo, na parte central do corpo de prova, devido ao contato do pino com a madeira.

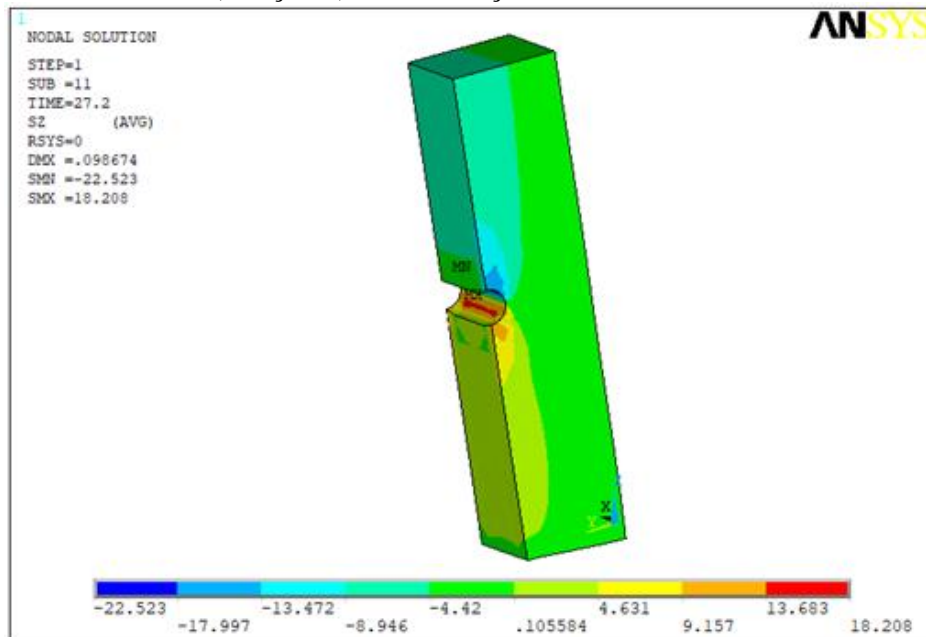
As Figuras 28 e 29 mostram as distribuições das tensões na direção paralela às fibras (direção z do ANSYS) para a peça de madeira de forma individualizada.

Figura 28: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z). – geometria completa, sem o pino metálico.



Fonte: O Autor.

Figura 29: Tensões em MPa para o modelo 1- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z) - visualização de ½ estrutura.



Fonte: O Autor.

A partir das Figuras 28 e 29 observou-se a ocorrência de tensões de compressão na parte superior do furo que atingiram valores máximos de -22,523 MPa e de tensões de tração na parte inferior do furo, que chegaram a +18,208 MPa.

Observou-se também, nas proximidades da região de aplicação da carga (topo da peça de madeira), que os valores das tensões de compressão foram aproximadamente três vezes menores que os valores das tensões de compressão na região de contato entre o pino e a madeira. Além disso, as distribuições das tensões nestas duas regiões se mostraram completamente diferentes.

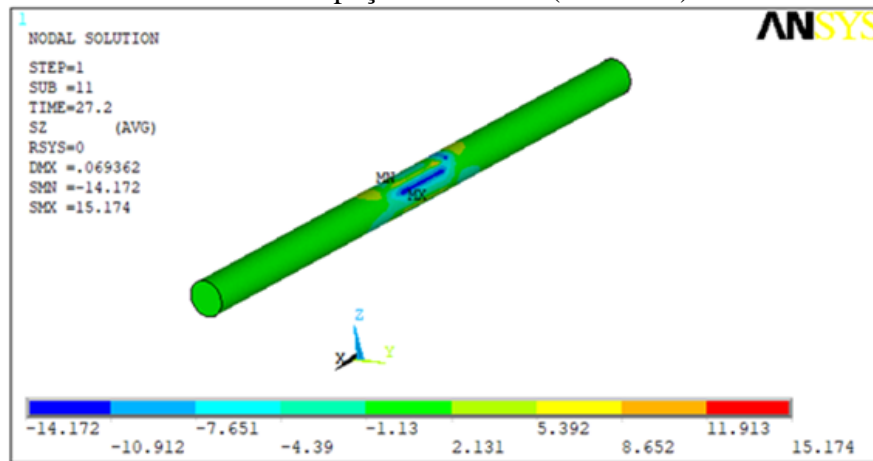
Observou-se ainda que o valor máximo da tensão de compressão, na direção paralela às fibras (direção z), ocorreu na região interna superior do furo e foi de aproximadamente -22,523 MPa, diminuindo ao longo da largura (direção y) do centro do furo para a extremidade, atingindo o valor mínimo de tensão de compressão igual a -4,42 MPa, na extremidade da peça de madeira.

Por outro lado, na região abaixo do pino, ocorreu um valor máximo de tração igual a +18,208 MPa (contato do pino com a madeira) que também diminuiu ao longo da largura do corpo de prova (direção y do ANSYS) atingindo o valor de +0,105584 MPa, para regiões ainda próximas ao furo.

Por fim, ao longo da espessura da peça de madeira (direção x), na região abaixo do pino, a distribuição das tensões de tração foi aproximadamente constante com valor +4,631 MPa.

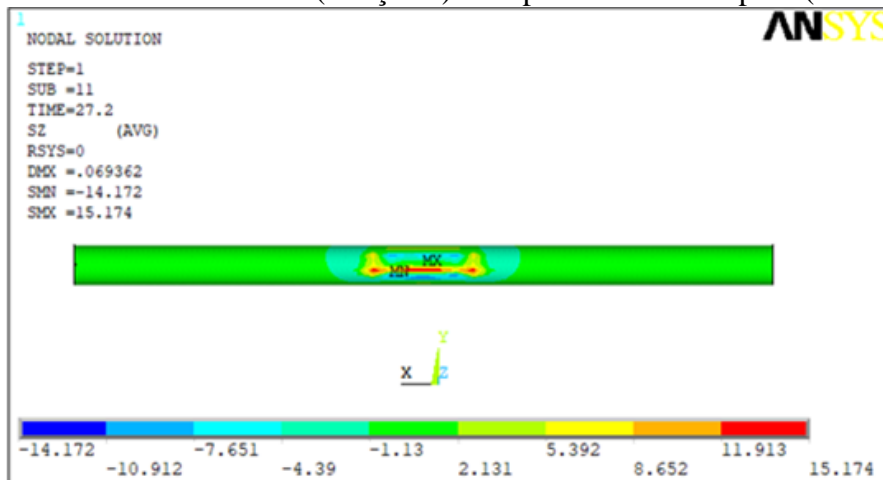
As Figuras 30 e 31 mostram as tensões na direção de z para o pino de aço analisado individualmente. Na Figura 30 as tensões de compressão são oriundas do contato entre o pino e a região superior do furo na madeira enquanto na Figura 31 as tensões de tração são dadas em função da flexão do pino na parte inferior do furo na madeira.

Figura 30: Tensões em MPa (direção z) – resultantes do contato entre o pino e a parte superior do furo da peça de madeira (modelo 1).



Fonte: O Autor.

Figura 31: Tensões em MPa (direção z) – na parte inferior do pino (modelo 1).

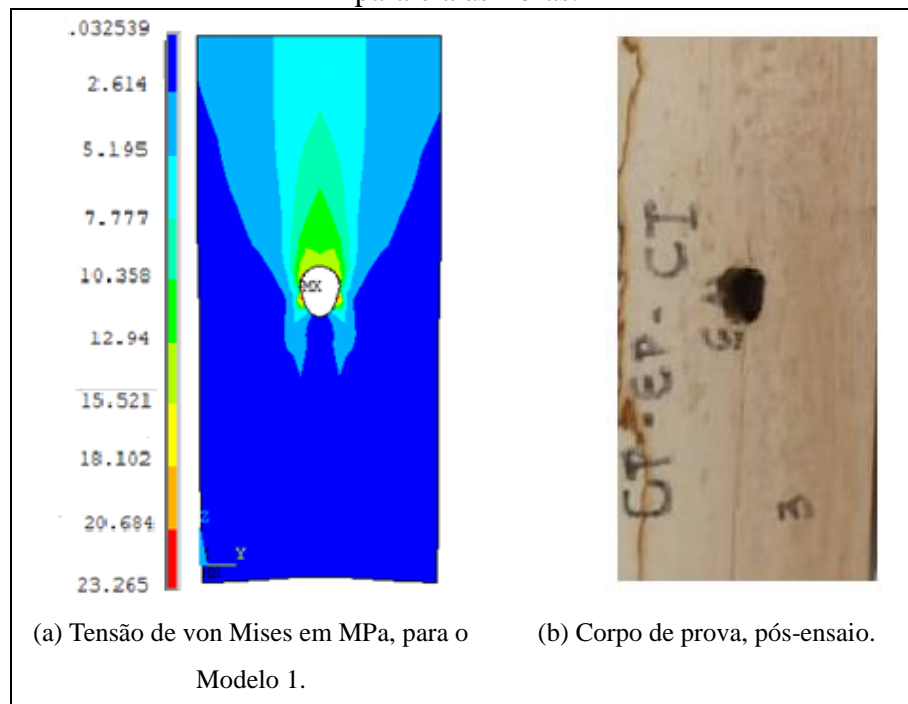


Fonte: O Autor.

Na Figura 31, observou-se que o valor máximo da tensão de compressão, atingido pelo pino, neste caso, foi de -14,172 MPa, na região centrado de contato entre o pino de aço e a madeira.

A Figura 32 mostra a comparação entre as tensões de von Mises obtidas pelo modelo numérico 1 e o corpo de prova do ensaio experimental utilizado no ensaio correspondente ao modelo 1.

Figura 32: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma EN 383 – paralela às fibras.



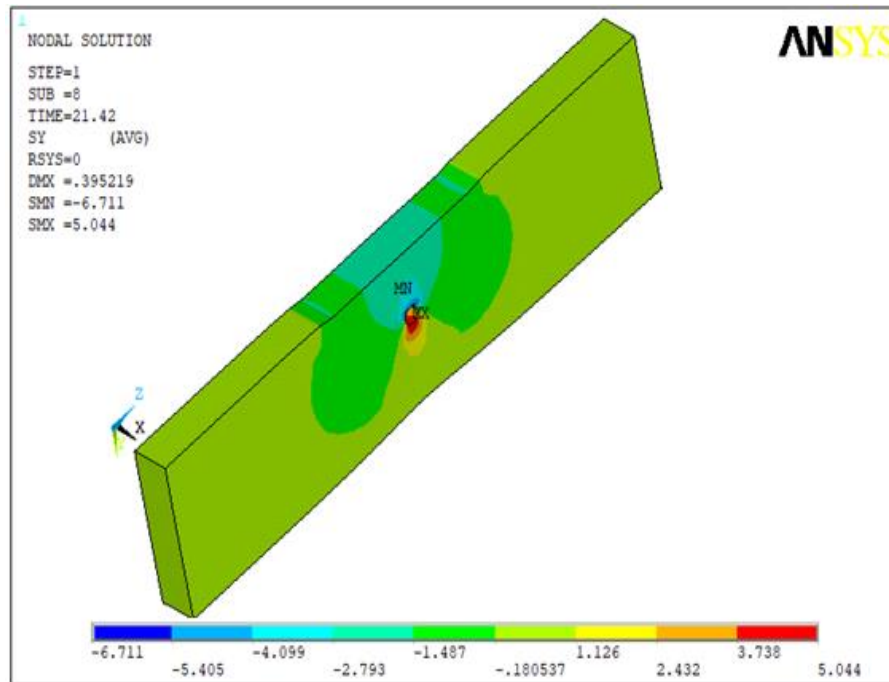
Fonte: O Autor.

Na Figura 32 foi possível visualizar a distribuição das tensões de von Mises ao redor do furo, principalmente na região de contato entre o pino metálico e a madeira. Obteve-se uma boa aproximação entre a tensão obtida pelo modelo numérico, com a tensão de embutimento, obtida pelo ensaio experimental, onde a máxima tensão numérica obtida no modelo 1 foi de 23.26 MPa, enquanto a tensão experimental foi de 27,20 MPa. Também foi possível observar que as distribuições de tensões ao redor do furo foram similares as deformações obtidas no corpo de prova do ensaio experimental, onde a região de contato entre o pino metálico e a madeira, proporcionou as deformações de embutimento na madeira.

MODELO 2

A Figura 33 mostra a distribuição das tensões no elemento de madeira, na direção normal às fibras (direção y do ANSYS), para a identificação das regiões de maior concentração das tensões.

Figura 33: Tensões em MPa para o modelo 2- EN 383(2007) na direção paralela as fibras (direção z). – geometria completa, sem o pino metálico.



Fonte: O Autor.

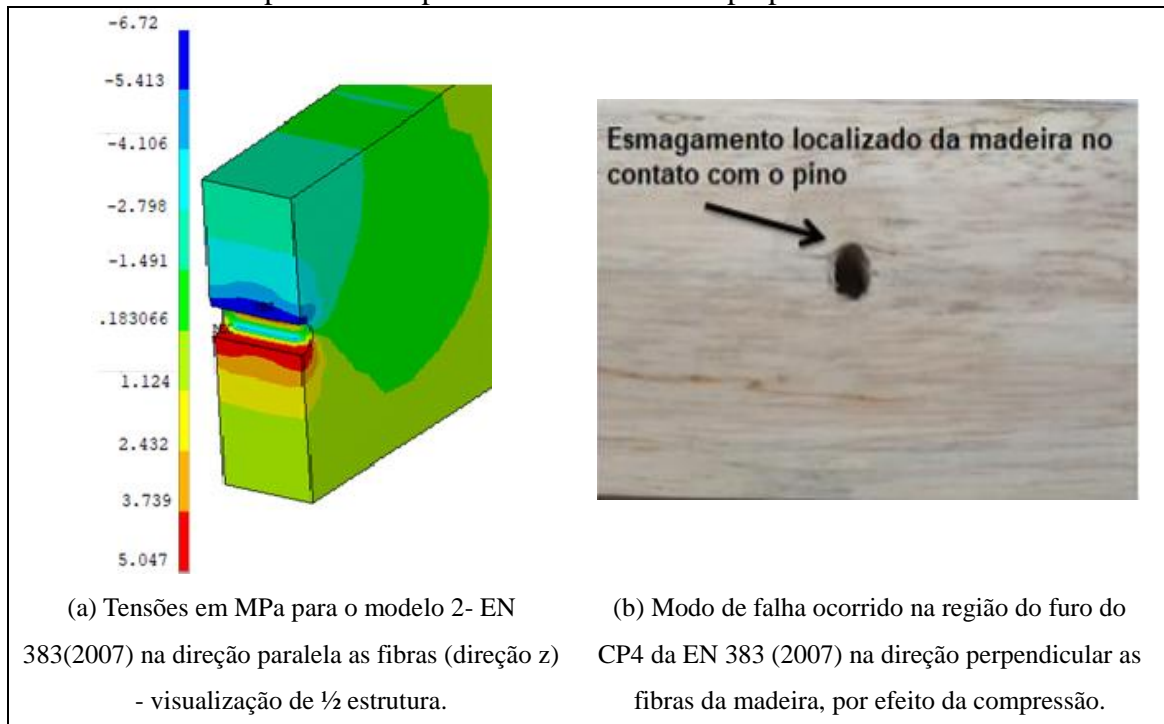
Na Figura 33, o máximo valor da tensão de compressão normal às fibras da madeira foi de aproximadamente - 6,711 MPa, sendo que este valor ocorreu na parte interna superior do furo na madeira.

Na região de aplicação da carga os valores das tensões de compressão foram aproximadamente 2,5 vezes menores que os valores das tensões de compressão na região de contato entre o pino e a madeira.

Na parte inferior do pino, abaixo do furo, as tensões máximas de tração atingiram o valor de +5,044 MPa. Esses detalhes podem ser melhor visualizados na Figura 36, com detalhe em 1/2 estrutura de corpo de prova.

Na Figura 34 foi possível observar as tensões obtidas ao redor do furo (tensão de - 6,711 MPa de compressão e tensão de +5,044 MPa de tração), obtidas pelo modelo numérico e também foi possível observar os detalhes do modo de falha provocado devido a tensão de compressão do pino na região superior do furo na madeira, ocorrido no CP4 do ensaio experimental da norma EN 383 (2007).

Figura 34: Comparação entre as tensões obtidas no Modelo 2, com o tipo de falha ocorrida no ensaio experimentais para a norma EN 383 – perpendicular às fibras.

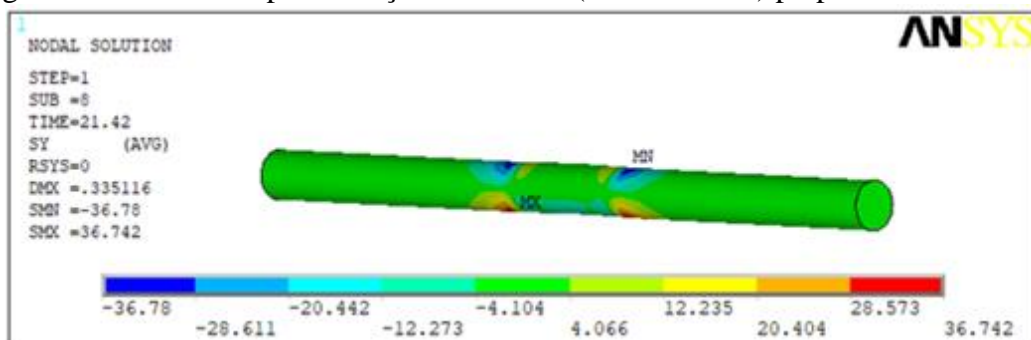


Fonte: O Autor.

A distribuição das tensões de compressão na direção perpendicular às fibras (ao longo do comprimento do pino ou espessura x do corpo de prova) se apresentou com valor aproximadamente constante de forma similar ao que ocorreu para as tensões de compressão na direção paralela às fibras. Além disso, o valor da tensão de tração perpendicular, também constante, na região abaixo do furo, foi relativamente alta (+5,047 MPa) podendo causar rachaduras ou aberturas nessa região.

A Figura 35 mostra as tensões de compressão e tração no pino de aço no ensaio de embutimento normal às fibras segundo a EN 383 (2007)

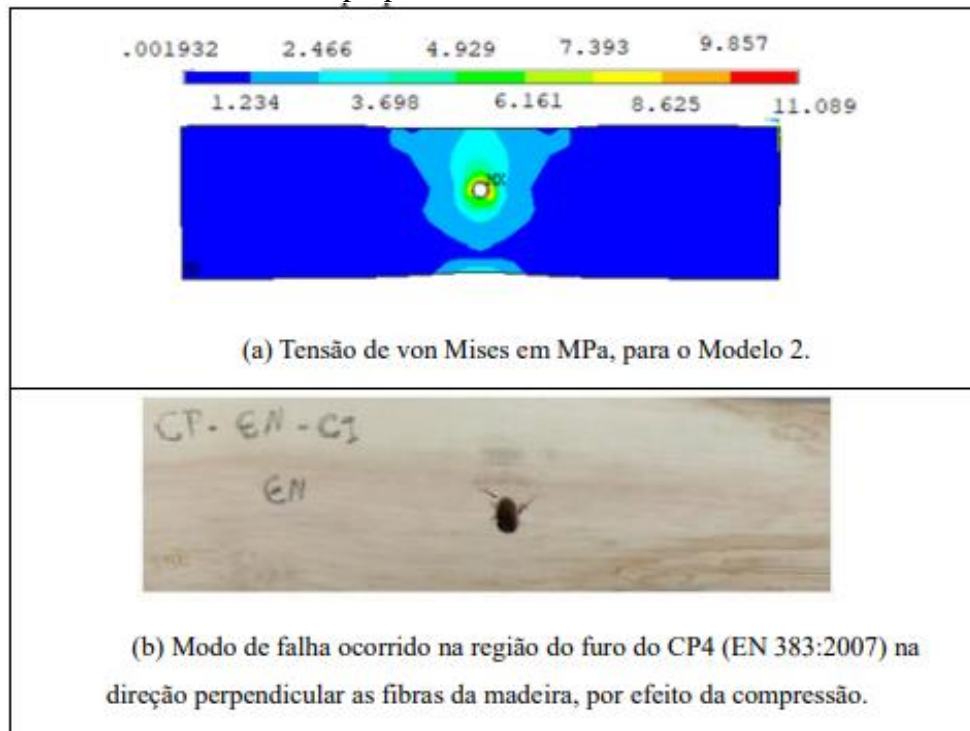
Figura 35: Tensões no pino de aço – modelo 2 (EN 383:2007) perpendicular as fibras.



Fonte: O Autor.

A Figura 36 mostra a comparação entre as tensões de von Mises obtidas pelo modelo numérico 2 e o corpo de prova do ensaio experimental utilizado no ensaio correspondente ao modelo 2.

Figura 36: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma EN 383 – perpendicular às fibras.



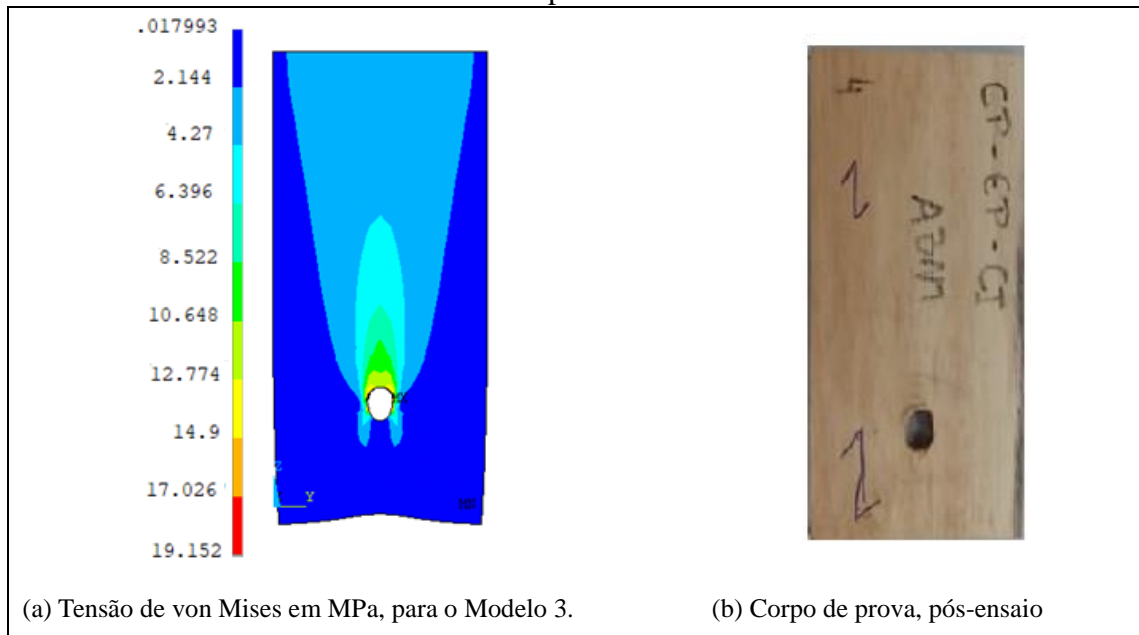
Fonte: O Autor.

Na Figura 36 foi possível visualizar a tensão máxima de von Mises obtida pelo modelo numérico que foi de 11,08 MPa, Houve uma aproximação razoável ao valor da tensão obtida pelo ensaio experimental, sendo que esta foi de 21,42 MPa.

MODELO 3

A Figura 37 mostra as tensões de von Mises obtidas pelo modelo numérico 3. Neste caso, como já dito anteriormente, foram apresentados as distribuições das tensões de embutimento na madeira juntamente com os comentários mais relevantes.

Figura 37: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ABNT NBR 7190 – paralela às fibras.



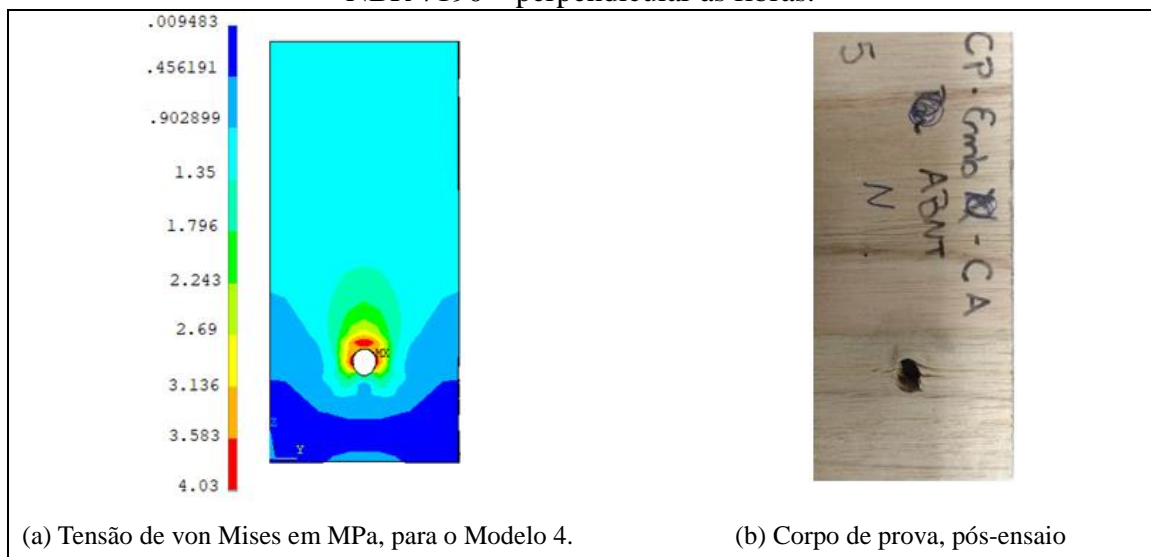
Fonte: O Autor.

A tensão máxima de von Mises obtida pelo modelo numérico foi de 19,15 MPa, sendo que esse valor foi bem próximo ao valor experimental, que foi de 20,92 MPa. O modelo numérico conseguiu simular as distribuições de tensões ocorridas ao redor do furo, caracterizado pelo esmagamento entre o pino metálico e a madeira.

MODELO 4

A Figura 38 mostra as tensões de von Mises obtidas pelo modelo numérico 4.

Figura 38: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ABNT NBR 7190 – perpendicular às fibras.



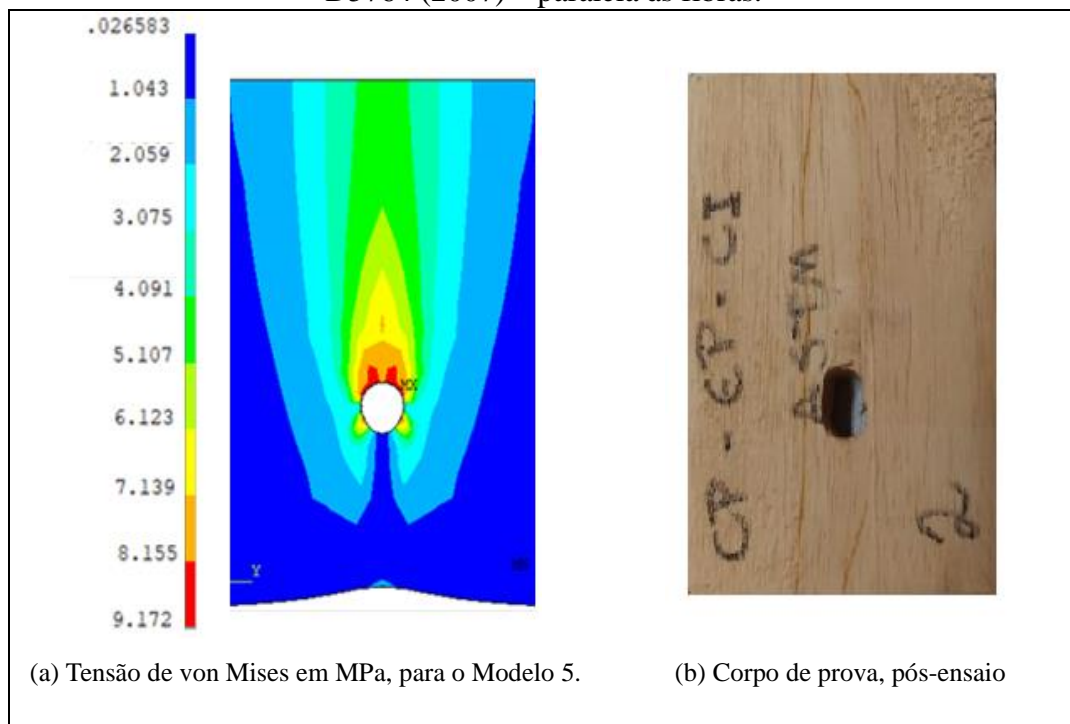
Fonte: O Autor.

A tensão máxima de von Mises obtida pelo modelo numérico foi de 4,03 MPa, enquanto a tensão de embutimento, obtida pelo ensaio experimental foi de 8,67 MPa, indicando também aproximação razoável entre o valor numérico e experimental. Foi possível observar que no corpo de prova ocorreu o esmagamento, na parte superior do furo e também ocorreram trincas nas laterais do furo. Essas deformações estão de acordo com a distribuição das tensões obtidas no Modelo 4 para a região avaliada.

MODELO 5

A Figura 39 mostra as tensões de von Mises obtidas pelo modelo numérico 5.

Figura 39: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ASTM D5764 (2007) – paralela às fibras.



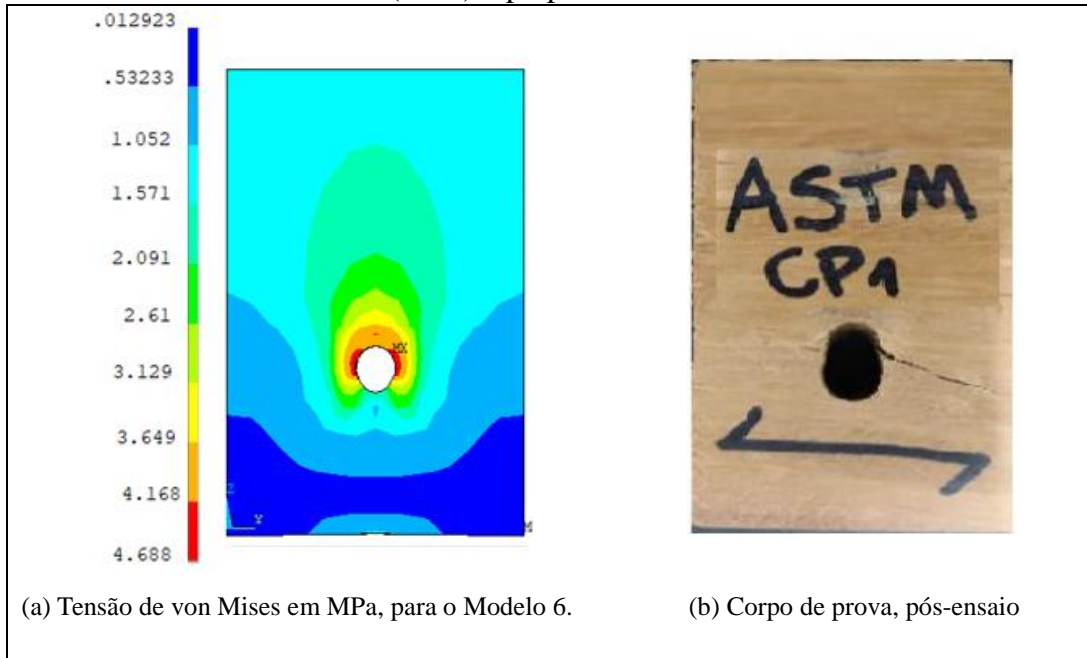
Fonte: O Autor.

A tensão máxima de von Mises obtida pelo modelo numérico foi de 9,17 MPa, enquanto que a tensão de embutimento, obtida pelo ensaio experimental foi de 27,78 MPa. Neste caso o modelo numérico apresentou um valor bem inferior ao resultado experimental, porém as distribuições das tensões se aproximaram do modelo de ruptura do corpo de prova.

MODELO 6

A Figura 40 mostra as tensões de Von Mises obtidas pelo modelo numérico 6

Figura 40: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a norma ASTM D5764 (2007) – perpendicular às fibras.



Fonte: O Autor.

A tensão máxima de von Mises obtida pelo modelo numérico foi de 4,68 MPa, enquanto que a tensão de embutimento, obtida pelo ensaio experimental, foi de 10,64 MPa. Observou-se, neste caso, uma aproximação razoável entre o valor numérico e experimental, com as distribuições das tensões numéricas justificando o modo de ruptura do corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

Os valores das resistências ao embutimento experimentais obtidos através da norma EN 383 (2007) foram maiores se comparados com os resultados das outras normas ASTM D 5764 (2007) e ABNT NBR 7190 (1997), para obtenção da força de embutimento.

Os valores de deslocamento usados pelas normas brasileira e americana, para determinar a força de embutimento experimental, são valores baixos e próximos, os quais resultam em baixas forças de embutimento, quando comparados com a norma europeia. Os deslocamentos médios dos pinos metálicos, para obtenção da força de embutimento, pelos métodos das normas brasileira e americana foram, neste trabalho, respectivamente, 0,40 e 0,52 mm, contra 5 mm da norma europeia.

A norma europeia apresentou as menores diferenças, nas duas direções (paralela e perpendicular). A norma brasileira apresentou as maiores diferenças para as resistências analíticas e experimentais para ambas as direções (paralela e perpendicular).

O corpo de prova recomendado pela europeia apresenta dimensões que propiciam a confecção de corpos de prova sem dificuldades. Já na norma ABNT NBR 7190:1997 houve uma dificuldade para confecção de corpos-de-prova na direção perpendicular às fibras, quando o pino utilizado apresenta um diâmetro maior. Essa conclusão também foi obtida por Almeida (2014).

O modelo analítico a norma EN 383 (2007) considera o diâmetro do pino e a densidade da madeira na determinação das resistências de embutimento e estes dois parâmetros se mostraram adequados na quantificação da referida propriedade. No entanto, é preciso um estudo mais detalhado para se definir para as faixas de densidade das madeiras (coníferas e folhosas) onde se encontram os resultados de embutimento são mais representativos.

Os resultados analíticos da madeira Garapeira, nas direções paralela e perpendicular às fibras, para o pino de 6,72 mm apresentaram valores semelhantes, quando estes foram calculados pelas normas europeia e americana. Isso pode ter ocorrido devido à alta densidade da madeira e devido ao menor diâmetro do pino (porém com maior tensão de plastificação que induz ao embutimento ao invés da flexão), já que para o pino de 10 mm, houve maiores diferenças entre os valores obtidos nas duas direções, para as mesmas normas referidas.

Os modelos numéricos propostos foram capazes de simular o comportamento mecânico dos corpos de prova de embutimento não somente na fase elástica linear, mas também na fase não linear quando se inicia o processo de plastificação. Além disso, os modelos possibilitaram a análise dos aspectos globais, a partir da relação força versus deslocamento, como também

dos aspectos localizados como a verificação das tensões nas diferentes regiões de interesse dos modelos.

De forma geral, a norma europeia se mostrou mais adequada para confecção dos corpos de prova, maior facilidade de obtenção das forças de embutimento, maiores valores de resistência ao embutimento e maior aproximação entre os valores experimentais e analíticos, se mostrando mais adequada para a determinação da resistência de embutimento de pinos de aço.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificação da influência da densidade da madeira (diferentes classes de resistência) na resposta da resistência de embutimento para um mesmo diâmetro de pino;

Verificação da influência do diâmetro do pino para uma mesma madeira na resposta de embutimento;

Avaliação da tensão de escoamento do pino para um mesmo tipo de madeira e diâmetro de pino na resposta da resistência de embutimento;

Para a simulação numérica seria interessante acrescentar uma superfície de contato entre o pino metálico e a madeira e mensurar um valor de atrito entre a madeira e o aço.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALMEIDA, D. H.; DIAS, A. A. Resistência da madeira ao embutimento perpendicular às fibras: comparação de métodos de ensaio. **AMBIENTE CONSTRUÍDO (SÃO PAULO. IMPRESSO)**, v. 19, p. 175-181, 2019.
- BAENA, J. S. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira**. 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.
- FILHO, Avelino Alves. **“Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE”**, 6th edição. Érica. 2013.
- GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013**. 2018. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2018.
- MAIA, B. B. **Avaliação da resistência ao embutimentos de pinos metálicos em painéis Cross Laminated Timber confeccionados em pinus**. 2019. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Civil, 2019.
- MÁLAGA-CHUQUITAYPE, C; KARAGIANNIS, V; ELGHAZOULI A.Y. **Modified foundation modelling of dowel embedment in glulam connections**. Construction and Building Materials, 2016, V. 102, p. 1168-1179, 2016.
- MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** 2016. Disponível em <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em Fevereiro de 2021.
- MOLINA, J. C. et al. **Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004)**. REM - International Engineering Journal, v. 70, n. 1, p. 9–17, 2017a.
- MOLINA, J. C. et al. **Embedment strength of steel dowel in wood specimens according t ABNT NBR 7190 : 1997 and ASTM D5764 : 2007 Standards Resistencia al aplastamiento d pernos de acero en cuerpos de prueba de madera**. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería v. 24, n. 3, p. 492–500, 2017b.
- MOLINA, J. C., CALIL JUNIOR. C. **Development of timber concrete composite bridge decks in Brazil**. Structural Engineer, v. 88, n. 1, p. 26-33, 2010.
- MOLINA, J. C., CARREIRA, M. R., CALIL JUNIOR, C. **Pullout strength of axially loaded**

steel rods bonded in glulam at a 45° angle to the grain. *Materials Research*, v. 12, n 1, p. 427-432, 2009.

MOLINA, J. C.; RIBAS JUNIOR, A. S. **Resistência de embutimento em amostras padronizadas de madeira segundo as normas brasileira, europeia e americana.** In: *Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendência*. 1. ed. rev. [S. l.]: Editora Científica, 2020. v. 1, cap. 21, p. 317-329. ISBN 978-65-87196-62-6.

MOLINA, J. C.; RIBAS JUNIOR, A. S.; CHRISTOFORO, A. L. **Embedding strength of Brazilian woods and recommendation for the Brazilian standard.** *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-STRUCTURES AND BUILDINGS*, v. 1, p. 1-24, 2020.

MOLINA, J.C., CESAR, T.K., ALMEIDA, C.C., e PALLAROLAS, E. A. F. F (2014) **Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004).** *REM – International Engineering Journal* 70(1): 9-17.

NICOLAS, E.A. **Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados a madeira.** Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil. Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Campinas. Campinas, Brasil. 2006.

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

PALLAROLAS, E. A. F. F. **Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeiras de reflorestamento.** 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de reducción de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera.** 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Engenharia Civil) –Universidad Politécnica de Cataluña y Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014.

SANDHAAS, C. et al. **Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species.** *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 71, n. 5, p. 599–608, 2013.

SANTOS, C. L.; JESUS, A. M. P.; MORAIS J. J. L.; **Embedment strength characterization of pine wood. Numerical study of the non-linear behaviour.** *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. v 27, n. 1, p 15-26, 2015.

SAWATA, K.; YASUMURA, M. **Determination of embedding strength of wood for doweltype fasteners.** *Journal of Wood Science*, v. 48, n. 2, p. 138–146, 2002.

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.

TERRIN, M. V. P.; GÓES, J. L. N.; PLETZ, E. **Avaliação experimental da madeira ao embutimento.** In: XVI EBRAMEM + III CLEM. Anais. São Carlos: 2018.

XU, B.; BOUCHAIR, A.; RACHER, P. **An appropriate wood constitutive law for the simulation of the non-linear behavior of timber joints.** Journal of Materials in Civil Engineering v. 26, 2014.

APÊNDICE A – GRÁFICOS PARA ABNT 7190 (1997)

Gráficos para Garapeira – Direção paralela às fibras.

Figura 41: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção paralela às fibras; Diâmetro do pino de 6,72 mm.

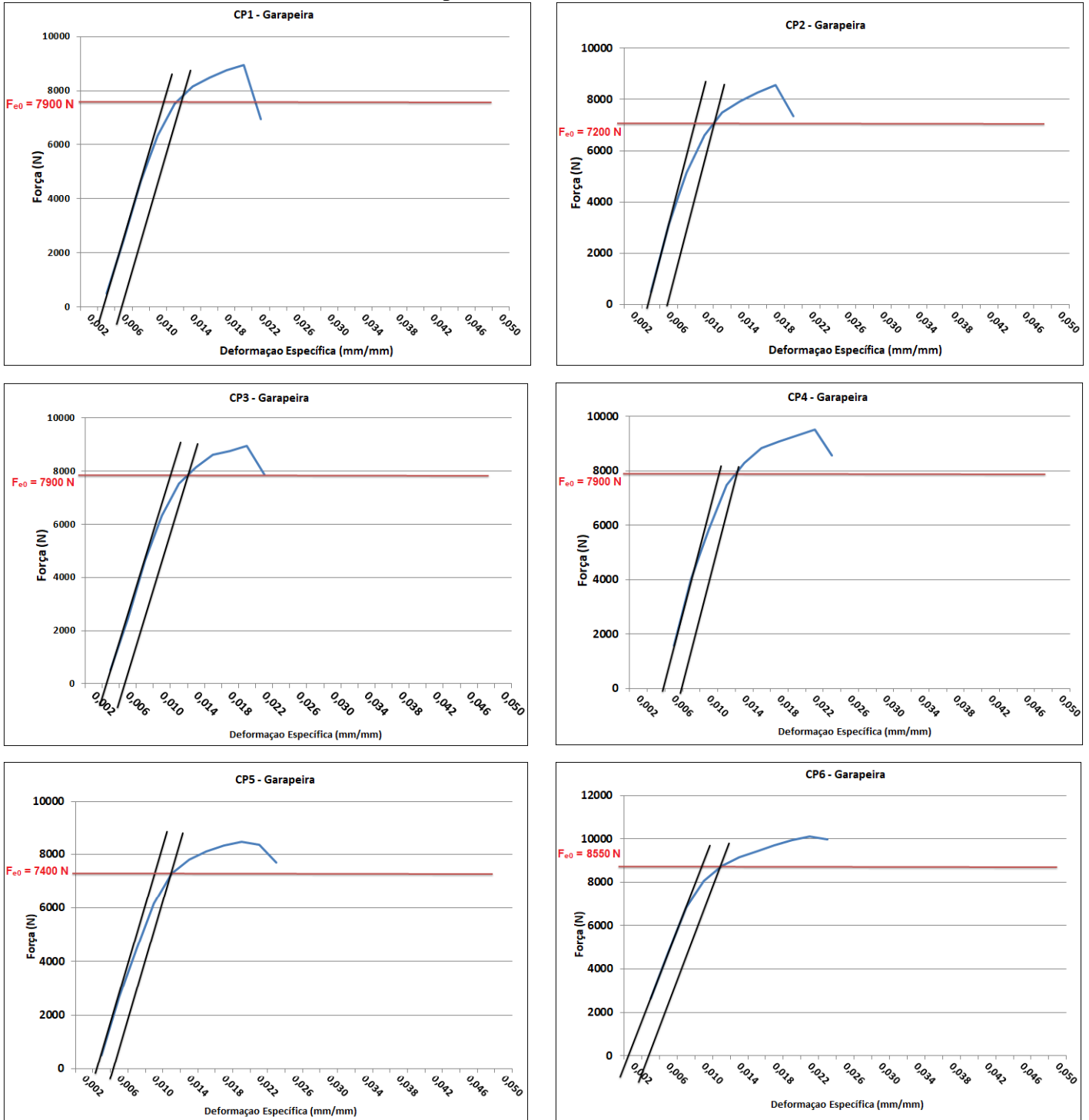
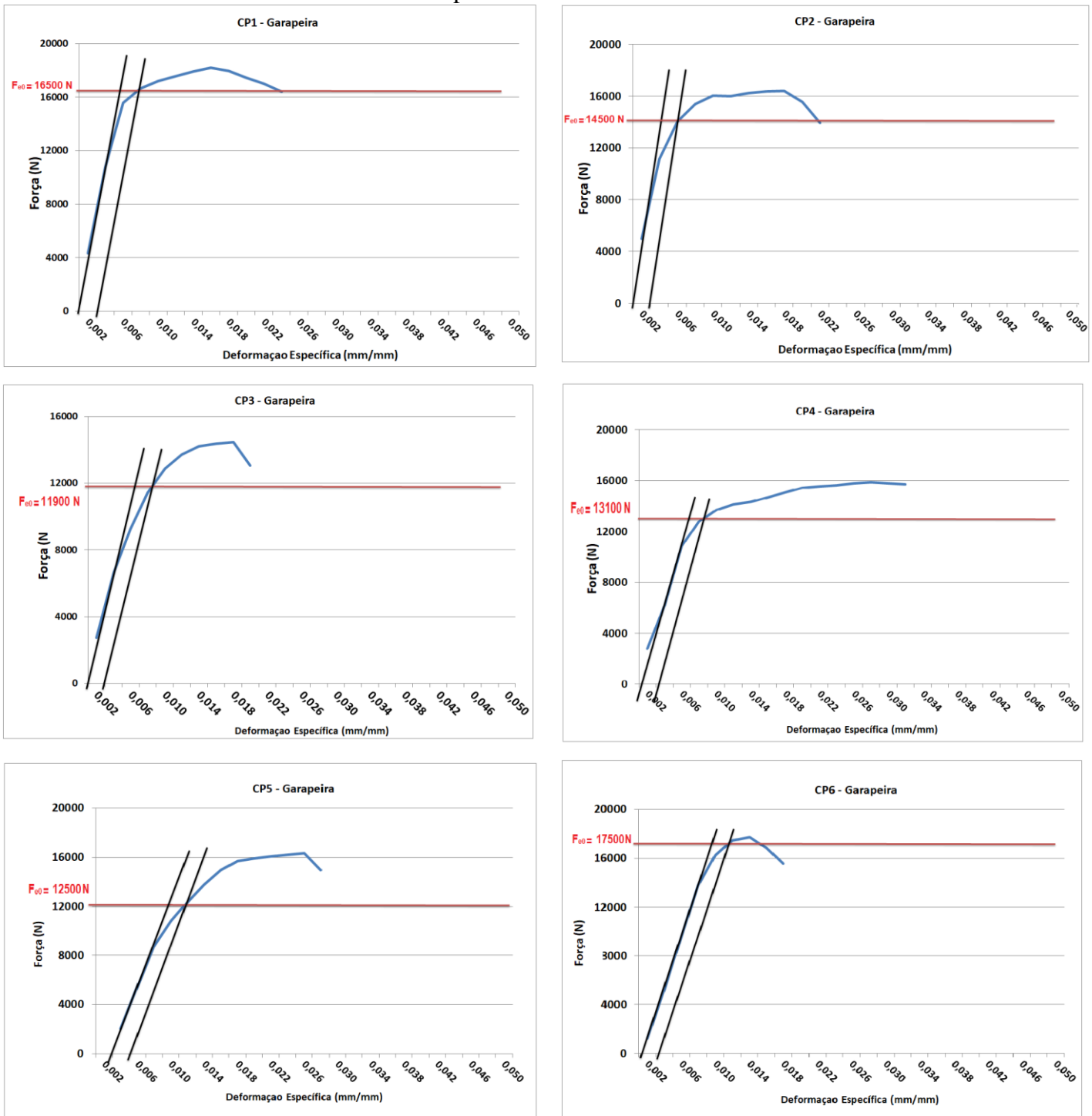
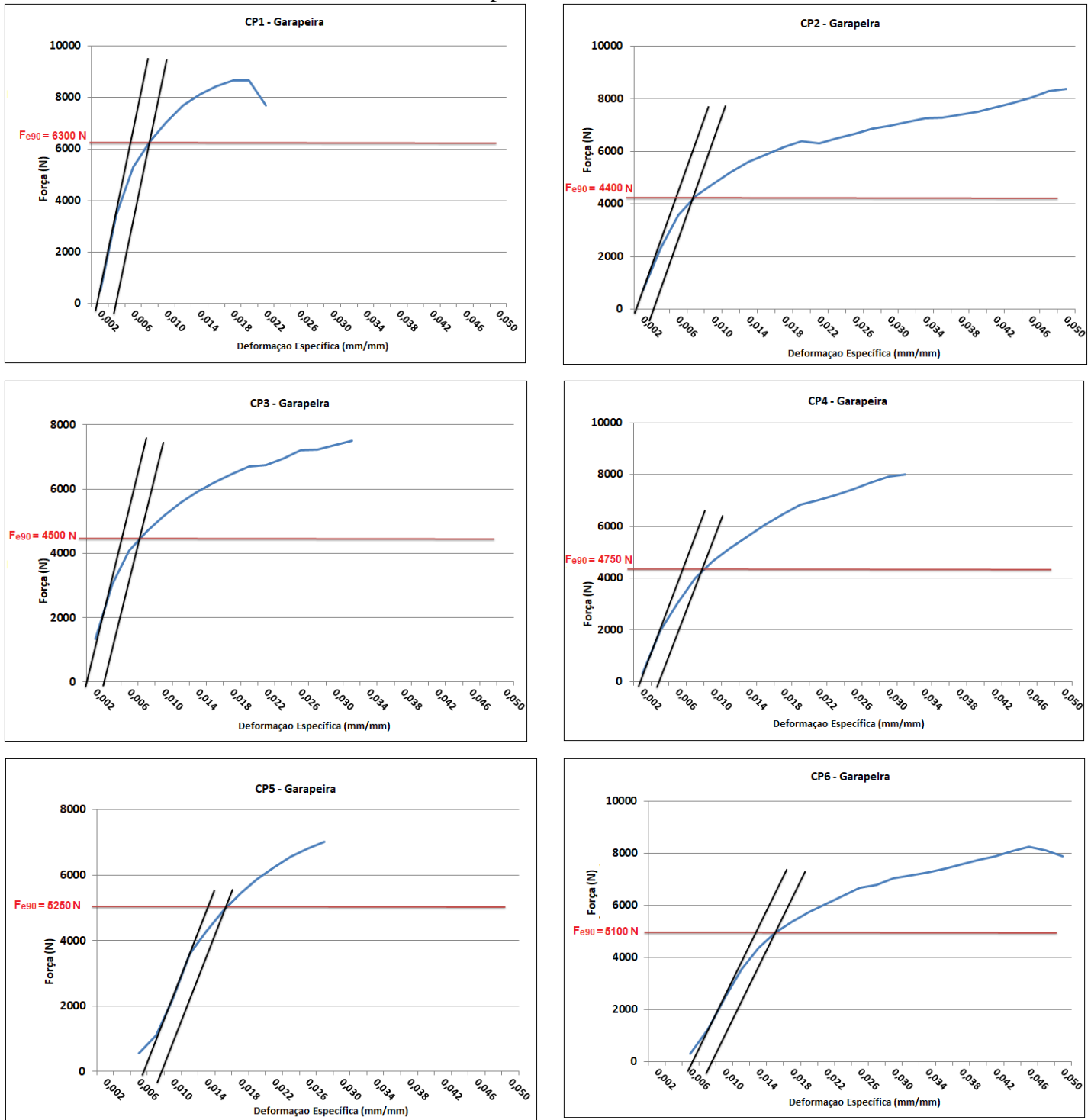


Figura 42: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção paralela às fibras; Diâmetro do pino de 10 mm.



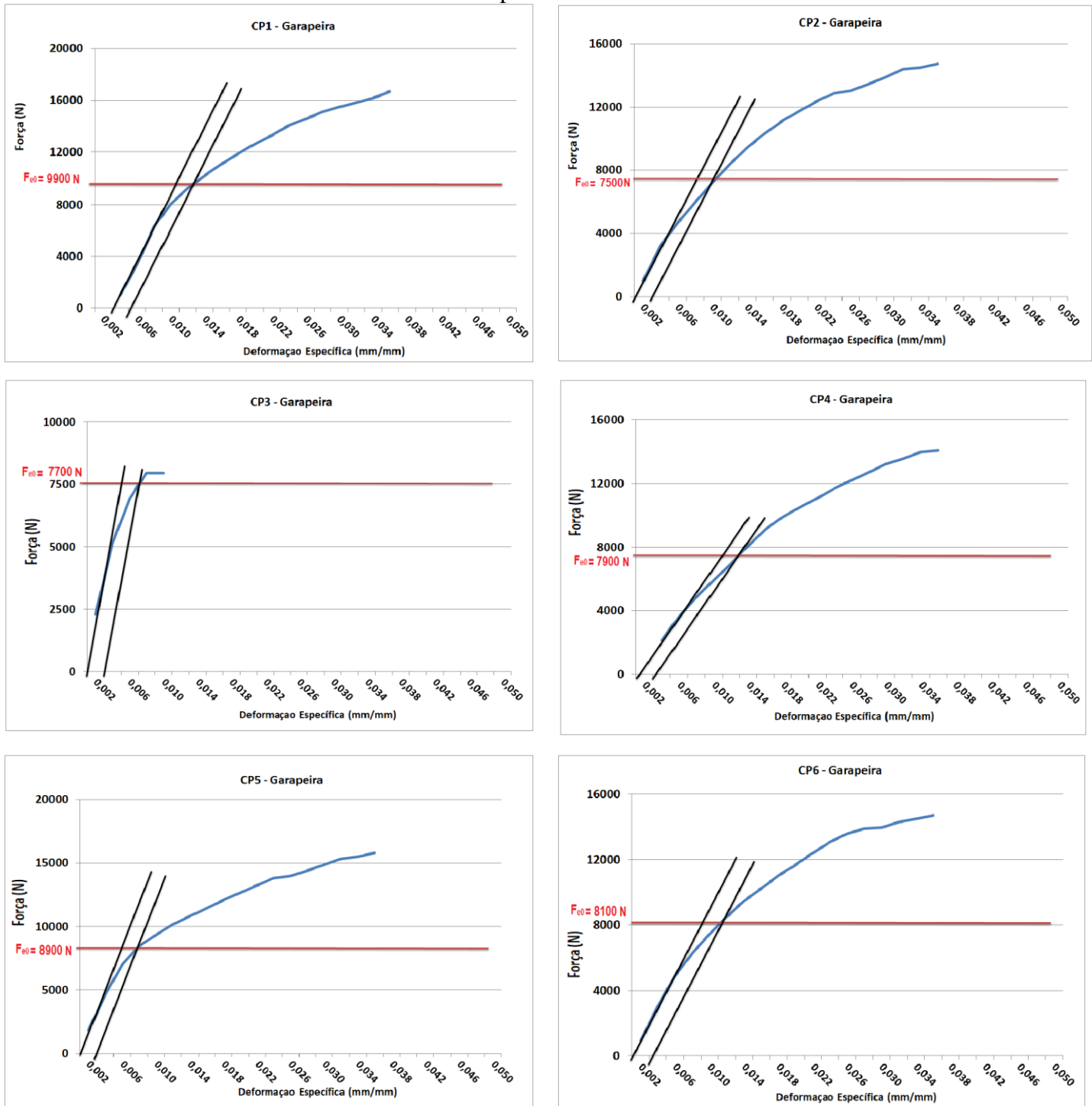
Gráficos para Garapeira – Direção perpendicular às fibras.

Figura 43: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.



Gráficos para Garapeira – Direção perpendicular às fibras.

Figura 44: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Garapeira; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção paralela às fibras.

Figura 45: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

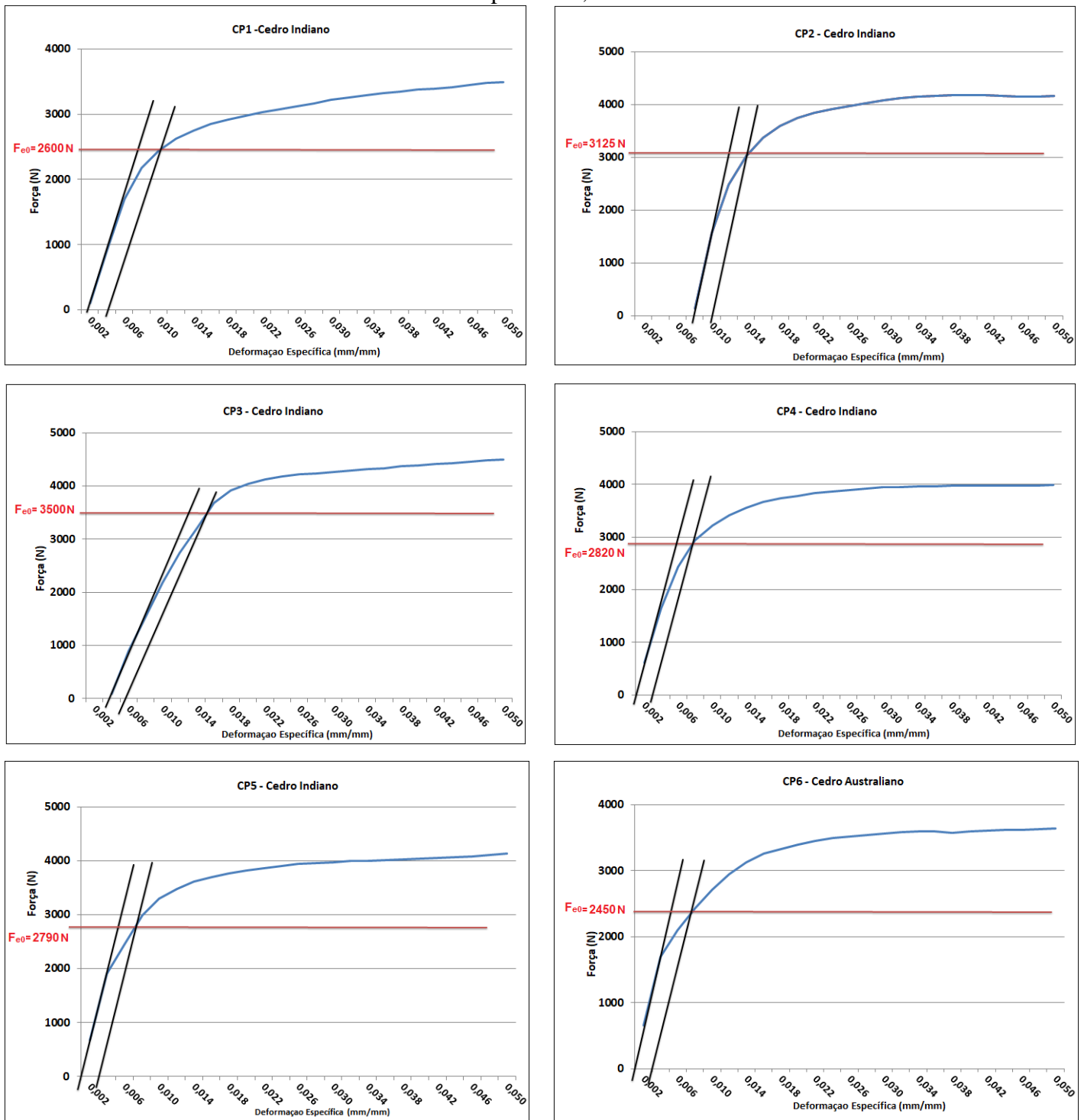
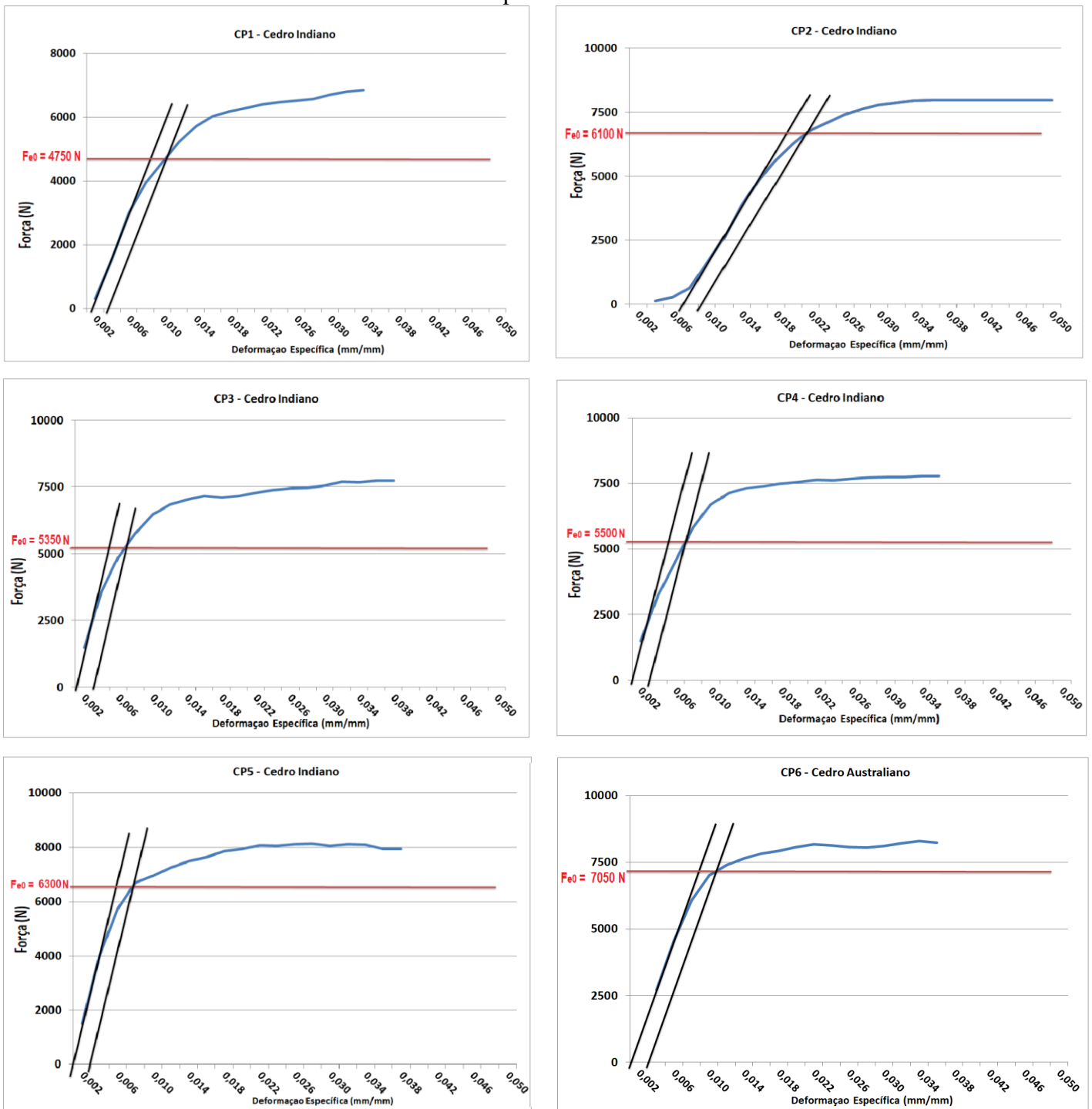


Figura 46: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção perpendicular às fibras.

Figura 47: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

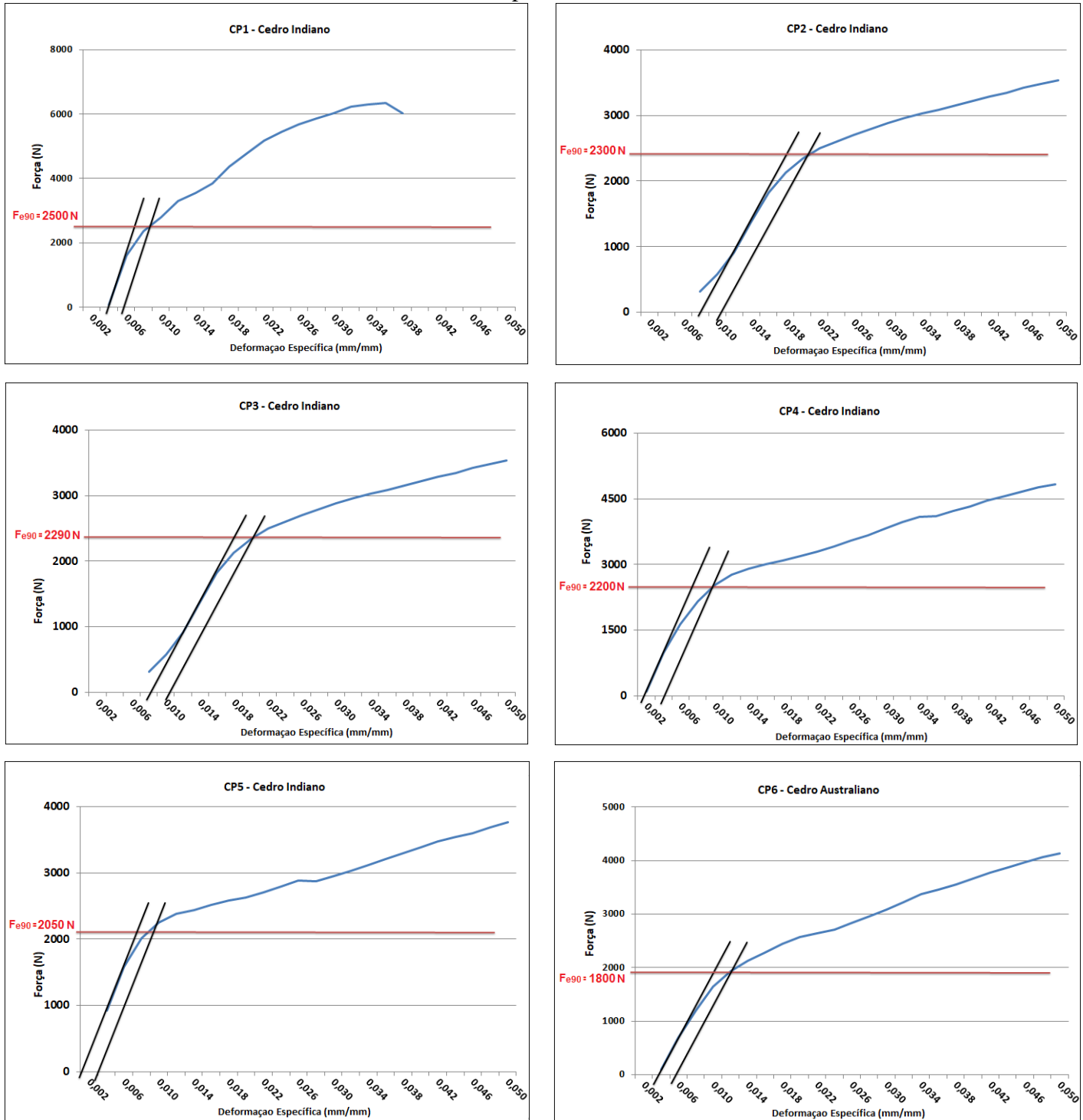
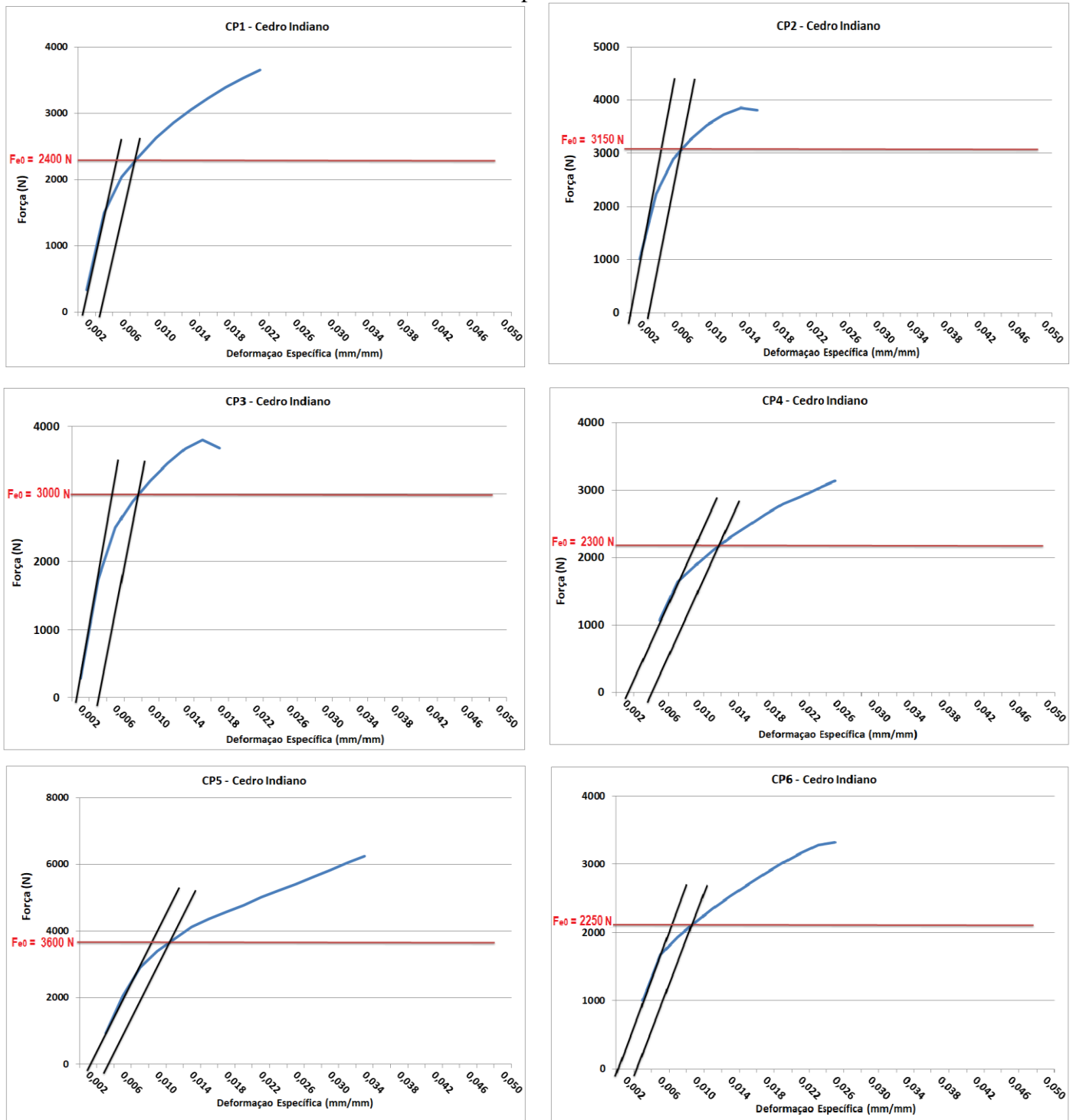


Figura 48: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção paralela às fibras.

Figura 49: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

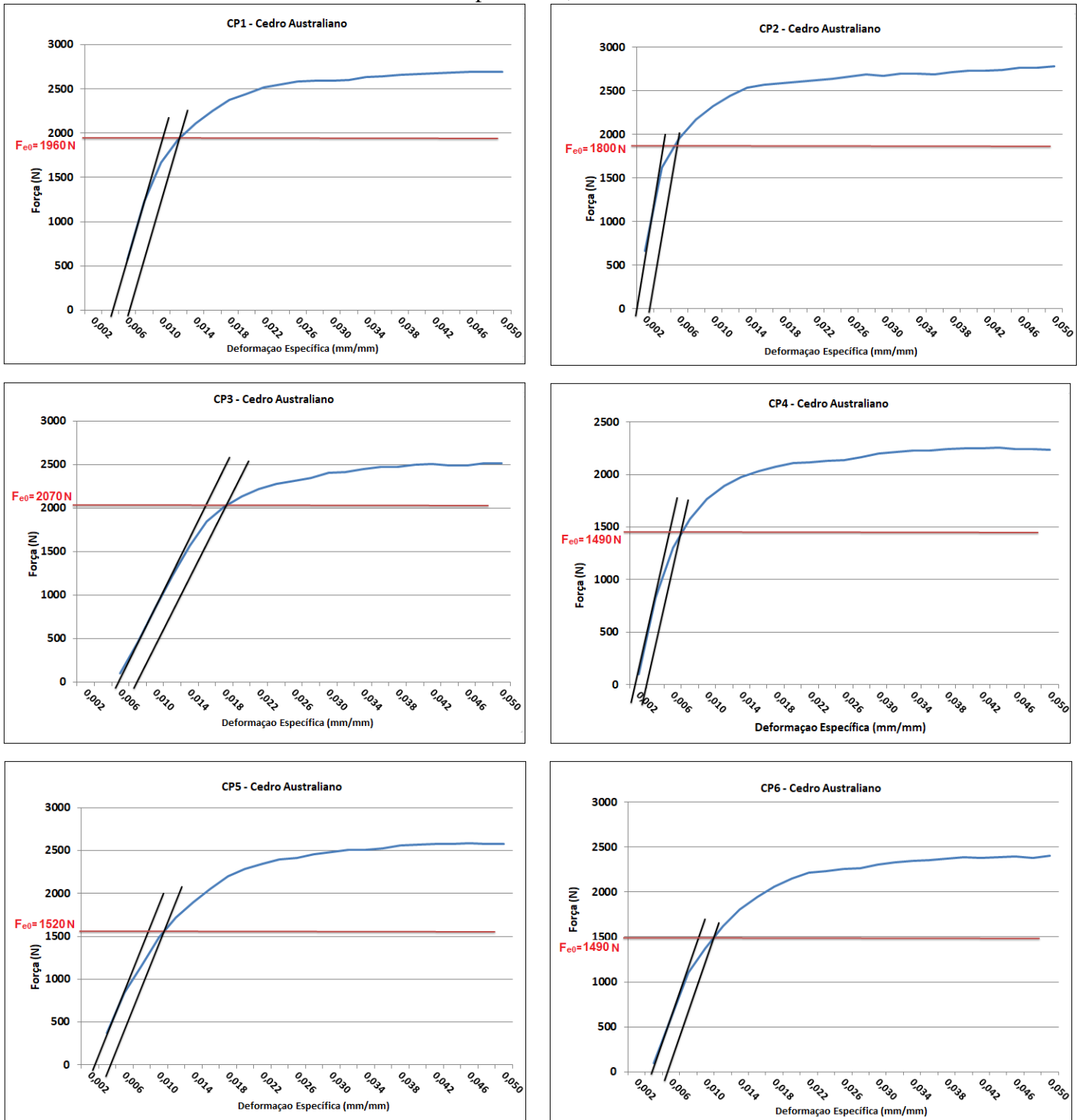
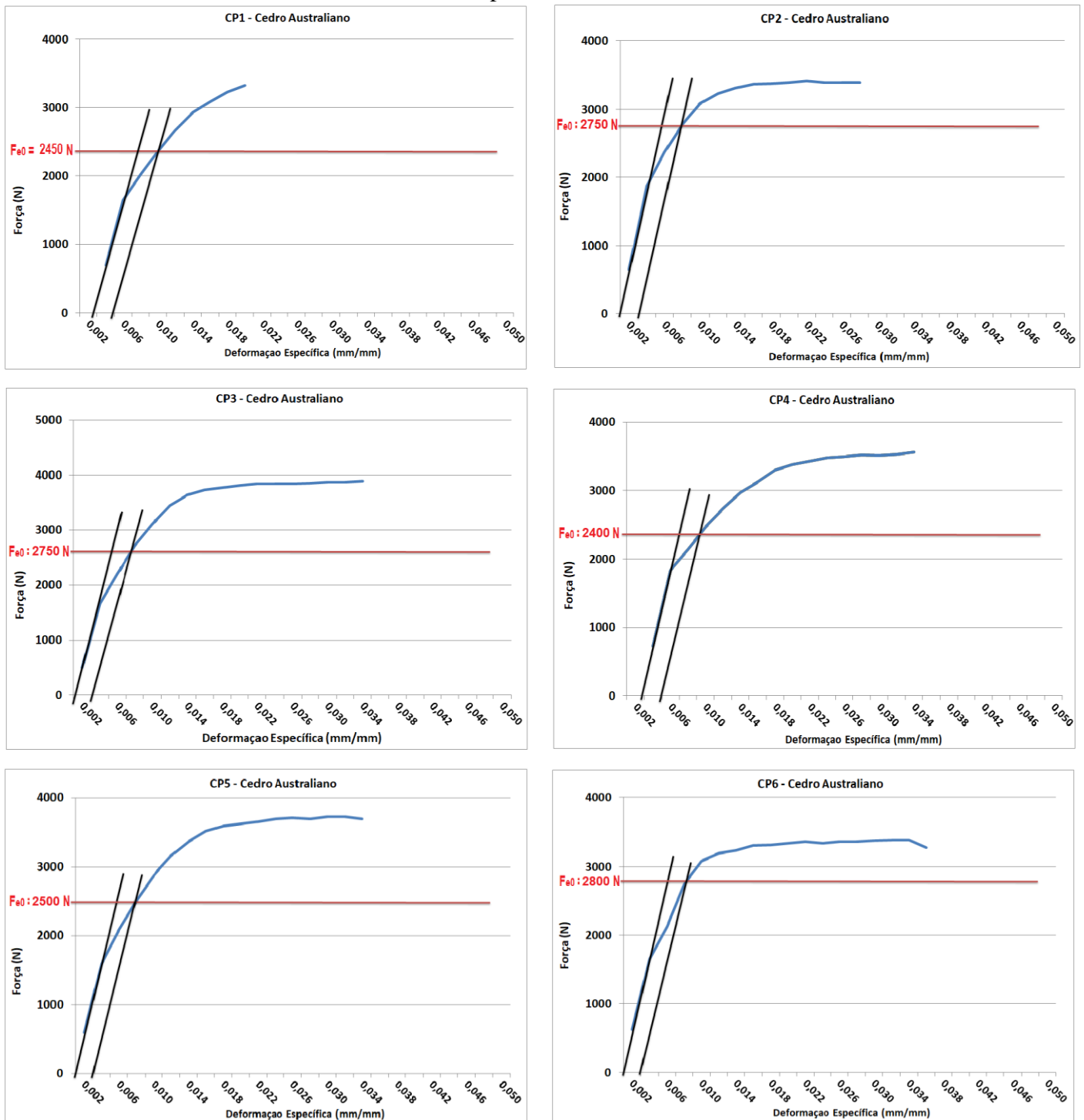


Figura 50: Determinação de F_{e0} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção perpendicular às fibras.

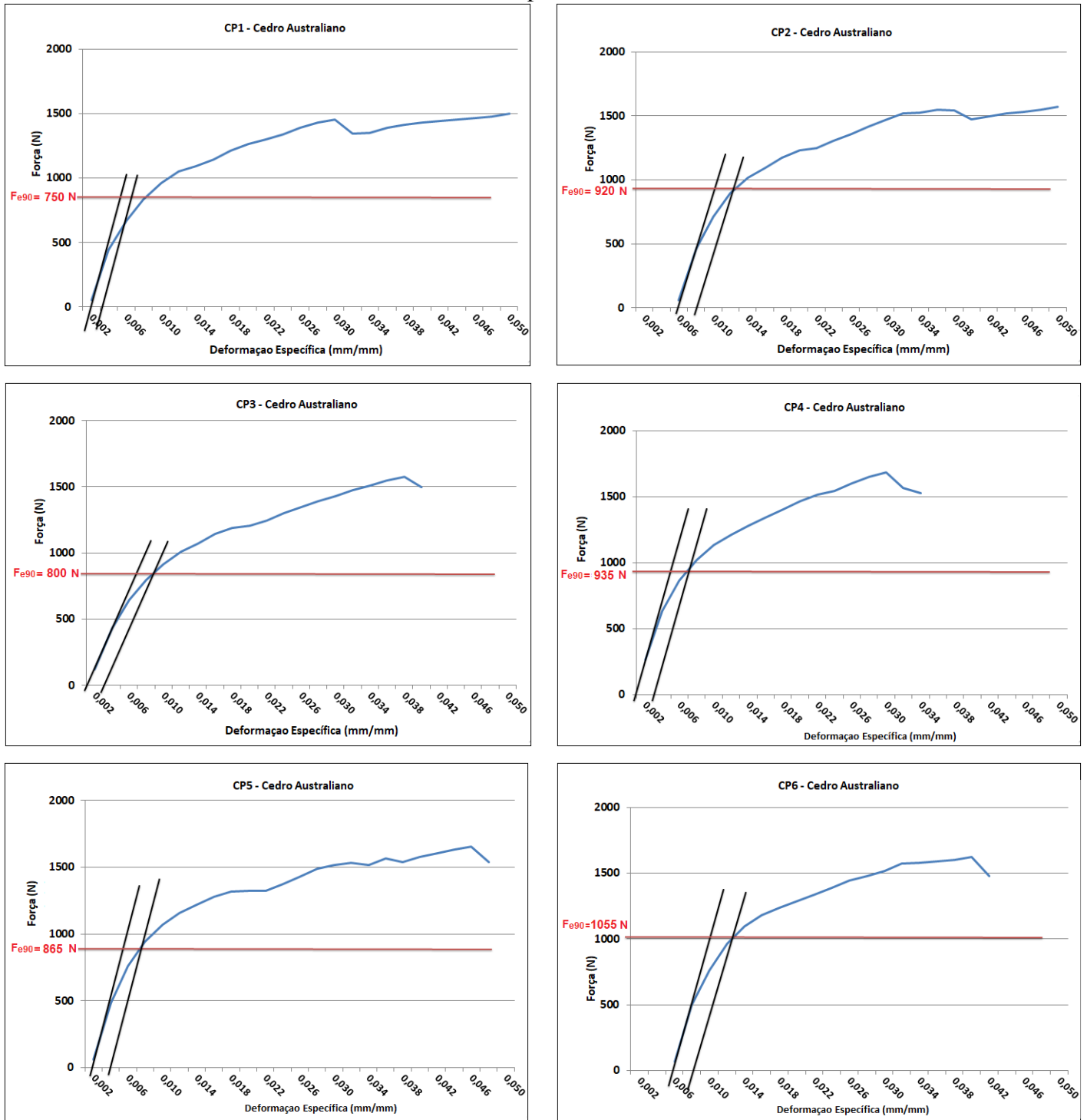
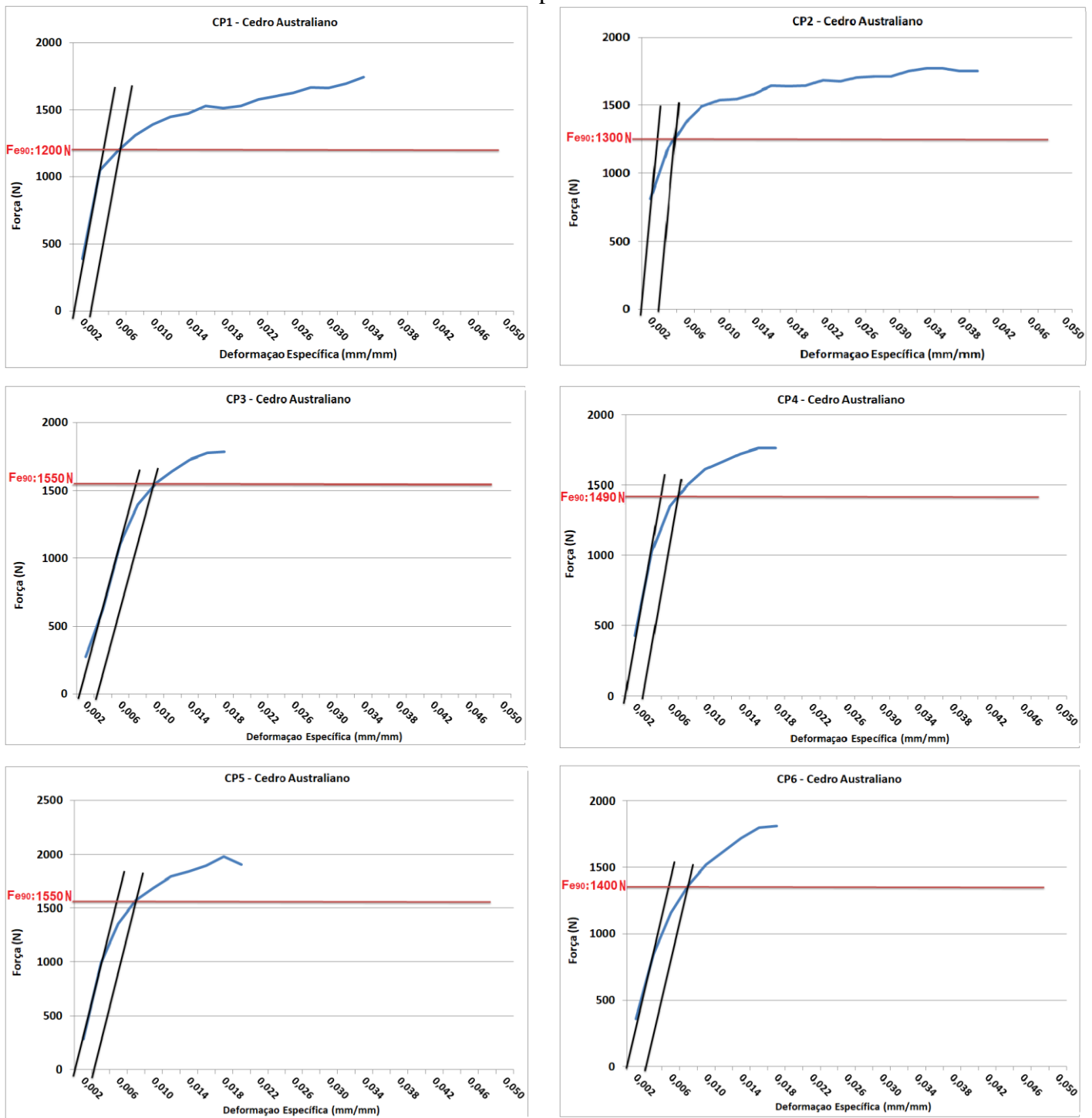
Figura 51: Determinação de F_{e90} ; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

Figura 52: Determinação de Fe90; ABNT NBR 7190; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



APÊNDICE B – GRÁFICOS PARA EN 383 (2007)

Gráficos para a Garapeira – Direção paralela às fibras.

Figura 53: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

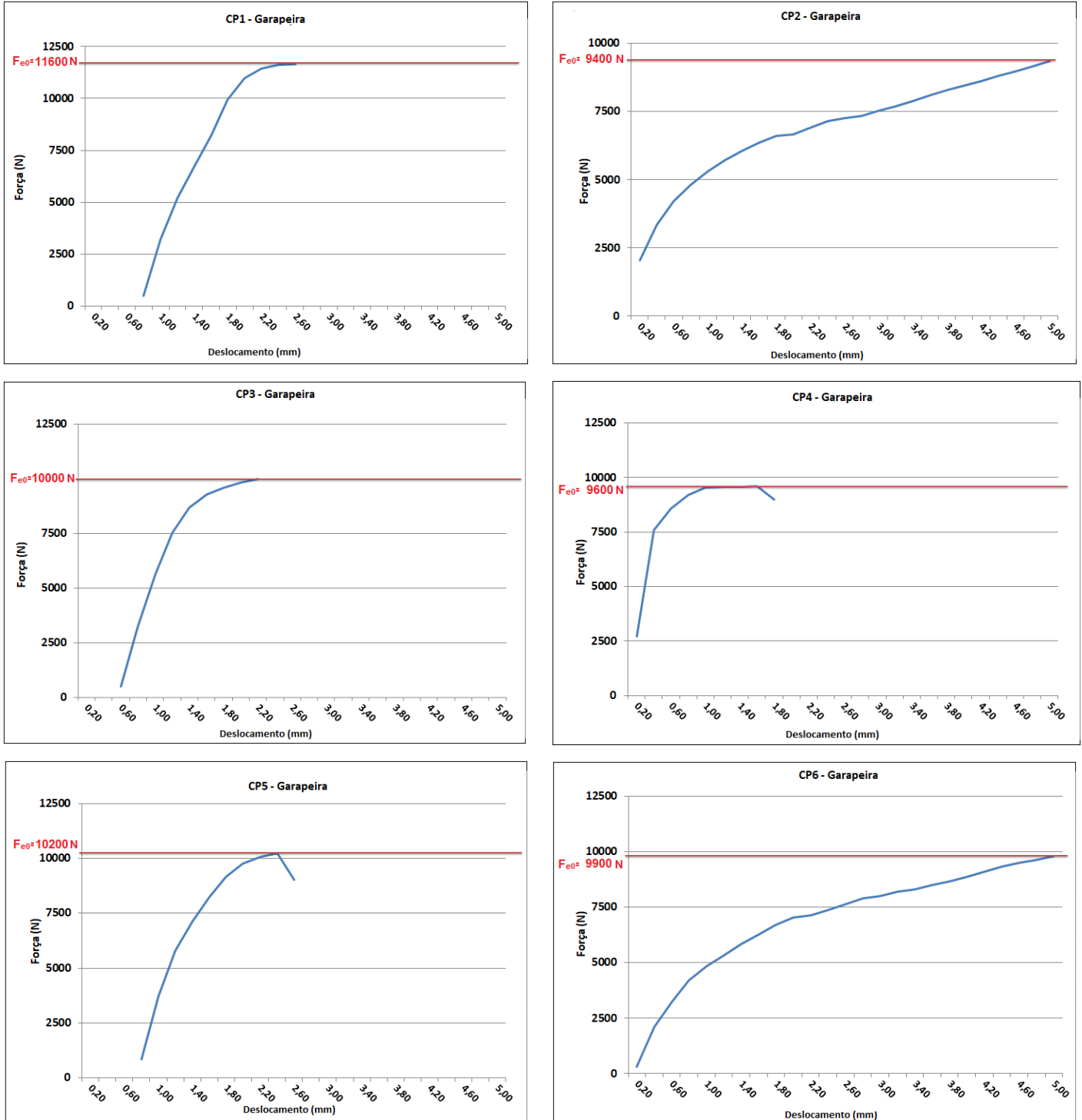
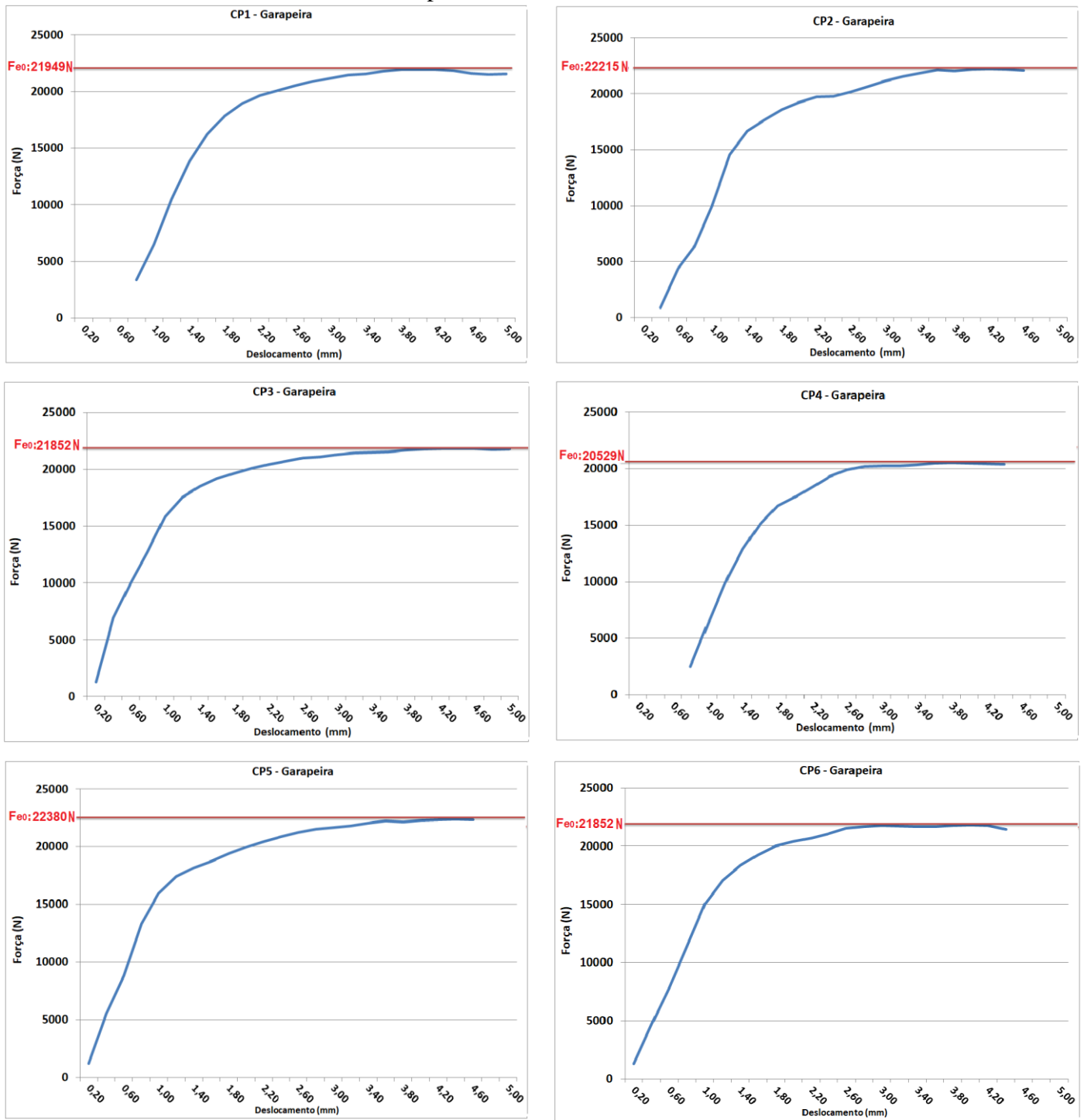


Figura 54: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para Garapeira – Direção perpendicular às fibras.

Figura 55: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro de 6,72 mm.

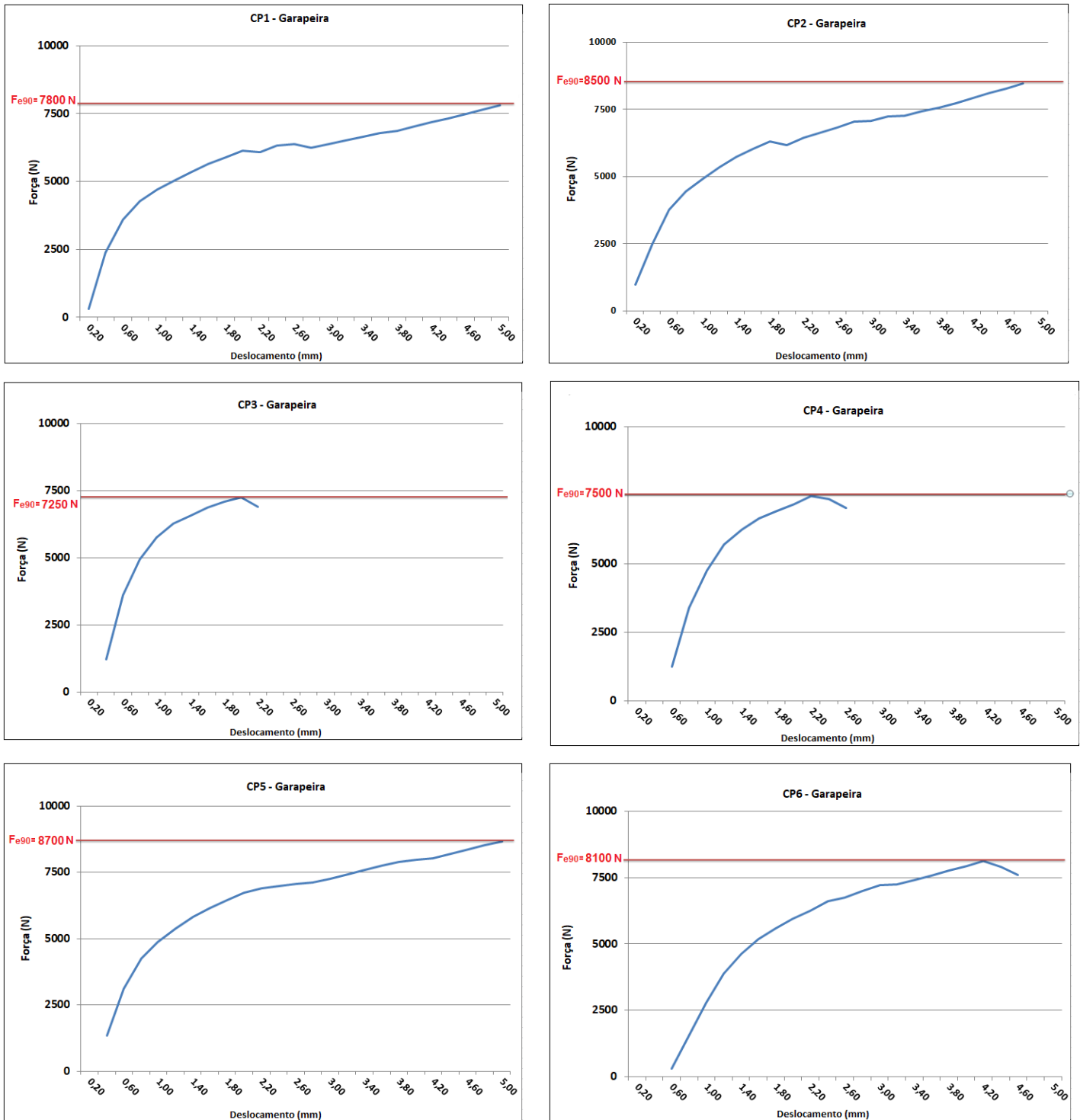
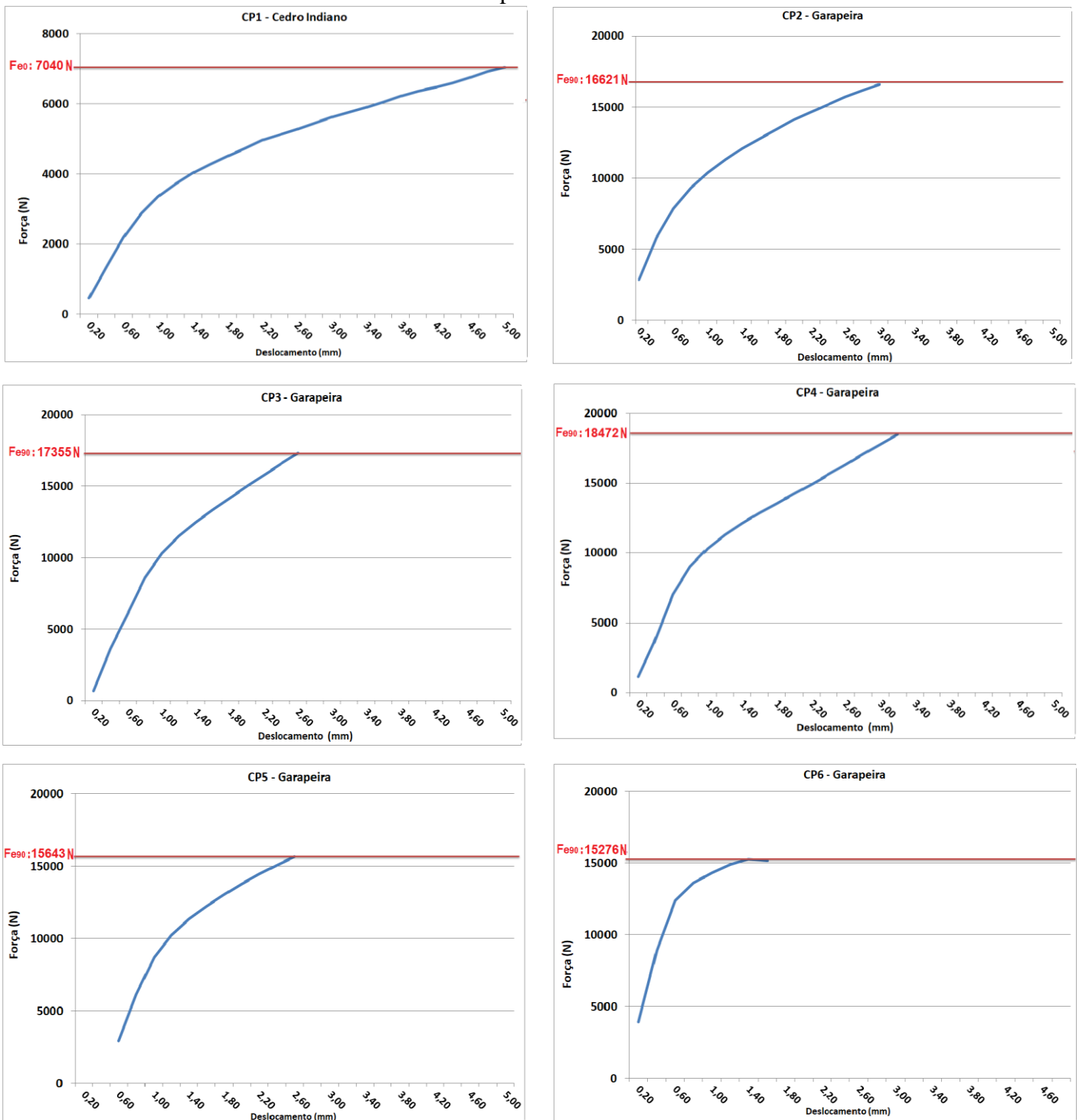


Figura 56: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção paralela às fibras.

Figura 57: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

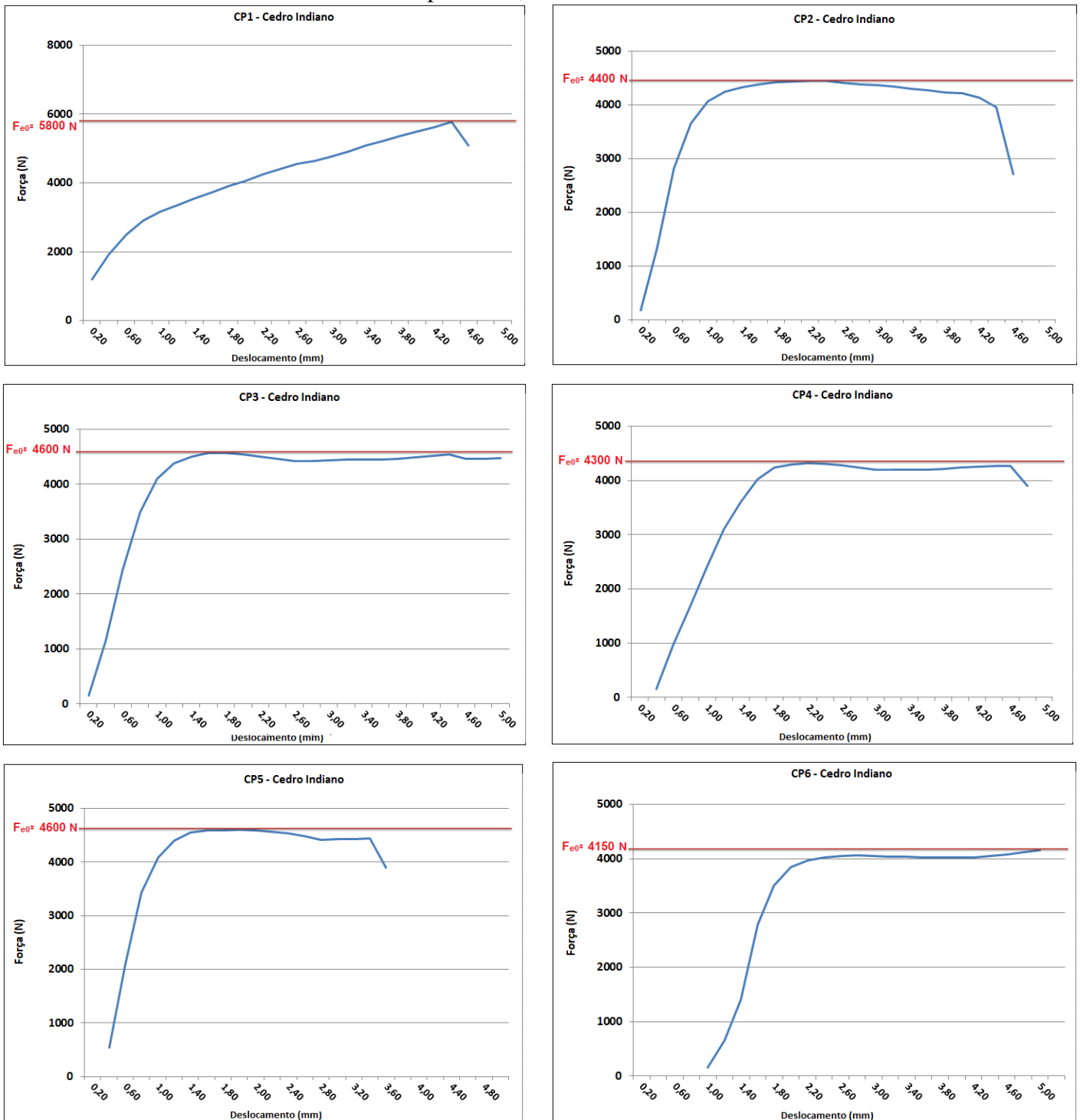
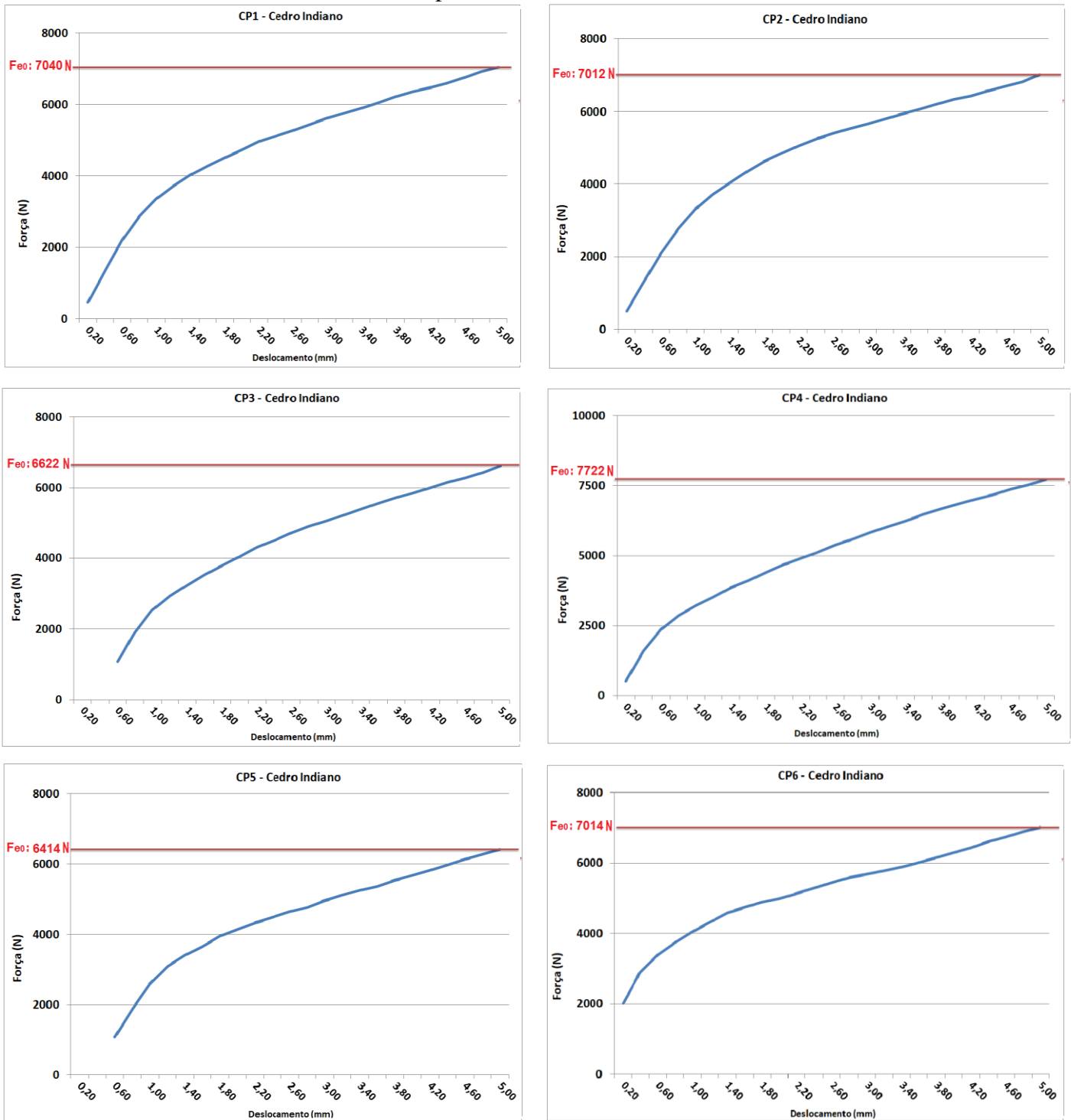


Figura 58: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção perpendicular às fibras.

Figura 59: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

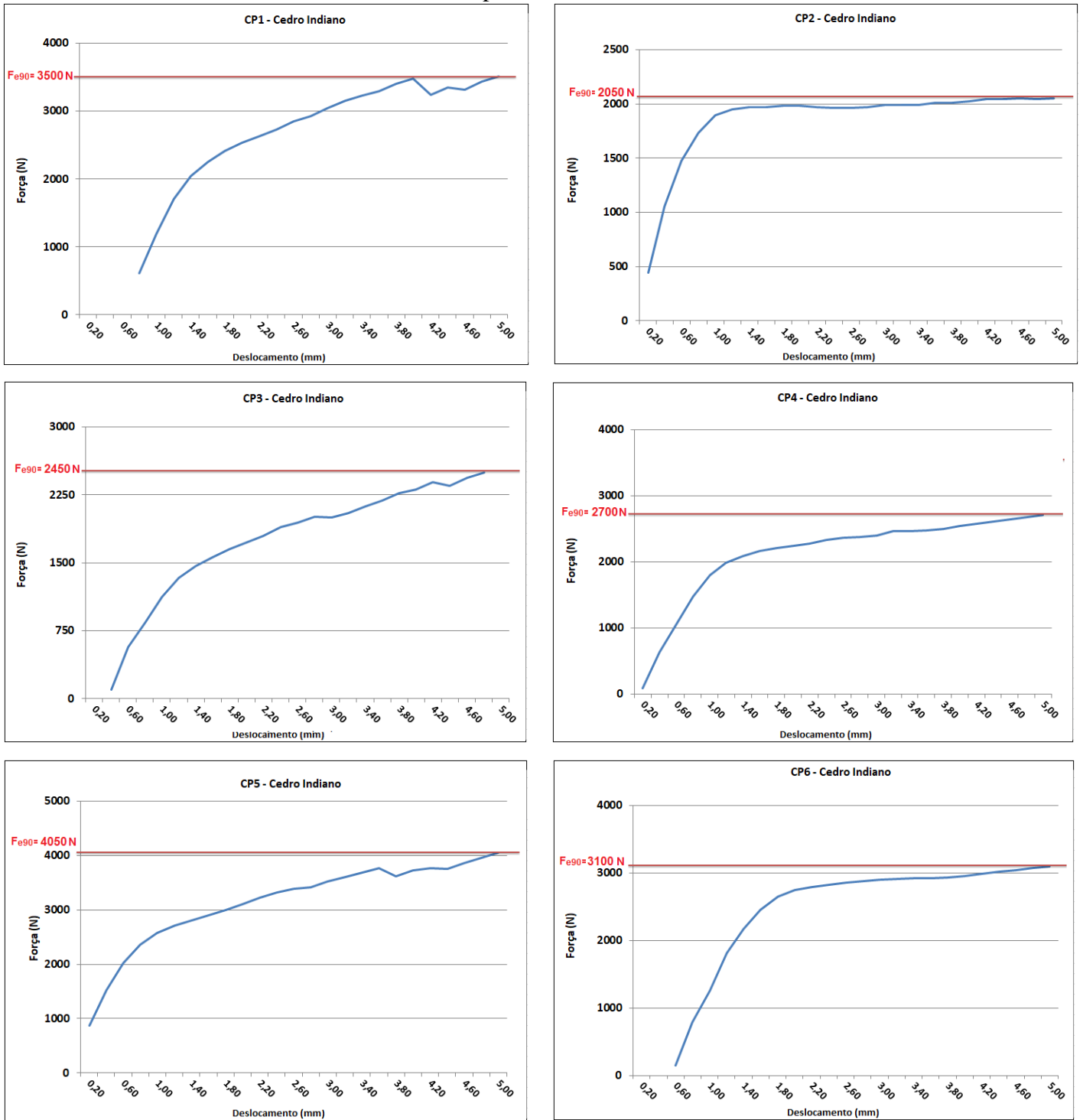
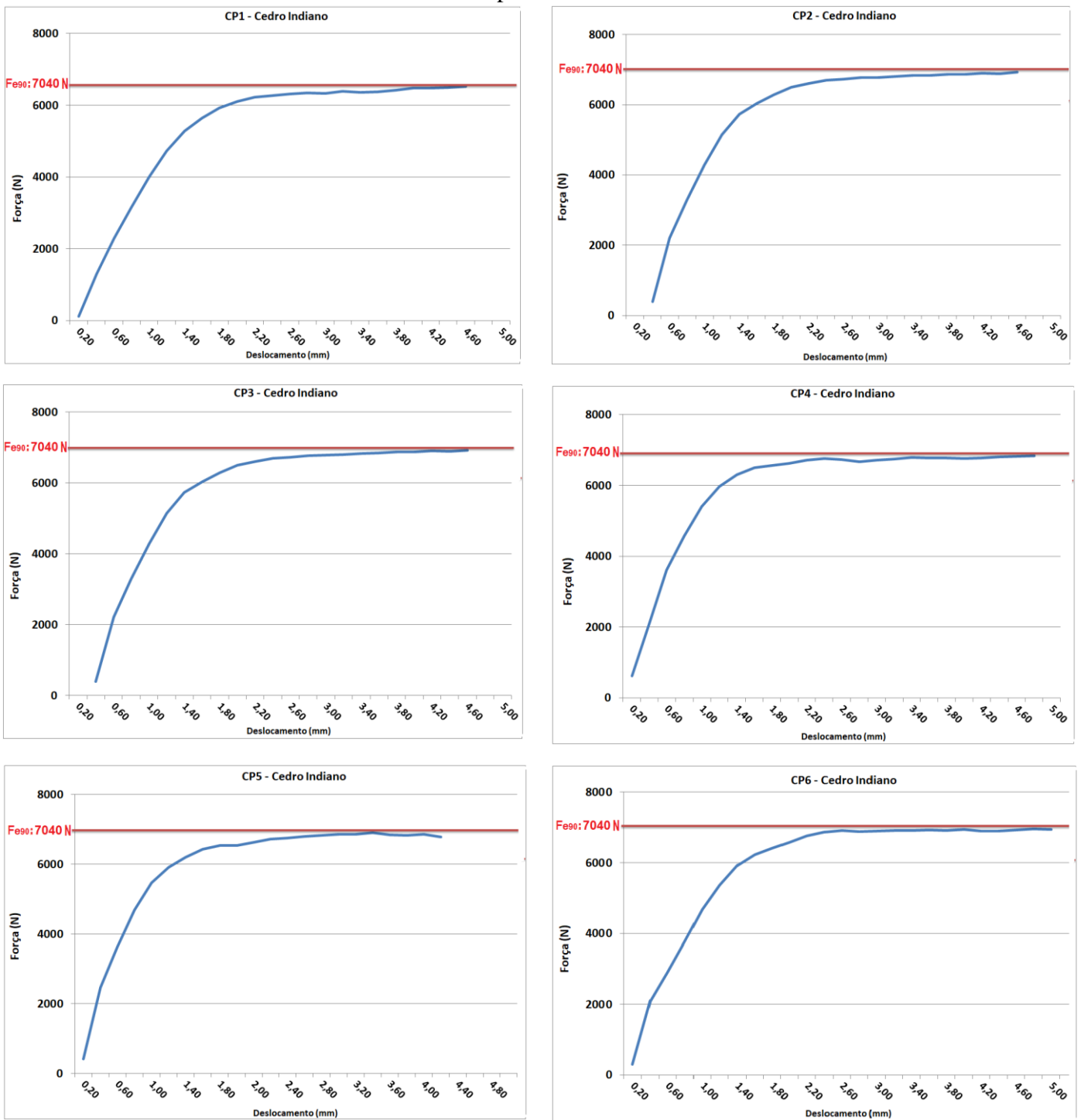


Figura 60: Determinação de Fe90; EN 383:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção paralela às fibras.

Figura 61: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

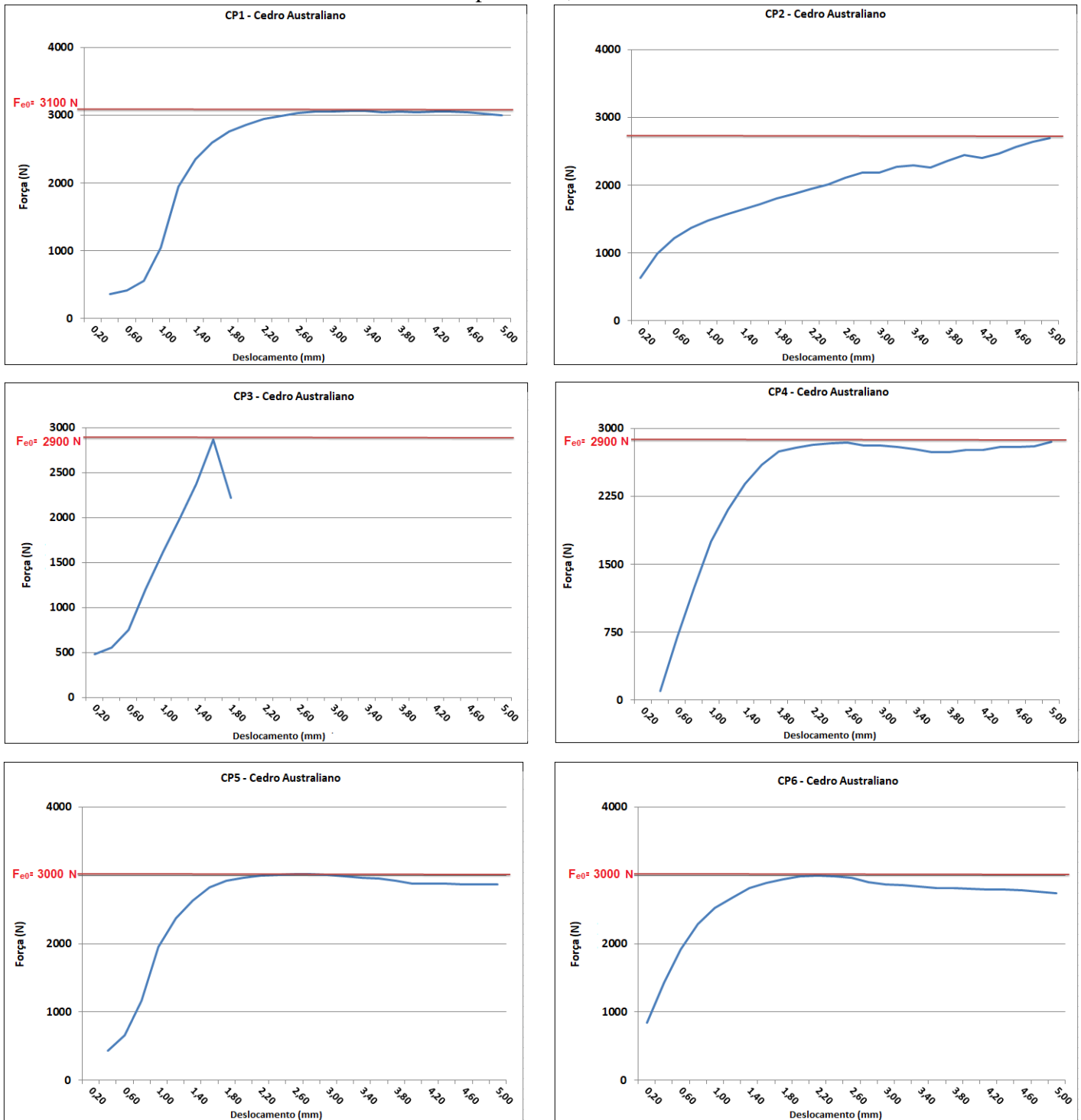
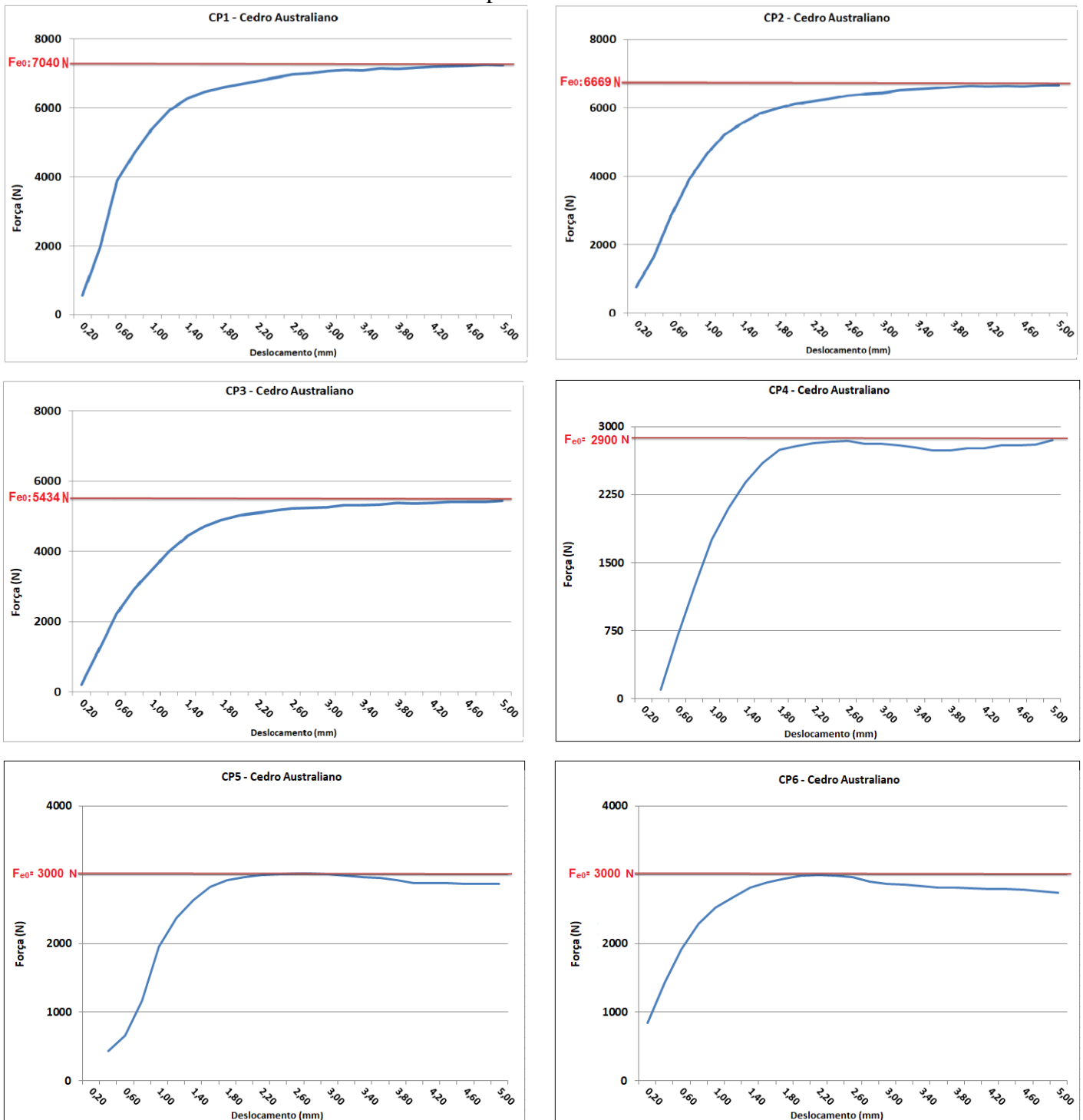


Figura 62: Determinação de F_{e0} ; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção perpendicular às fibras.

Figura 63: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

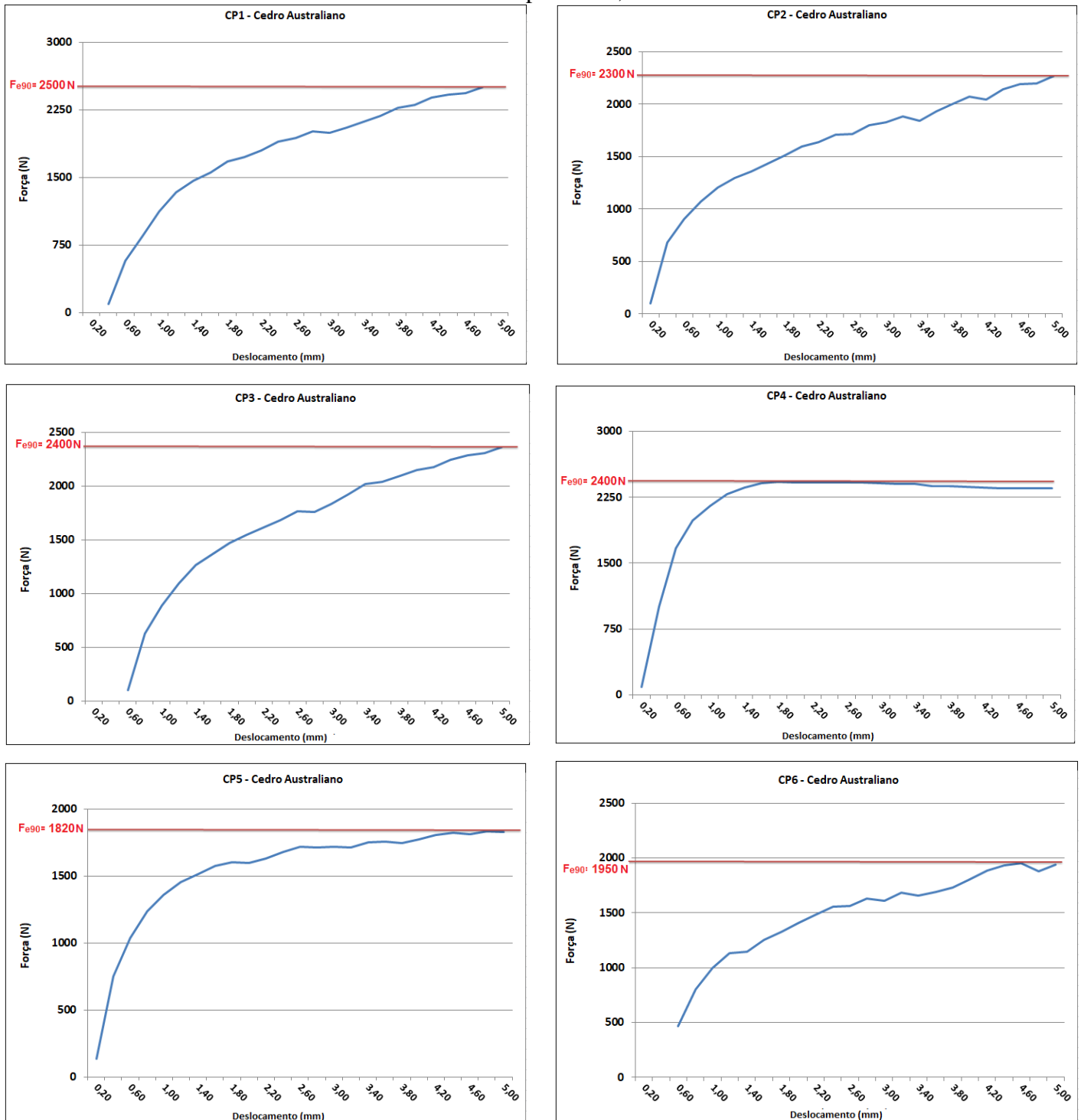
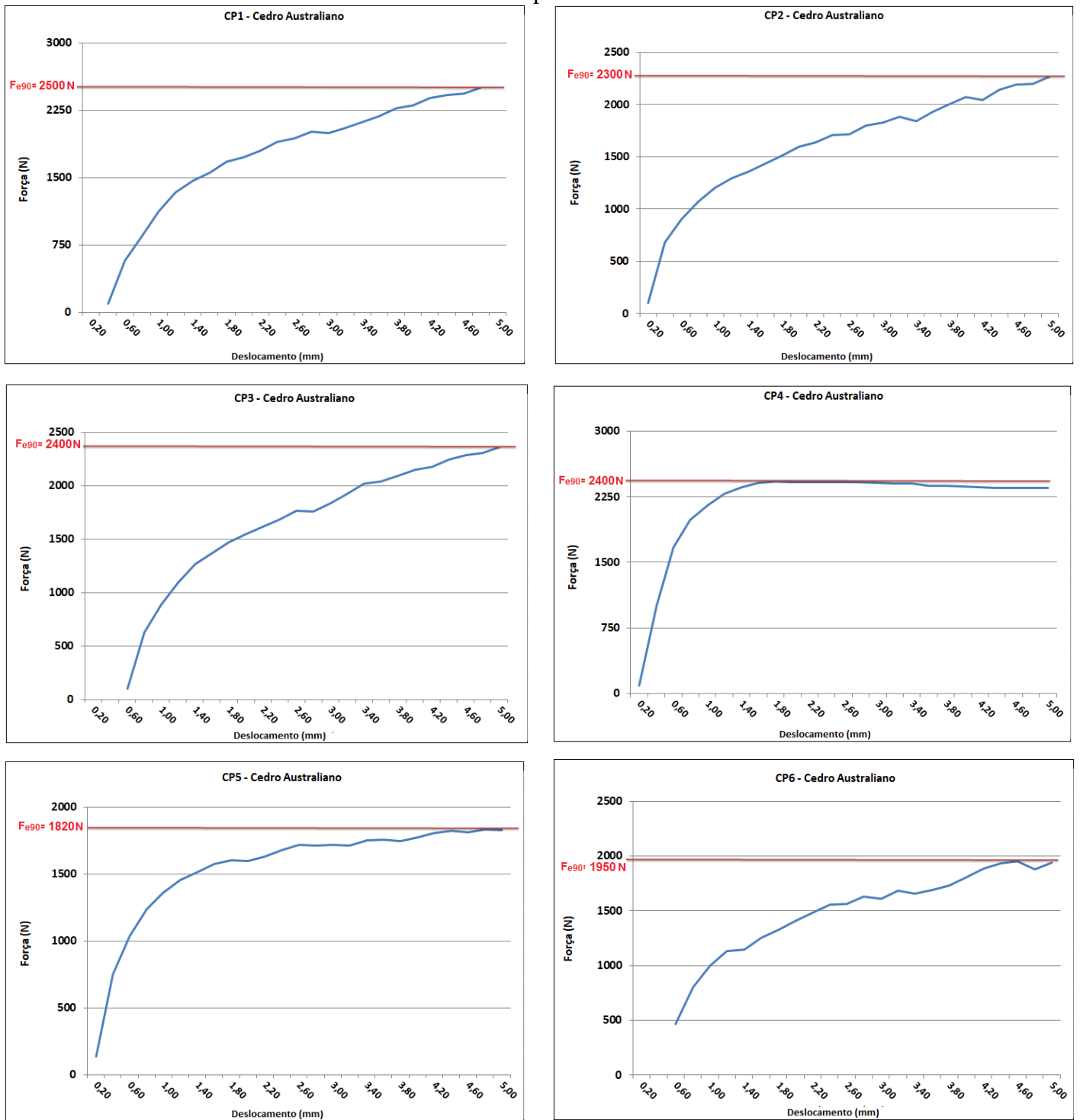


Figura 64: Determinação de F_{e90} ; EN 383:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



APÊNDICE C – GRÁFICOS PARA ASTM D5764 (2007)

Gráficos para a Garapeira – Direção paralela às fibras.

Figura 65: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

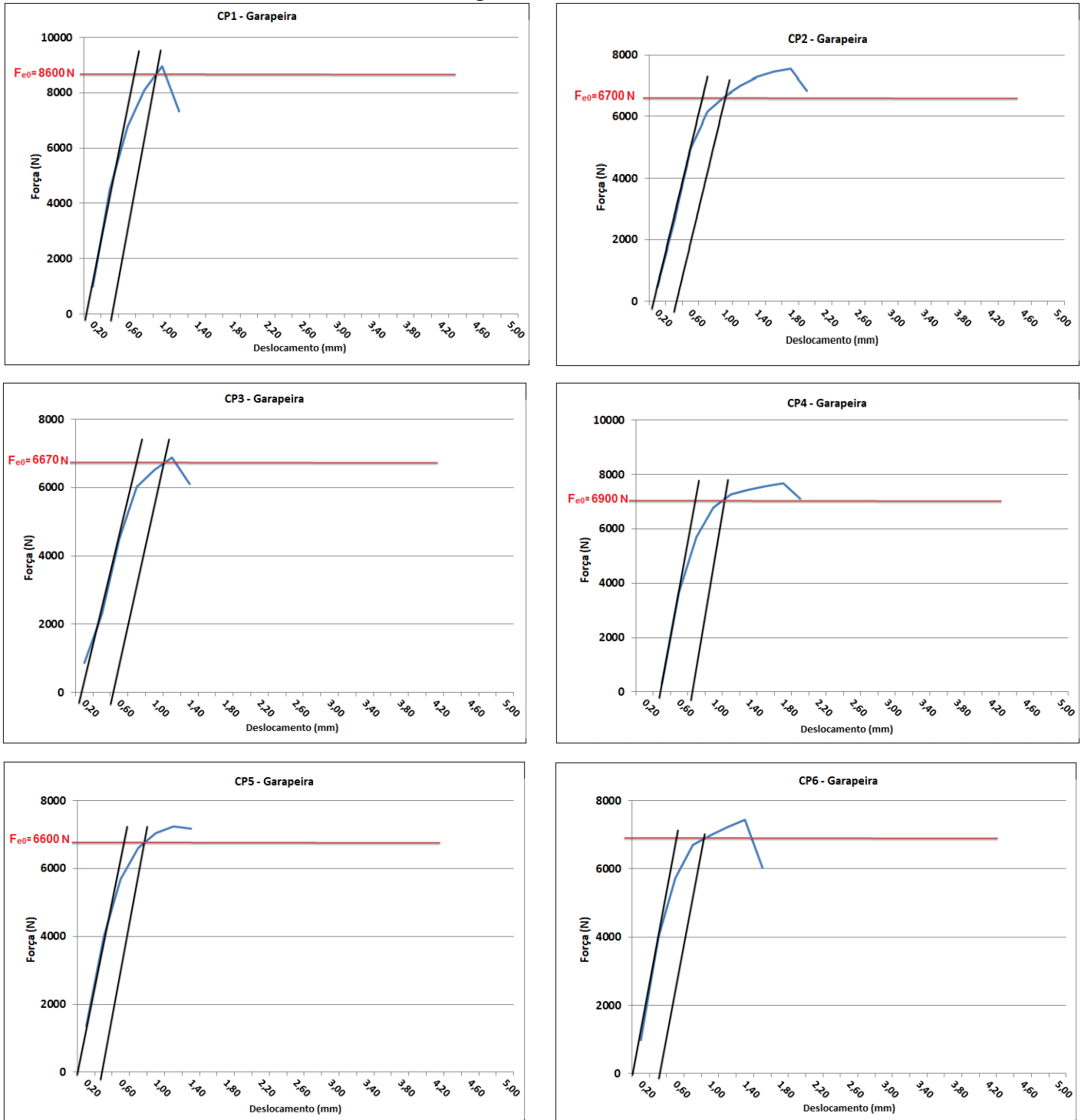
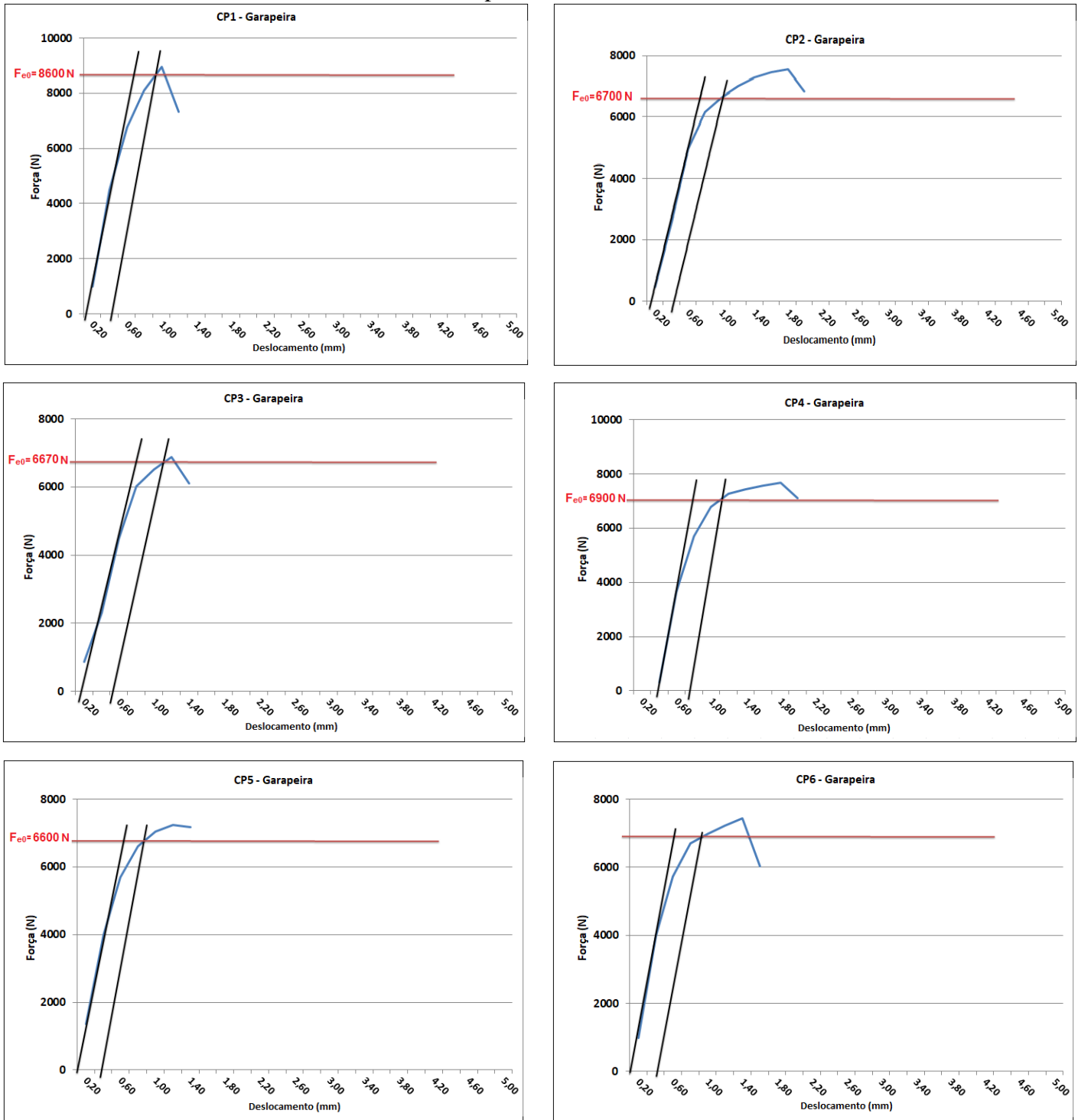


Figura 66: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para Garapeira – Direção perpendicular às fibras.

Figura 67: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

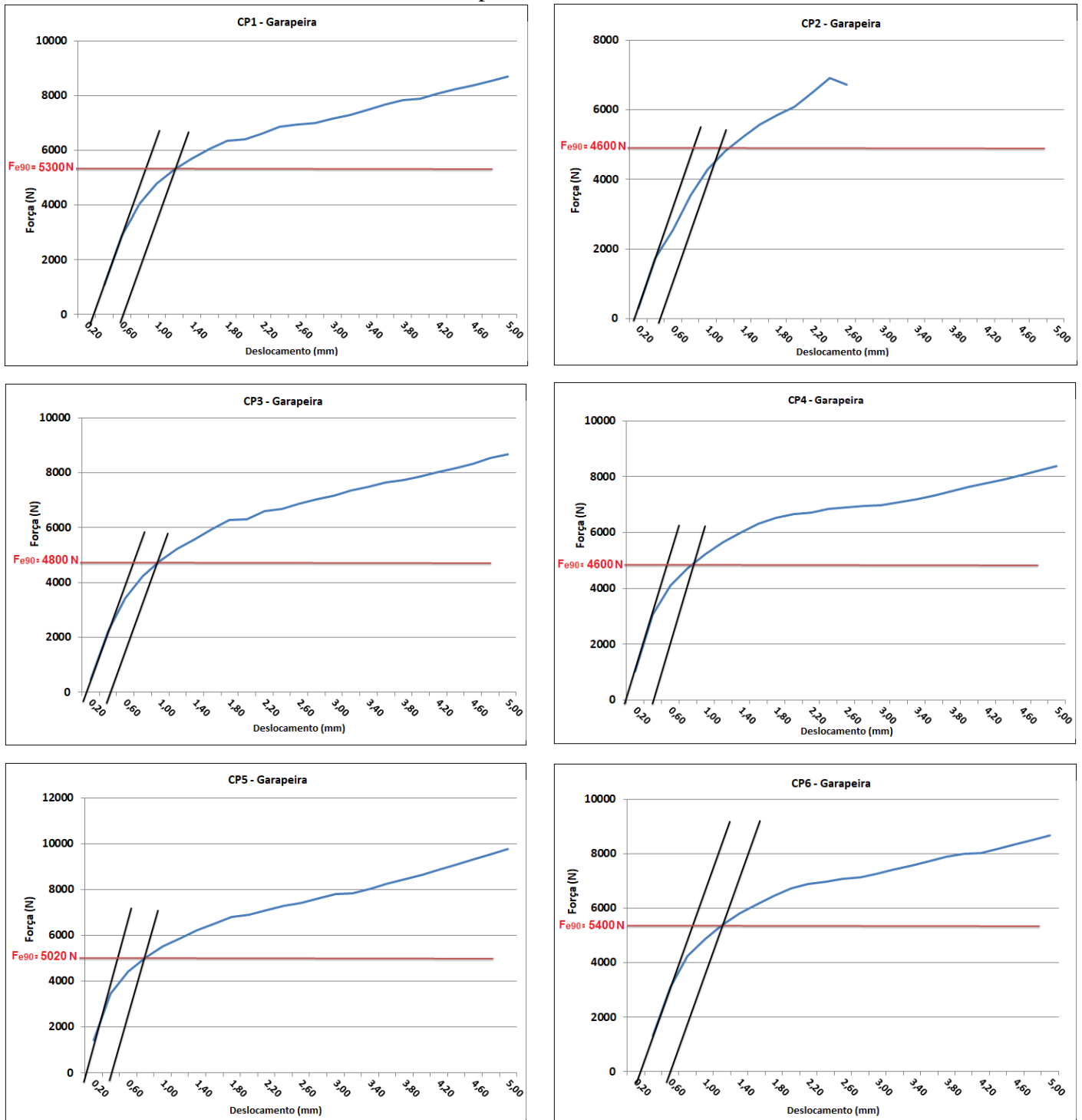
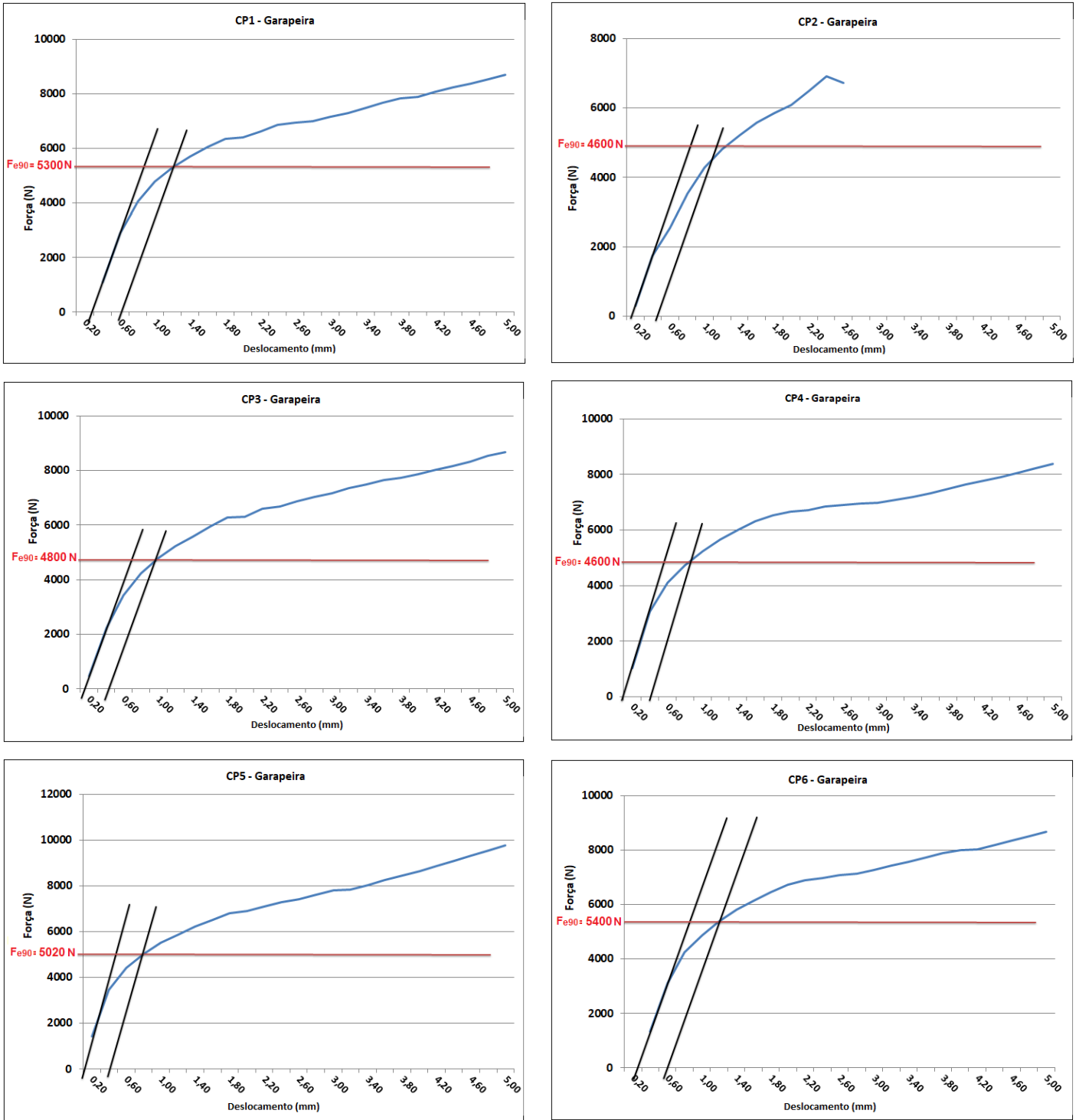


Figura 68: Determinação de Fe90; ASTM D5764:2007; Garapeira; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção paralela às fibras.

Figura 69: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

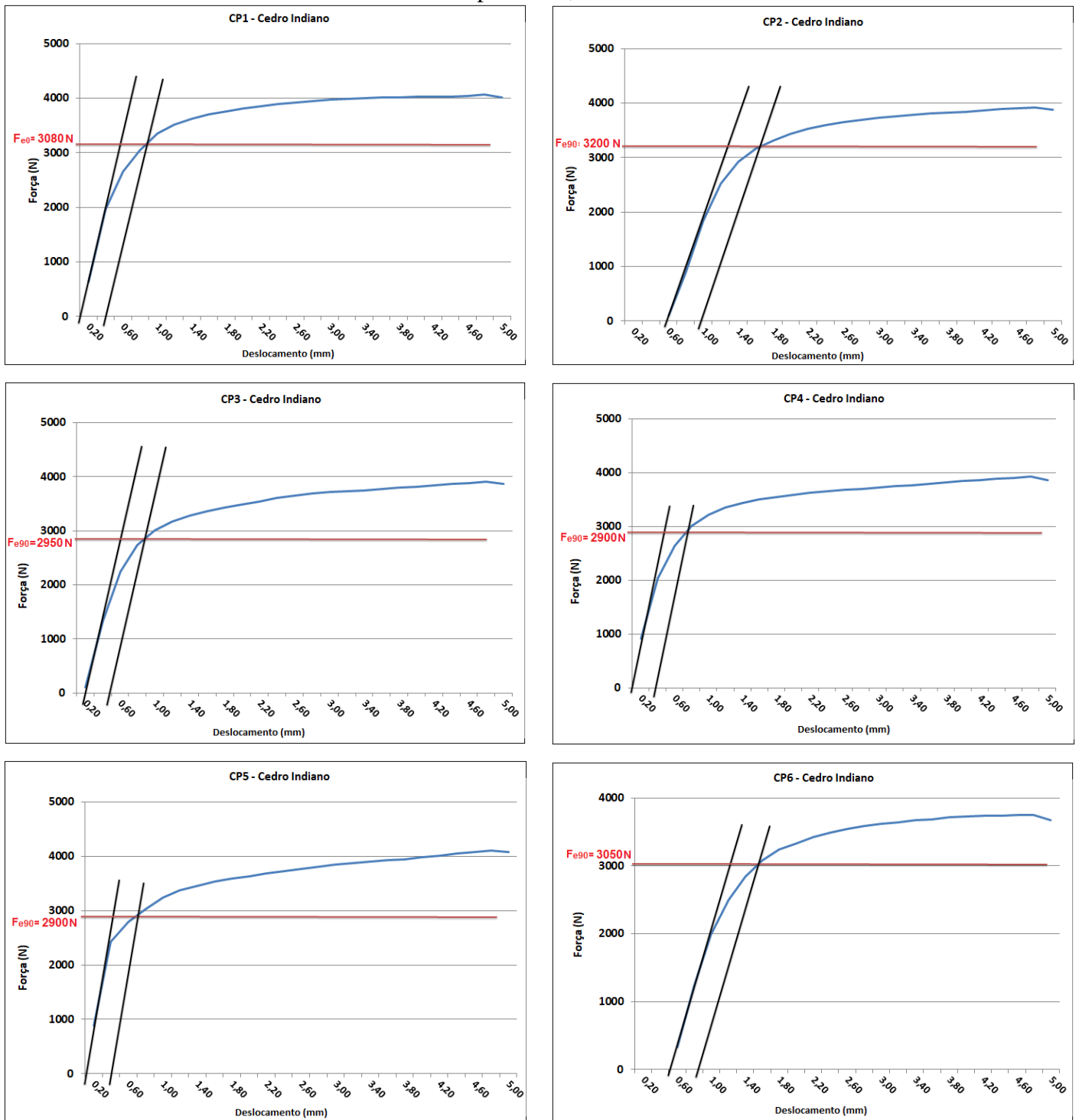
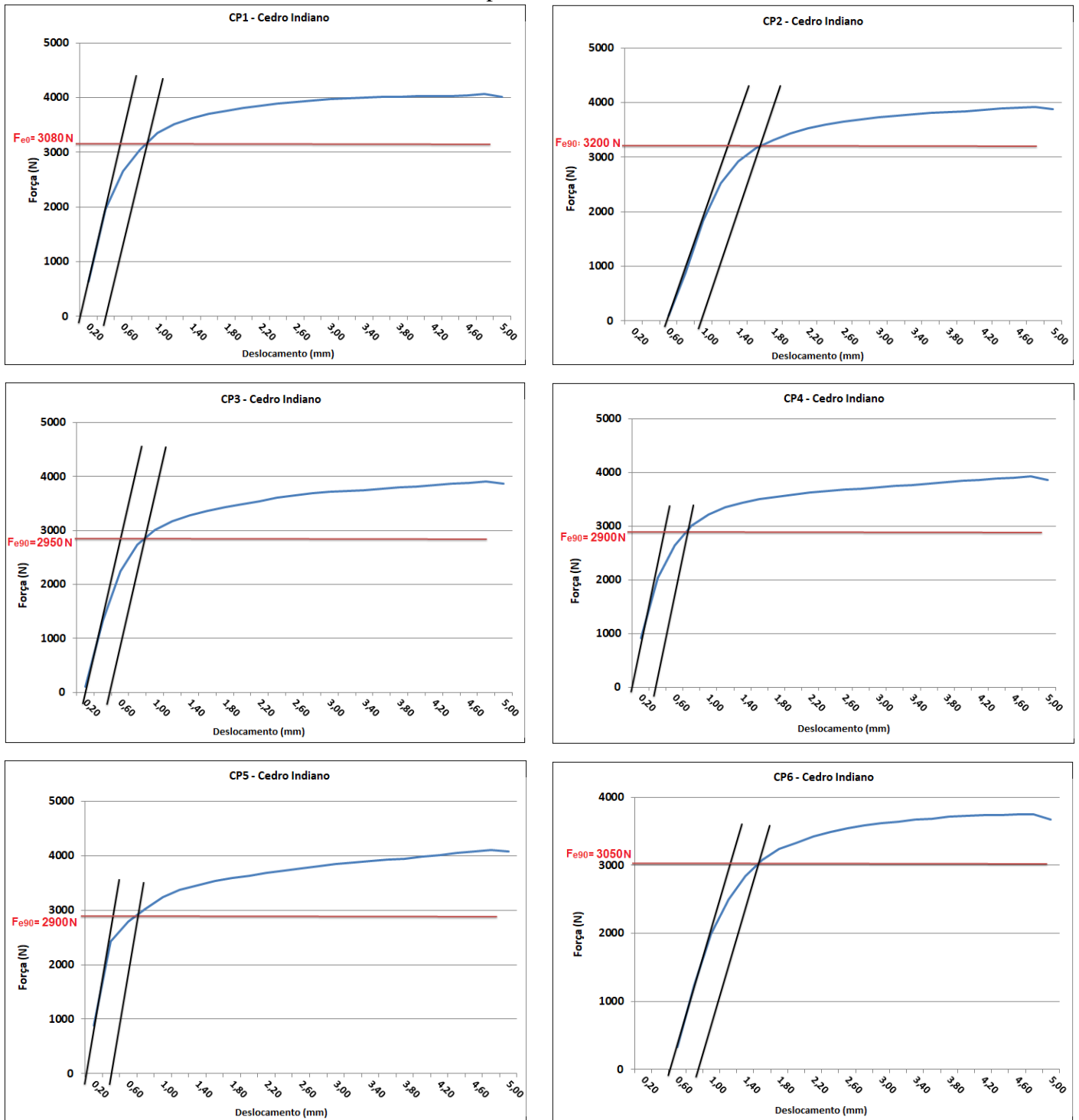


Figura 70: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Indiano – Direção perpendicular às fibras.

Figura 71: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

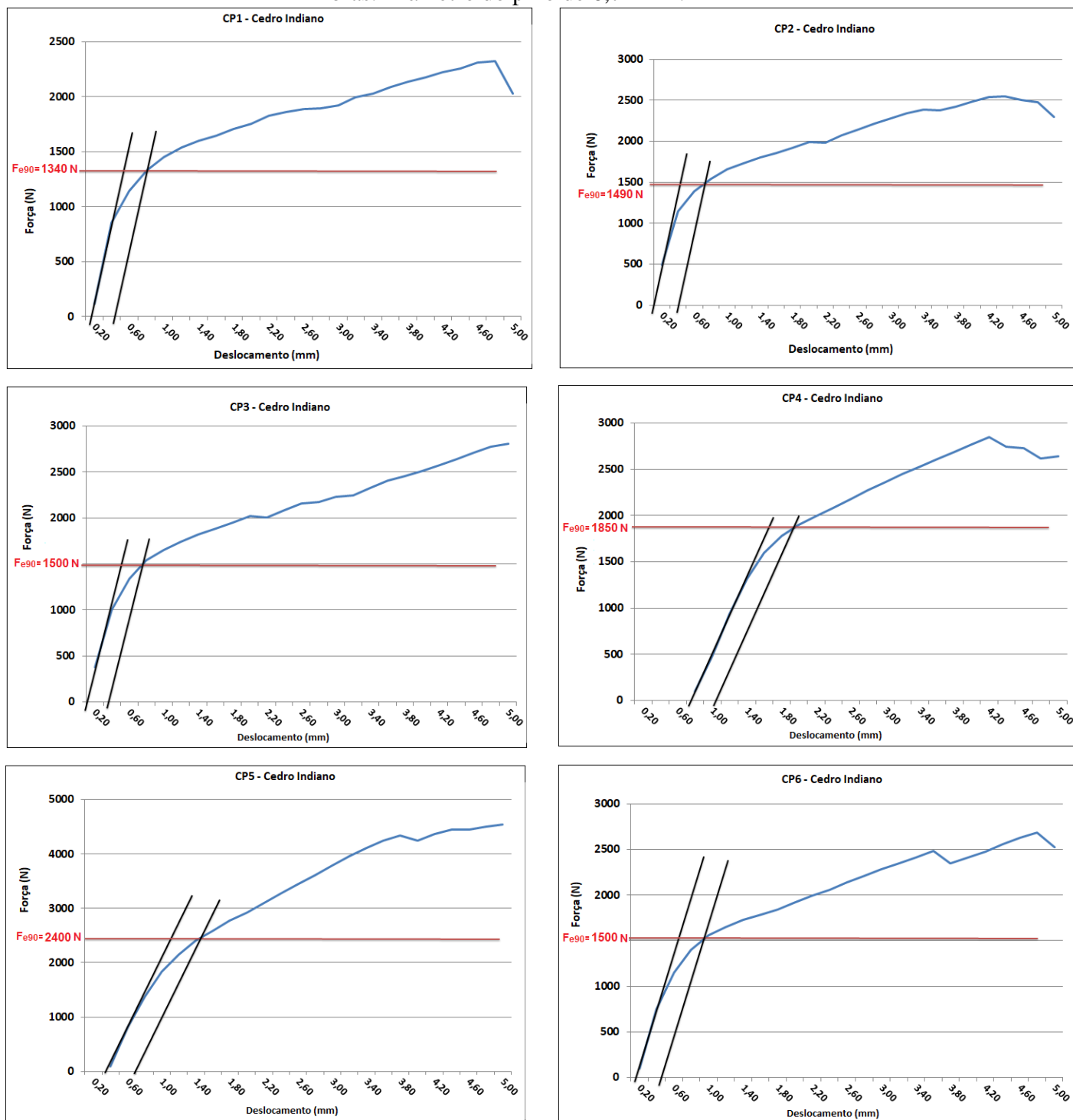
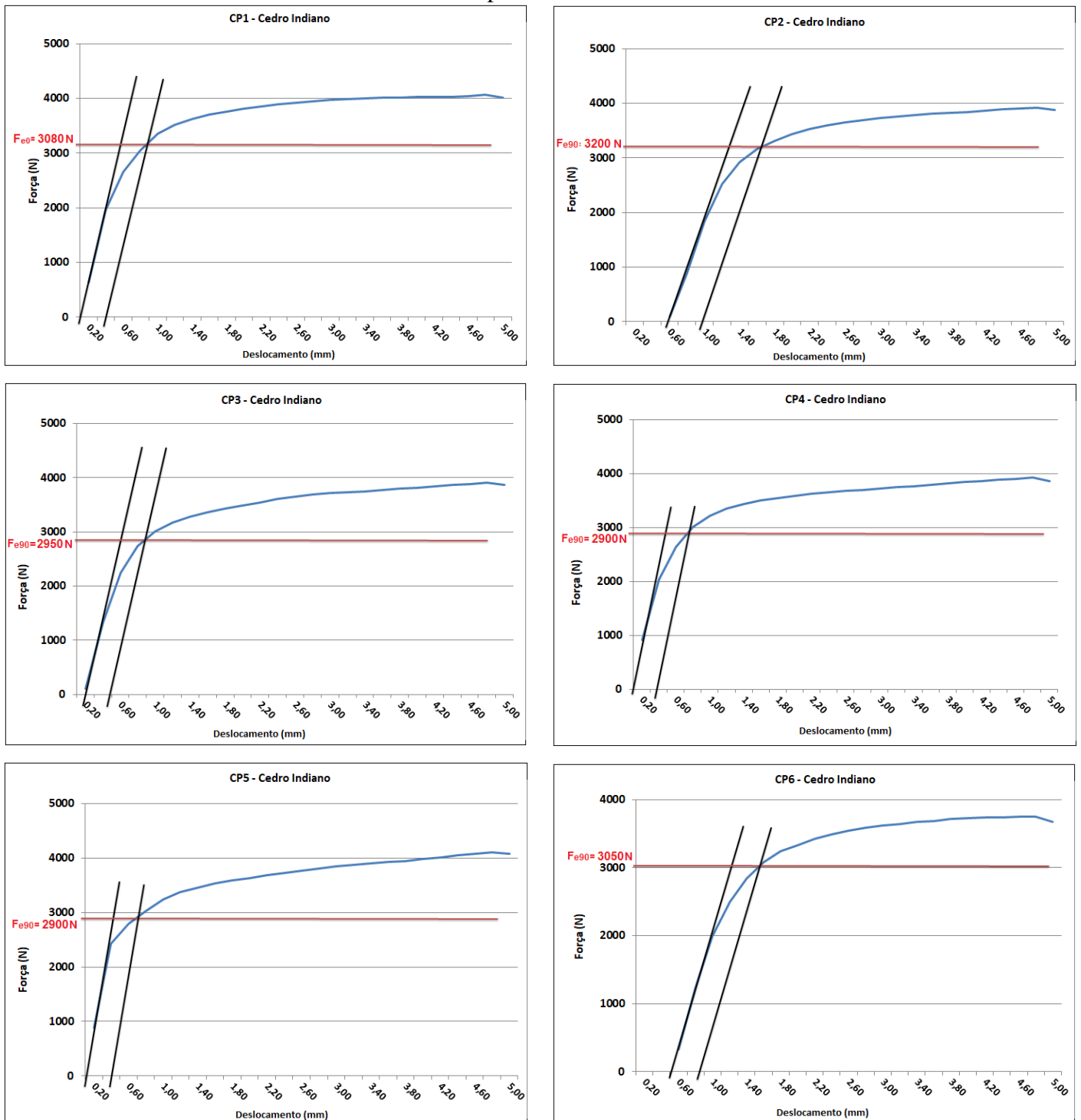


Figura 72: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção paralela às fibras.

Figura 73: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Australiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 6,72 mm.

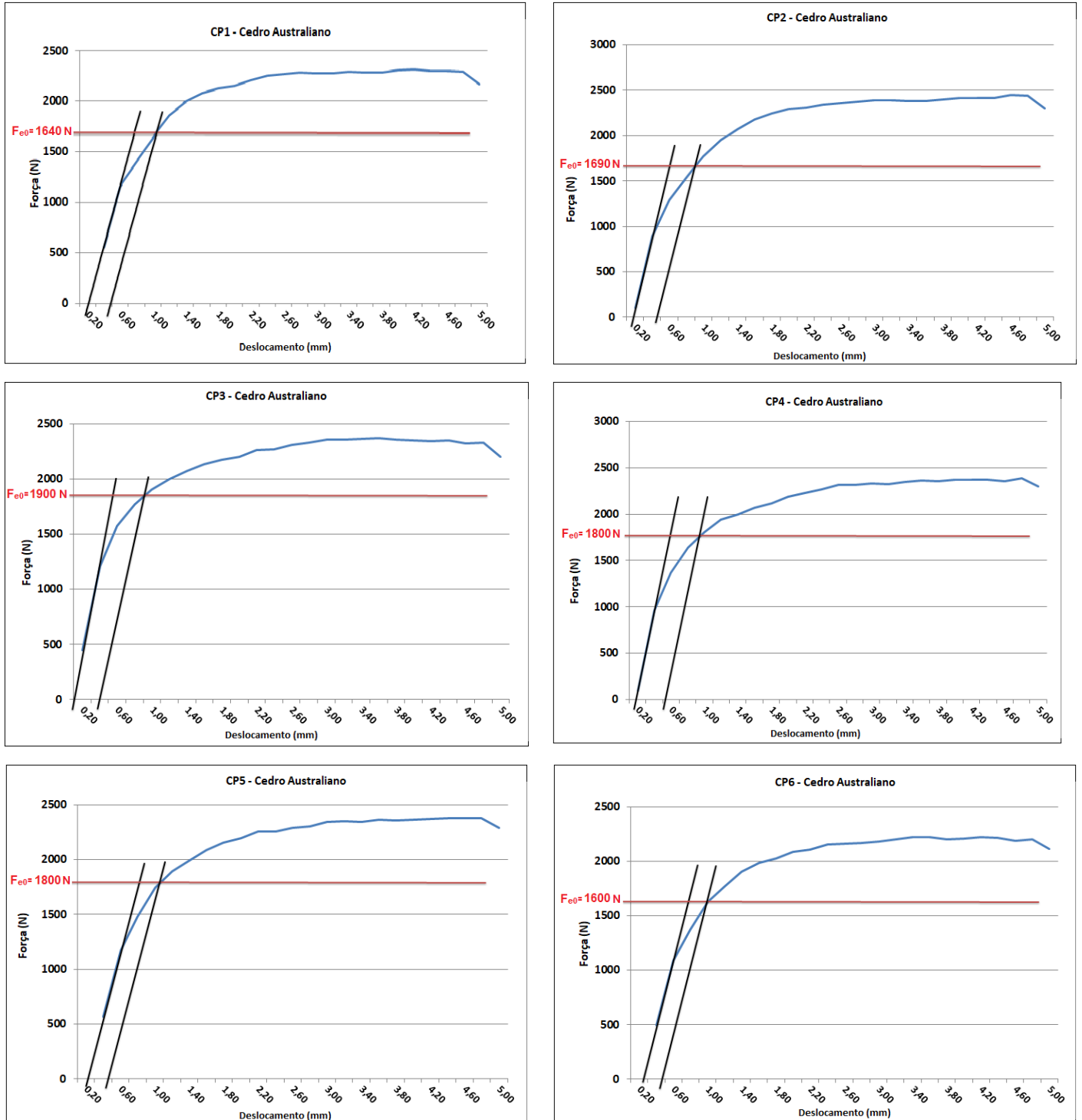
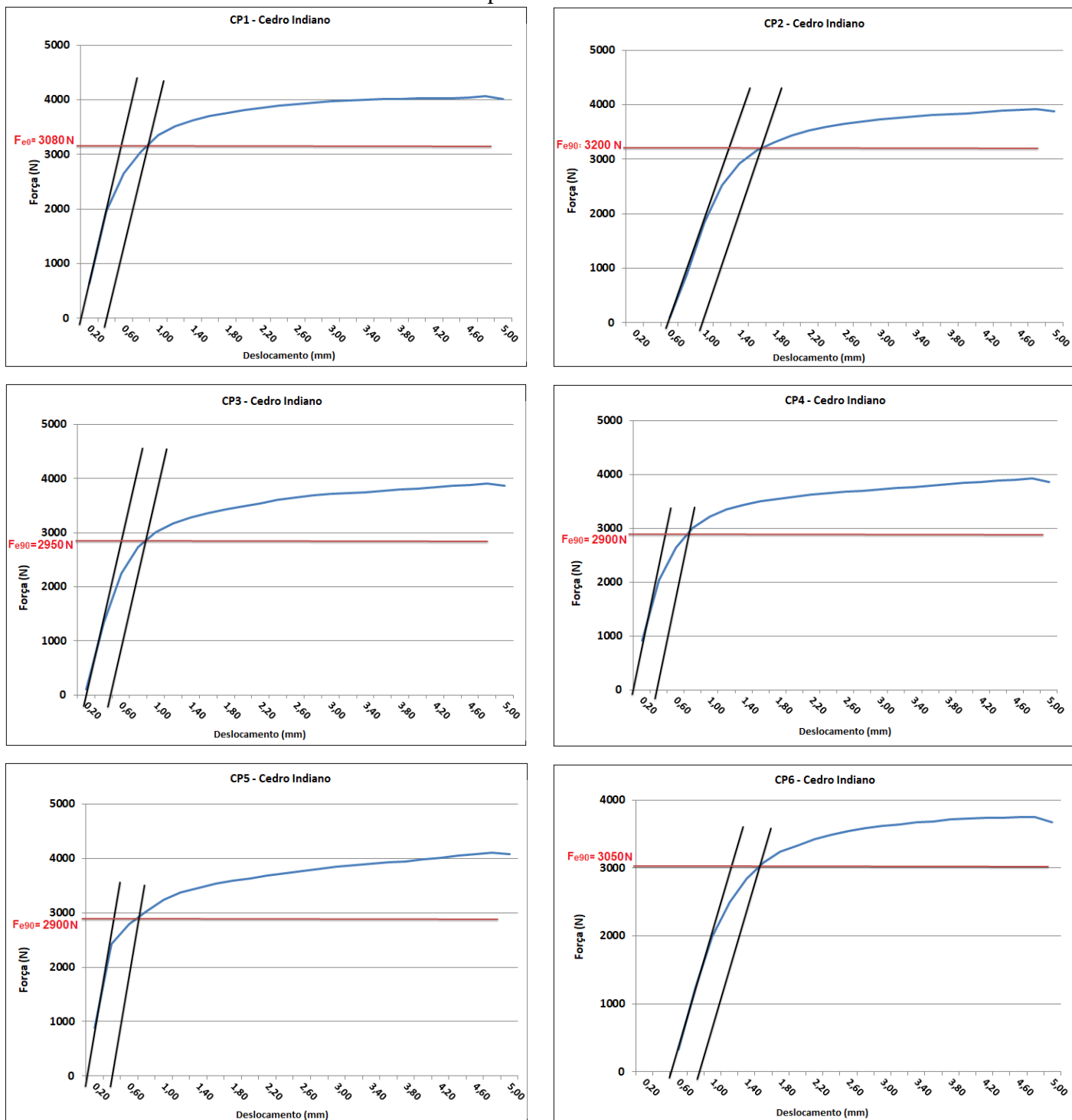


Figura 74: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
 Diâmetro do pino de 10 mm.



Gráficos para o Cedro Australiano – Direção perpendicular às fibras.

Figura 75: Determinação de F_{e90} ; ASTM D5764:2007; Cedro Australiano; Direção perpendicular às fibras. Diâmetro do pino de 6,72 mm.

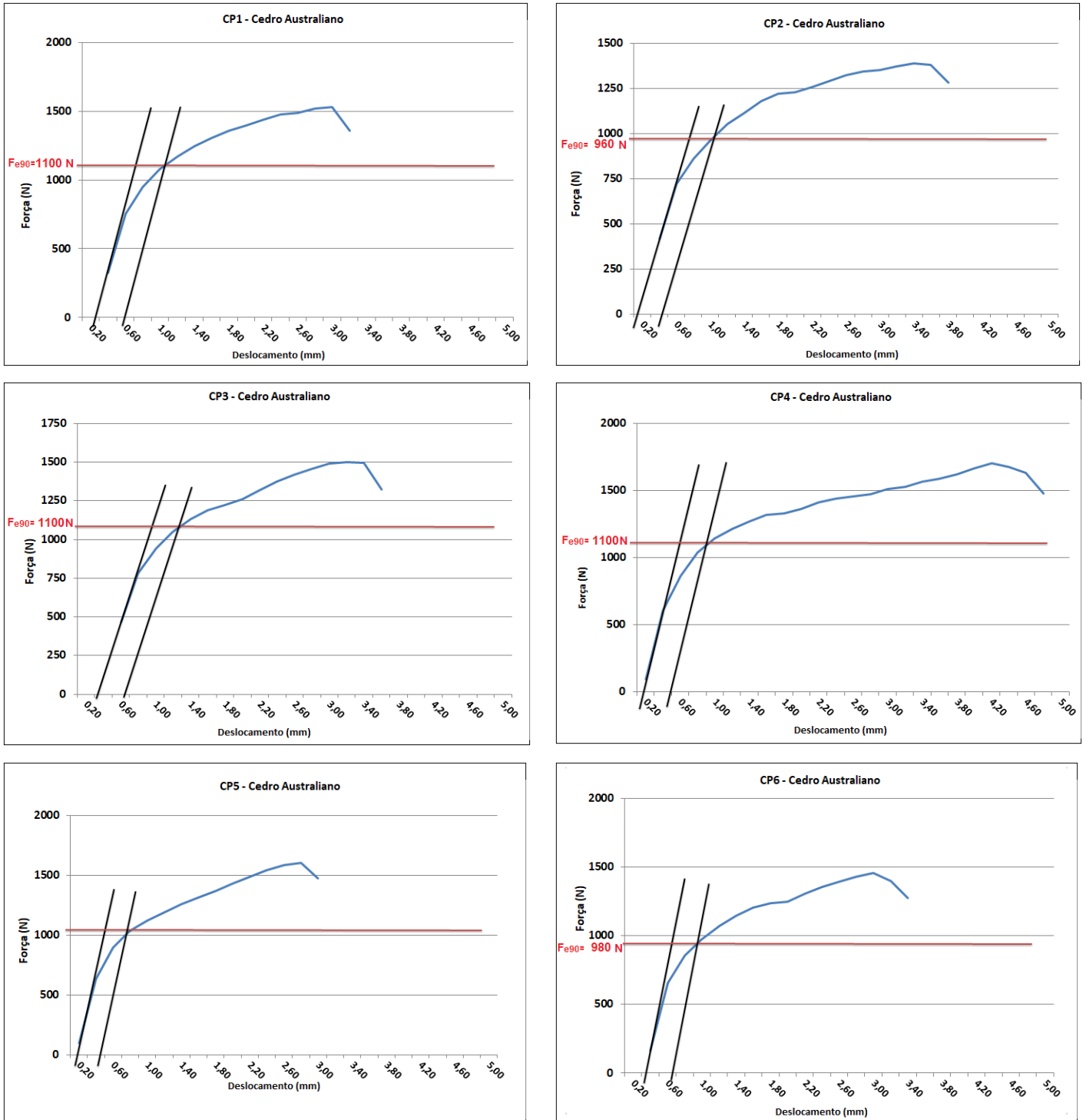


Figura 76: Determinação de F_{e0} ; ASTM D5764:2007; Cedro Indiano; Direção paralela às fibras.
Diâmetro do pino de 10 mm.

