

**ERNESTO ABEL FERNANDO FRIEDMANN PALLAROLAS**

**Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeiras  
de reflorestamento**

Guaratinguetá – SP

2017

**Ernesto Abel Fernando Friedmann Pallarolas**

**Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeiras  
de reflorestamento**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de pesquisa: Materiais Lignocelulósicos.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina.

Guaratinguetá – SP

2017

P168e	<p>Pallarolas, Ernesto Abel Fernando Friedmann</p> <p>Estudo da resistência ao embutimento de pinos de aço em peças estruturais de madeiras de reflorestamento / Ernesto Abel Fernando Friedmann Pallarolas – Guaratinguetá, 2017.</p> <p>104 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 96-97</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Júlio Cesar Molina</p> <p>1. Resistência de materiais. 2. Método dos elementos finitos - Programas de computador. 3. Normalização. I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.17(043)</p>
-------	---

**ERNESTO ABEL FERNANDO FRIEDMANN PALLAROLAS**

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Ana Paula Rosilini Alves Claro  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA  
Coorientadora / UNESP/FEG

  
Prof. Dr. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. IURI EMMANUEL DE PAULA FERREIRA  
Universidade Federal de São Carlos

## **DADOS CURRICULARES**

**ERNESTO ABEL FERNANDO FRIEDMANN PALLAROLAS**

**NASCIMENTO** 05.12.1988 – Asunción / CE / Paraguay

**FILIAÇÃO** Ernesto Cornélio Friedmann Alvariza  
Vivian Elizabeth Pallarolas Mascheronni

**2004/2006** Técnico Industrial Electromecánico  
CTN - Colégio Técnico Nacional de la Capital

**2007/2013** Engenheiro Mecânico, com ênfase em Materiais Metálicos  
USP - Universidade de São Paulo

**2015/2017** Especialista em Administração Pública  
UCAM - Universidade Cândido Mendes.

à minha querida esposa Fabiana,  
companheira de todas as horas,  
dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, principio íntimo de toda força e vontade. Agradeço pela minha vida e pelo caminho que me foi traçado para seguir e por essa companhia íntima que reverbera no fundo da alma.

Aos meus pais Ernesto e Vivian por terem me educado com dedicação, inspirado e sempre me dado a oportunidade de estudar.

À minha querida esposa Fabiana pela cumplicidade, amizade e carinho imensos, sem os quais nada na minha vida faz sentido.

Ao meu professor e orientado Dr. Julio Cesar Molina pela orientação, dedicação, apoio nas aulas, nos trabalhos e na pesquisa e por servir de guia durante todo o trabalho desenvolvido.

Ao professor Dr. Iuri Ferreira, amigo e companheiro de trabalho, pelas orientações, revisões e ajuda em toda a parte estatística do trabalho.

À professora Dra. Cristiane de Campos pelas valiosas correções na tese e no trabalho.

Ao aluno de iniciação Antônio que me ajudou e acompanhou corajosamente, dias e noites a fio, durante a realização dos ensaios e de toda a parte experimental.

Ao técnico de laboratório Juliano Rodrigo de Brito pelas orientações sobre o uso da máquina e demais procedimentos técnicos realizados durante toda a pesquisa.

Ao colega Elder do LaMEM pela ajuda e apoio prestados no uso do *software* ABAQUS 14.

Aos professores Eduardo Luiz Longui e Carmen Regina Marcati da UNESP Botucatu, à professora Monica Thiersch da UFSCar Sorocaba e ao professor Ricardo Barreiros de Itapeva pelas aulas ministradas durante o curso e pelo conhecimento transmitido que deu embasamento a esta pesquisa.

Aos colegas da pós-graduação Felipe, Nádia, Larissa, Bruno, as duas Ana Paula, e ao Rafael pela amizade e pelas valiosas ideias trocadas juntos.

Por último, mas não menos importante, aos meus amigos e compatriotas paraguaios Fran, David e Willy por terem sempre me acompanhado nos melhores e piores momentos, aconselhado e ajudado sempre que precisei. Sou muito grato de tê-los como amigos!

*Pyhare kirĩrime,  
Hetekue oñembohasáva kutuhágui  
Jejopypyre ombyaíva  
Pe yvyra ipú, opururũ, ombopiriríva,  
Ha imba 'e púpe cheve omombe 'úva imba 'eñemimby.*

*En el silencio de la noche,  
Con su cuerpo muerto traspasado por un clavo,  
Sobre la presión destructora,  
La madera estallaba, crepitaba, se resquebrajaba  
Y en su melodía, me contaba sus secretos.*



## RESUMO

Este trabalho teve a finalidade de estudar a resistência ao embutimento de ligações efetuadas por pinos metálicos (pregos) em peças estruturais de madeira. Para tanto foram consideradas três principais abordagens: analítica, 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 ensaios experimentais em corpos de prova compostos por madeiras de reflorestamento de pinus e eucalipto com ligações metálicas efetuadas por pinos metálicos com diâmetro de 6,5 mm. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações das normas: brasileira ABNT NBR 7190:1997, europeia EUROCODE 5:2004 e americana ASTM D5764:2007 com posterior comparação entre os resultados obtidos para a resistência ao embutimento. Foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos, incluindo um estudo da resistência ao embutimento corrigida pela umidade e pela densidade. Foram calculados os valores analíticos teóricos de resistência ao embutimento mediante fórmulas propostos por cada norma e comparadas às médias dos valores experimentais obtidos pelas mesmas. Foi proposta também a análise do valor ideal de resistência por meio de métodos de análise de regressão segmentada sobre as curvas de comportamento de resposta do material. Por fim foram realizadas simulações numéricas no software ABAQUS, que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliação das distribuições de tensões nas regiões da ligação. Os resultados obtidos mostram que existem divergências significativas entre os valores experimentais de resistência ao embutimento obtidos através das normas estudadas quando comparados entre si. Também mostram que os valores analíticos calculados superestimam a resistência ao embutimento experimental para todas as normas. E ainda, que a resistência ao embutimento quando corrigida pela densidade apresenta melhor qualidade em termos de dispersão para o conjunto de dados estudado. Conclui-se que os métodos estatísticos de regressão segmentada estudados, podem ser uma boa alternativa para a modelagem do comportamento mecânico da madeira na obtenção de valores característicos mais invariantes e padronizados para os parâmetros de resistência.

**Palavras chaves:** Resistência; Embutimento; Normalização; Análise estatística de regressão segmentada.

## ABSTRACT

This work had the purpose of studying the embedment resistance of connections made by metallic pins (nails) in structural pieces of wood. For that, three main approaches were considered: analytical, numerical and experimental. Initially, a theoretical survey was carried out on the subject, based on available literature, for the evaluation of national and international standardization related to the subject. Experimental tests were carried out on test specimens composed of pine and eucalyptus reforestation woods species with metal connections made by pins with a diameter of 6.5 mm. The tests were carried out according to the recommendations of Brazilian ABNT NBR 7190:1997, European EUROCODE 5:2004 and American ASTM D5764:2007 standards for further comparison between the obtained results for the embedment resistance. A statistical analysis of the obtained results was carried out, including a study of the resistance corrected by the humidity and the density. The theoretical analytical values of resistance were calculated using formulas proposed by each standard and compared to the averages of the experimental values. It was also proposed the analysis of the ideal resistance value by segmented regression analysis methods on the curves of the embedment behavior data set generated by the standards. Finally, numerical simulations were performed in ABAQUS software, which is based on the Finite Element Method (MEF) to evaluate the stress distributions in the bond areas. The obtained results showed that there are significant divergences between the experimental values of resistance obtained through the studied standards when compared to each other. They also show that the analytical calculated values overestimate the experimental resistance for all studied standards. Also, that the strength corrected by the density presents better dispersion perform quality for the studied data set. It is concluded that the studied statistical methods of segmented regression can be a good alternative for modeling the mechanical behavior of the wood to obtain characteristic values more invariant and standardized for the resistance parameters.

**Keywords:** Resistance; Embedment; Standardization; Statistical analysis of segmented regression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento. ....	25
Figura 2.2: Diagrama de tensão de embutimento ( $f_e$ ) x deformação específica de embutimento específica ( $\epsilon$ ). ....	25
Figura 2.3: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e normal às fibras, segundo norma brasileira. ....	26
Figura 2.4: Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras, segundo norma europeia. ....	27
Figura 2.5: Diagrama de ciclo de carregamento para ensaio de embutimento segundo EN 383:2007. ....	28
Figura 2.6: Diagrama força de embutimento por deslocamento. ....	28
Figura 2.7: Diagrama tensão por deslocamento. ....	29
Figura 2.8: Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento segundo a norma americana. ....	30
Figura 2.9: Junção de transição suave quadrática, base do método <i>bent-cable</i> . ....	35
Figura 2.10: Análise de dados por método <i>broken-stick</i> . ....	37
Figura 2.11 Gráfico de $R^2$ do método proposto implementado no <i>software R</i> . ....	38
Figura 2.12: Análise de dados pelo método proposto para um conjunto de dados implementado no <i>software R</i> . ....	38
Figura 3.1: Detalhe da medição das dimensões do corpo de prova antes do ensaio. (a) Altura, (b) largura e (c) espessura. ....	44
Figura 3.2: Posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios. (a) Colocação do pino metálico, (b) Fixação do transdutor e (c) posicionamento do aplicador de carga. ....	44
Figura 3.3: Corpo de prova pós-ensaio. (a) Retirada, (b) exame visual das deformações e (c) determinação da massa úmida. ....	45
Figura 3.4: Determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) para as normas: (a) Brasileira, (b) americana e (c) europeia. ....	46
Figura 3.5: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método <i>bent-cable</i> implementado no <i>software R</i> . ....	49
Figura 3.6: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método <i>broken-stick</i> implementado no <i>software R</i> . ....	50
Figura 3.7: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método proposto implementado no <i>software R</i> . ....	51
Figura 3.8: Representação esquemática didática da combinação de metodologias implementadas na pesquisa. ....	53
Figura 3.9: Elemento <i>Hex-Structured</i> . ....	55
Figura 3.10: Elemento <i>Wedge - Sweep</i> . ....	55
Figura 3.11: Discretização da malha dos modelos e tipos de elementos finitos nas diferentes regiões. ....	57
Figura 3.12: Comportamento elasto-plástico adotado para a madeira. ....	59

Figura 3.13: Superfícies de aplicação de carga e de atribuição de condições de contorno. ....	62
Figura 4.1: <i>Boxplot</i> da resistência ao embutimento ( $f_e$ ) por tratamento.....	64
Figura 4.2: <i>Boxplot</i> da resistência ao embutimento corrigida para a umidade de 12 % ( $f_{e,12}$ ) por tratamento. ....	66
Figura 4.3: <i>Boxplot</i> da resistência ao embutimento corrigida pela densidade ( $f_{e,\rho}$ ) por tratamento.....	67
Figura 4.4: Gráfico de correlações entre $f_e$ , $f_{e,12}$ e $f_{e,\rho}$ .....	72
Figura 4.5: Valores experimentais em função dos valores analíticos para $f_e$ .....	76
Figura 4.6: Estado de tensões pelo critério Von Mises correspondentes para o modelo de corpo de prova da norma brasileira na direção paralela às fibras. ....	82
Figura 4.7: Deformações observadas no corpo de prova de pinus ensaiado para o modelo da norma brasileiro na direção paralela às fibras.....	82
Figura 4.8: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo brasileiro na direção normal às fibras.....	84
Figura 4.9: Cisalhamento observado em corpo de prova de pinus ensaiado para o modelo da norma brasileira na direção normal às fibras. ....	84
Figura 4.10: Estado de tensões pelo critério Von Mises para o modelo da norma americana na direção paralela às fibras.....	85
Figura 4.11: Estado de tensões pelo critério Von Mises correspondentes para o modelo da norma europeia na direção paralela às fibras. ....	86
Figura 4.12: Embutimento observável em corpo de prova ensaiado para o modelo europeu na direção paralela às fibras.....	87
Figura 4.13: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo europeu na direção paralela às fibras.....	88
Figura 4.14: Estado de tensões pelo critério Von Mises e deformações correspondentes para o modelo europeu na direção normal às fibras. ....	89
Figura 4.15: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo europeu na direção normal às fibras.....	90
Figura 4.16: Cisalhamento observado em corpo de prova de eucalipto ensaiado para o modelo europeu na direção normal às fibras. ....	91
Figura 4.17: Situação de ensaio onde o corpo de prova europeu colidiu com o transdutor de deslocamento.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores de $\alpha_e$ para diferentes diâmetros de pinos (d). .....	31
Tabela 3.1: Parâmetros utilizados para cálculo de $f_{e0}$ e $f_{e90}$ para cada uma das normas. ....	48
Tabela 3.2: Número de elementos finitos gerados na malha por configuração de corpo de prova .....	58
Tabela 3.3: Propriedades elásticas da madeira. ....	59
Tabela 3.3: Propriedades elásticas da madeira. (Continuação) .....	60
Tabela 3.4: Propriedades plásticas da madeira. ....	60
Tabela 4.1: Média dos resultados experimentais do ensaio de embutimento por tratamento. .	63
Tabela 4.1: Média dos resultados experimentais do ensaio de embutimento por tratamento. (Continuação). ....	64
Tabela 4.2: Análise de variância para a resistência ao embutimento ( $f_e$ ). ....	68
Tabela 4.3: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento ( $f_e$ ). ....	68
Tabela 4.4: Análise de variância para a resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ). ....	69
Tabela 4.5: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ). ....	70
Tabela 4.6: Análise de variância para a resistência ao embutimento específica ( $f_{e,\rho}$ ). ....	70
Tabela 4.7: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento específica ( $f_{e,\rho}$ ). ....	71
Tabela 4.8: Interação norma – orientação das fibras para resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ). ....	71
Tabela 4.9: Valores de correlação entre $f_e$ , $f_{e,12}$ e $f_{e,\rho}$ . ....	73
Tabela 4.10: Coeficiente de variação de modalidades de resistência por tratamento, com classificação de <i>score</i> de valores pra cada tratamento mediante código de cores. ....	73
Tabela 4.11: Valores dos parâmetros utilizados para cálculo da resistência analítica por tratamento. ....	75
Tabela 4.12: Resultados da resistência ao embutimento calculada analiticamente para cada tratamento e comparativo com $f_e$ experimental. ....	75
Tabela 4.12: Resultados da resistência ao embutimento calculada analiticamente para cada tratamento e comparativo com $f_e$ experimental. (Continuação). ....	76
Tabela 4.13: Média da resistência ao embutimento $f_e$ por método e tratamento, com classificação de <i>score</i> de valores linha a linha. ....	78
Tabela 4.14: Classificação de desvios padrões dos valores de $f_{e,12}$ por método e tratamento, com classificação de <i>score</i> de valores. ....	80

## LISTA DE ABRAVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANOVA – Análise de variância  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
*Boxplot* – Gráfico de caixa  
C25 – Classe de resistência de 25 MPa  
C40 – Classe de resistência de 40 MPa  
DOI – *Digital Object Identifier*  
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos  
EMIC – Empresa Brasileira de Equipamentos e Sistemas de Ensaio  
EN – Norma Europeia  
EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
EUROCODE – Comissão Europeia de Normas Técnicas  
GL – Graus de liberdade  
 $H_0$  – Hipótese nula  
 $H_1$  – Hipótese alternativa  
LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira  
NBR – Norma Brasileira Registrada  
NDS – *American National Design and Specification for Wood Construction*  
SET – Departamento de Engenharia de Estruturas  
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos  
UNESP – Universidade Estadual Paulista  
USP – Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Parâmetros físicos*

- b – largura do corpo de prova  
d – diâmetro do pino metálico  
h – altura do corpo de prova  
 $m_s$  – massa seca do corpo de prova  
 $m_u$  – massa úmida do corpo de prova  
t – espessura do corpo de prova  
U% – umidade relativa do corpo de prova  
 $\rho$  – densidade da madeira  
 $\rho_{ap}$  – densidade aparente da madeira  
 $\rho_k$  – densidade característica da madeira

### *Parâmetros estatísticos*

- CP – corpo de prova  
CV – coeficiente de variação  
GL – Graus de liberdade  
n – número de amostras  
SD – desvio padrão  
SQ – Soma dos quadrados  
SQM – Quadrados das médias

### *Parâmetros de resistência*

- $D_e$  – deslocamento do corpo de prova durante o ensaio de embutimento  
 $F_{5mm}$  – força de embutimento que provoca a deformação de 5 mm no corpo de prova  
 $f_{c0}$  – resistência da madeira à compressão na direção paralela às fibras  
 $f_{c90}$  – resistência da madeira à compressão na direção normal às fibras  
 $F_e$  – força de embutimento do pino metálico no corpo de prova de madeira  
 $f_e$  – resistência da madeira ao embutimento  
 $f_{e,12}$  – resistência da madeira ao embutimento corrigida para a umidade de 12%  
 $f_{e,est}$  – resistência da madeira ao embutimento estimada  
 $f_{e,p}$  – resistência específica da madeira ao embutimento  
 $f_{e0}$  – resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras  
 $F_{e2\%}$  – força que provoca a deformação específica residual de 2%

$F_{e5\%}$  – força que causa a deformação residual igual a 5% em relação ao diâmetro do pino metálico

$f_{e90}$  – resistência da madeira ao embutimento na direção normal às fibras

$f_{h,0,k}$  – resistência característica da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras

$f_{h,90,k}$  – resistência característica da madeira ao embutimento na direção normal às fibras

$f_{h,\alpha,k}$  – resistência característica da madeira ao embutimento para forças em qualquer direção

$F_{m\acute{a}x}$  – máxima força de embutimento resistida pelo corpo de prova

$k_{90}$  – fator que leva em consideração a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico

$\alpha$  – ângulo de incidência de carga em relação às fibras da madeira

$\alpha_e$  – coeficiente de correção em função do diâmetro do pino metálico

$\delta$  – deslocamento relativo

$\varepsilon$  – deformação específica

### ***Parâmetros de modelagem numérica***

$E_x$ : módulo de elasticidade na direção tangencial

$E_y$ : módulo de elasticidade na direção das fibras da madeira

$E_z$ : módulo de elasticidade na direção radial

$\nu_{xy}$ : coeficiente de Poisson no plano xy

$\nu_{yz}$ : coeficiente de Poisson no plano yz

$\nu_{xz}$ : 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

### ***Unidades de medida***

% – porcentagem

cm - centímetro

JP – Jauge de Paris

Kg – quilograma

Kgf – quilograma força

LPP – Linhas de Polegadas Portuguesa

m – metro

$m^3$  – metro cúbico

mm – milímetro

$mm^2$  – milímetro quadrado

MPa – Mega Pascal



N – Newtons

°C – graus célsius

s – segundos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	20
1.1.1	<b>Objetivo Principal</b> .....	20
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	20
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	21
1.3	ESTRUTURA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO .....	22
1.4	PLANO DE TRABALHO .....	22
1.4.1	<b>Pesquisa bibliográfica</b> .....	22
1.4.2	<b>Análise experimental</b> .....	22
1.4.3	<b>Análise por meio analítico</b> .....	23
1.4.4	<b>Análise estatística</b> .....	23
1.4.5	<b>Métodos estatísticos para determinação de resistência</b> .....	23
1.4.6	<b>Análise numérica</b> .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
2.1	MÉTODOS EXPERIMENTAIS NORMALIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO .....	24
2.1.1	<b>Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997</b> .....	24
2.1.1.1	Correção da resistência ao embutimento pela umidade.....	26
2.1.2	<b>Norma europeia EN 383:2007</b> .....	26
2.1.3	<b>Norma americana ASTM D5764:2007</b> .....	29
2.2	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO.....	30
2.2.1	<b>Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997</b> .....	30
2.2.2	<b>Norma europeia EN 383:2007</b> .....	31
2.2.3	<b>Norma americana ASTM D5764:2007</b> .....	32
2.3	MÉTODOS DE ANÁLISE DE REGRESSÃO PROPOSTOS PARA DETERMINAÇÃO DE VALOR DE RESISTÊNCIA.....	32
2.3.1	<b>Método de regressão <i>bent-cable</i></b> .....	34
2.3.2	<b>Método de regressão <i>broken-stick</i></b> .....	35
2.3.3	<b>Método de regressão proposto</b> .....	37
2.4	TRABALHOS CIENTÍFICOS SOBRE RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO .....	39
2.5	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	42
3.2	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO .....	43

3.3	OBTENÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA EXPERIMENTAIS .....	45
3.4	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO.....	48
3.5	METODOLOGIA DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO PROPOSTAS PARA DETERMINAÇÃO DE VALOR DE RESISTÊNCIA .....	49
3.6	METODOLOGIA DE ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	51
<b>3.6.1</b>	<b>Resultados experimentais</b> .....	51
<b>3.6.2</b>	<b>Resultados dos métodos analíticos</b> .....	52
<b>3.6.3</b>	<b>Resultados de métodos estatísticos de regressão</b> .....	52
3.7	METODOLOGIA DA ANALISE NUMÉRICA .....	54
<b>3.7.1</b>	<b>Elementos finitos utilizados</b> .....	54
3.7.1.1	Elemento tipo <i>Hex-Structured</i> .....	55
3.7.1.2	Elemento tipo <i>Wedge – Sweep</i> .....	55
<b>3.7.2</b>	<b>Definição de malha</b> .....	55
<b>3.7.3</b>	<b>Discretização de malha</b> .....	57
<b>3.7.4</b>	<b>Propriedades dos materiais utilizados</b> .....	58
3.7.4.1	Propriedades elásticas da madeira.....	59
3.7.4.2	Propriedades plásticas da madeira.....	60
3.7.4.3	Relações admitidas entre as propriedades elásticas da madeira.....	61
<b>3.7.5</b>	<b>Condições de contorno e aplicação de carregamento</b> .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	63
4.1	RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO POR MEIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	63
<b>4.1.1</b>	<b>Análise de variância para resistência ao embutimento (<math>f_e</math>)</b> .....	68
<b>4.1.2</b>	<b>Análise de variância para resistência ao embutimento corrigida pela umidade (<math>f_{e,12}</math>)</b> 69	
<b>4.1.3</b>	<b>Análise de variância para resistência ao embutimento específica (<math>f_{e,\rho}</math>)</b> .....	70
<b>4.1.4</b>	<b>Correlações e comparação entre <math>f_e</math>, <math>f_{e,12}</math> e <math>f_{e,\rho}</math></b> .....	72
4.2	RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO POR MEIO DE CÁLCULO ANALÍTICO.....	75
4.3	RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO OBTIDOS ATRAVÉS DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE REGRESSÃO .....	78
4.4	RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	81
4.5	AVALIAÇÃO DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	91
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	93
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	96
	<b>APENDICE A</b> .....	98
	<b>Rotina do programa R para determinação dos pontos de resistência para cada norma</b> . 98	

<b>APENDICE B</b> .....	101
<b>Rotina do método <i>bent-cable</i> no programa R.</b> .....	101
<b>APENDICE C</b> .....	102
<b>Rotina do método <i>broken-stick</i> no programa R.</b> .....	102
<b>APENDICE D</b> .....	104
<b>Rotina do método proposto no programa R.</b> .....	104

## 1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira como elemento estrutural requer o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas, visto que estas interferem diretamente no dimensionamento de uma estrutura. O conhecimento do comportamento e garantia da qualidade do sistema de ligação utilizado nas estruturas de madeira é muito importante para a eficiência do sistema estrutural como um todo. Dentre os tipos e ligações utilizados em estruturas de madeira podem ser citados os pinos metálicos, as ligações coladas e as cavilhas. Os pinos metálicos são constituídos pelos pregos, parafusos e barras de aço, enquanto os conectores podem ser anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados. As ligações constituem-se no ponto crítico das estruturas de madeira e demandam estudos experimentais que avaliem o seu comportamento real. A ocorrência de falha em uma ligação pode colocar em risco toda a edificação.

No dimensionamento de ligações por pinos metálicos entre elementos estruturais são considerados basicamente dois modos de ruptura: o embutimento do pino na madeira e a flexão do pino. No entanto, a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 e as principais normas internacionais como a europeia EN 383:2007 e a americana ASTM D5764:2007 apresentam métodos diferentes para a determinação da resistência ao embutimento. Pela ABNT NBR 7190:1997 a resistência ao embutimento da ligação é convencionada a deformação específica 2‰; pela EN 383:2007, que é o documento recomendado pelo Eurocode 5:2004, é determinada pela força que provoca o deslocamento de 5 mm ou a resistência última de embutimento; e pela ASTM D5764:2007, é determinada pela força que provoca o deslocamento entre o pino e a madeira igual a 5% do diâmetro do pino metálico utilizado. Nos casos em que o embutimento é crítico, o critério de dimensionamento das ligações por pinos, adotado pela norma brasileira, conduz a um aumento do número de conectores não correspondendo ao comportamento real da estrutura. Uma das razões desse aumento é que a resistência ao embutimento é definida experimentalmente na norma ABNT NBR 7190:1997 permitindo-se somente pequenas deformações, ou ainda por meio de fórmulas tomando como base a resistência à compressão.

O embutimento do pino metálico na madeira é caracterizado pelo deslocamento da ligação na direção de uma determinada força aplicada e contribuições para o estudo desse fenômeno vêm sendo realizadas por vários pesquisadores para melhorar o entendimento das ligações em estruturas de madeira. Além disso, apesar do crescente interesse no estudo das ligações em estruturas de madeira no Brasil, observa-se que as investigações realizadas até o

momento ainda não produziram conclusões suficientes para uma adequada análise do seu comportamento. Vale mencionar que Almeida (1987) realizou na EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo o primeiro estudo no Brasil relativo à resistência da madeira ao embutimento. Outros estudos sobre este tema foram também desenvolvidos no país por Vale (1999), Oliveira (2001), Stamato (2002), Santos *et al.* (2008), Almeida (2011), Branco *et al.* (2011) e Nascimento *et al.* (2012). Um dos primeiros estudos efetivamente realizado sobre esse tema no mundo foi desenvolvido por Johansen (1949). O estudo das ligações em estruturas de madeira é de grande interesse nos meios técnico e científico e a literatura nacional sobre esse tema, atualmente, encontra-se em fase de desenvolvimento.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1.1 Objetivo Principal

Este estudo tem a finalidade de estudar de maneira 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 (pregos) em peças de madeira de reflorestamento. Também a de analisar o comportamento da curva força por deslocamento de resposta do material por meio de métodos estatísticos de regressão para definição de um ponto ideal de resistência.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliação da normalização existente sobre: métodos de ensaio e cálculo analítico para a determinação da resistência ao embutimento em ligações efetuadas por pinos metálicos em corpos de prova de madeira;
- Investigação experimental e analítica da resistência ao embutimento com base nas normas brasileira ABNT NBR 7190:1997, europeia EUROCODE 5:2004 e americana ASTM D5764:2007;
- Comparação dos resultados analíticos e experimentais de resistência ao embutimento obtidos pelas normas brasileira, europeia e americana;
- Estudo do valor ideal de resistência através de métodos estatísticos de regressão segmentada e análise comparativa com métodos normativos;
- Realização de simulações numéricas para avaliação das distribuições de tensão nos corpos de prova analisados experimentalmente;

- Indicação do método de ensaio com maior precisão para determinação da resistência ao embutimento de pinos metálicos (pregos) em peças de madeira de reflorestamento.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

É inquestionável que o estudo das ligações em estruturas de madeira seja, atualmente, de grande interesse dentro do cenário nacional principalmente em face da revisão da norma técnica nacional pertinente ao assunto. As ligações são os locais onde ocorrem as maiores concentrações de tensões, correspondendo, geralmente, aos pontos principais de fragilidade das estruturas de madeira. O tipo de conector mais utilizado em estruturas de madeira no Brasil é o pino metálico, que transfere as forças por contato entre o pino e a madeira. A resistência da ligação é determinada pela resistência à flexão do pino ou pela resistência da madeira ao embutimento.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 convencionou a resistência ao embutimento como sendo a razão entre a força que causa a deformação específica residual de 2‰ e a área  $t \times d$  ( $t$  é a espessura da peça de madeira e  $d$  o diâmetro do pino metálico), bem como apresenta uma definição peculiar de uma base de medida para o cálculo da deformação específica de 14.d. Essa definição para a resistência ao embutimento apresenta divergências significativas em relação a documentos normativos internacionais atualmente utilizados como, por exemplo, o europeu EUROCODE 5:2004 e o americano ASTM D5764:2007. Para as referidas normas internacionais a resistência ao embutimento é definida a partir de outros parâmetros, como deslocamentos absolutos em milímetros. Também os corpos de prova para o ensaio de embutimento apresentam dimensões diferentes daquelas propostas pela norma brasileira.

Quando comparadas as referidas normas entre si, no que se refere à resistência ao embutimento, observam-se divergências significativas entre os valores obtidos por meio das três normas. Portanto, não se conhece a exata capacidade de resistência da madeira ao embutimento.

Esta pesquisa foi desenvolvida em parceria com o LaMEM/EESC/USP - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para ajustes dos trabalhos de investigação em cada um dos centros de estudo de modo a desenvolver trabalhos que pudessem ser mutuamente aproveitados, evitando-se dessa forma a duplicação de trabalhos experimentais. A referida pesquisa teve também a participação de pesquisador da UFSCar/Lagoa do Sino - Universidade Federal de São Carlos,

para auxiliar na proposição de métodos de regressão segmentada para análise das curvas de resposta do material obtidas nos ensaios de embutimento.

### 1.3 ESTRUTURA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, nos quais são apresentados os seguintes conteúdos:

**Capítulo 1:** Introdução, objetivos do trabalho, justificativa e plano de trabalho;

**Capítulo 2:** Apresentação das principais normas e métodos de ensaio referentes à resistência ao embutimento e principais trabalhos desenvolvidos sobre o tema, assim como os métodos estatísticos de regressão segmentada;

**Capítulo 3:** Materiais e Métodos;

**Capítulo 4:** Resultados e Discussão;

**Capítulo 5:** Conclusões.

### 1.4 PLANO DE TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho foi desenvolvido e organizado de acordo com os itens a seguir.

#### 1.4.1 Pesquisa bibliográfica

Foram pesquisados os procedimentos de ensaio experimental, dimensões de corpos de prova, e procedimentos analíticos para determinação da resistência ao embutimento, com base nas normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e ASTM D5764:2007. Também foram avaliados os resultados referentes ao tema obtidos por outros pesquisadores. A revisão bibliográfica foi desenvolvida até o final da pesquisa.

#### 1.4.2 Análise experimental

Foram realizados ensaios de embutimento em corpos de prova de duas espécies de madeiras, uma conífera (*softwood*) e uma dicotiledônea (*hardwood*), com pinos metálicos (pregos) com diâmetro de 6,5 mm. Foram consideradas inicialmente um total de 25 repetições por tratamento, tratamento refere-se a cada combinação diferente entre: norma, espécie de madeira e direção das fibras. As resistências ao embutimento foram obtidas para a umidade de 12% e os ensaios foram conduzidos em ordem aleatorizada em um único bloco de ensaio.



### **1.4.3 Análise por meio analítico**

Cada uma das normas propõe um método analítico para obter o valor de resistência ao embutimento por meio de fórmulas que utilizam parâmetros associados à resistência, como densidade, diâmetro do pino e resistência da madeira à compressão. Foram obtidos estes parâmetros de acordo com as recomendações de cada norma e calculados os valores analíticos de resistência ao embutimento seguindo as fórmulas propostas por cada norma. Estes resultados também foram comparados entre si.

### **1.4.4 Análise estatística**

Para auxiliar na tomada de decisão sobre qual método de ensaio foi melhor para determinação da resistência ao embutimento foi utilizada análise estatística a partir do uso do *software* livre RStudio, o qual é baseado na linguagem de programação R. O referido *software* permite efetuar cálculos estatísticos, testes de aderência, assim como possibilita a construção de gráficos.

### **1.4.5 Métodos estatísticos para determinação de resistência**

Foram testados métodos estatísticos baseados na regressão segmentada para determinação da região de transição que define o limite de resistência ao embutimento de maneira otimizada e aplicável aos resultados experimentais obtidos por meio das normas estudadas. Também foi proposto nesta pesquisa um método estatístico de regressão com a finalidade acima descrita.

### **1.4.6 Análise numérica**

Foram efetuadas simulações computacionais para avaliação das tensões e deformações nas regiões mais solicitadas dos corpos de prova, visto que os referidos valores não são obtidos facilmente a partir dos ensaios experimentais. As simulações numéricas foram efetuadas no *software* ABAQUS 6.14, que tem como base o método dos elementos finitos, com licença disponível no Departamento de Engenharia de Estruturas - SET da EESC/USP.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados os métodos propostos por cada norma para a determinação da resistência da madeira ao embutimento tanto analítica quanto experimental.

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

#### 2.1.1 Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas define a resistência da madeira ao embutimento ( $f_e$ ) como a razão entre a força aplicada que causa a deformação específica residual 2‰ ( $F_{e2‰}$ ) na área de embutimento do pino (diâmetro do pino metálico ( $d$ ) multiplicado pela espessura da peça de madeira ( $t=2.d$ )), *vide* Equação 2.1.

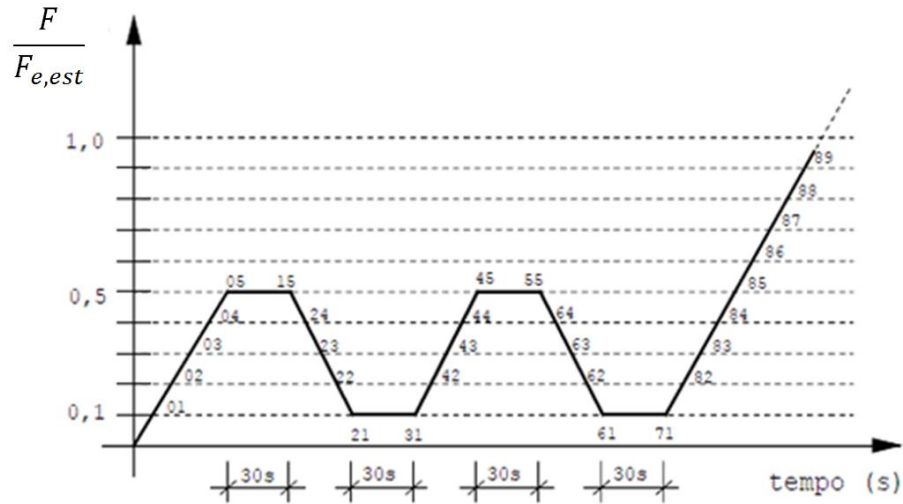
$$f_e = \frac{F_{e2‰}}{t.d} \quad (2.1)$$

Esta deformação específica residual  $\varepsilon_e = 2‰$  (dois por mil) é calculada como a razão entre o deslocamento relativo do pino metálico com relação à madeira durante o ensaio de embutimento ( $D_e$ ) e a base de medida das deformações do corpo de prova que sofre embutimento, neste caso de  $14.d$ , sendo ( $d$ ) o diâmetro do pino, *vide* Equação 2.2.

$$\varepsilon_e = \frac{D_e}{14.d} = \frac{2}{1000} = 0,002 \quad (2.2)$$

Antes da realização dos ensaios deve ser estimada a resistência ( $f_{e,est}$ ) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada do mesmo lote da amostra a ser ensaiada. Uma vez conhecida esta resistência estimada, aplicar-se o carregamento com dois ciclos de carga e descarga entre 10% e 50% da carga de ruptura ( $f_{e,est}$ ), de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. A Figura 2.1 apresenta ao diagrama de carregamento do ensaio de embutimento recomendado pela norma brasileira.

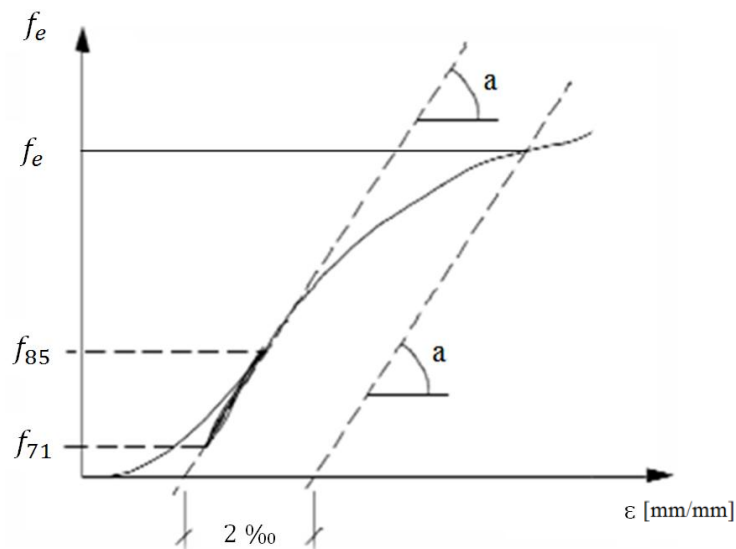
Figura 2.1: Diagrama de carregamento para o ensaio de embutimento.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

O gráfico da Figura 2.2 ilustra a forma de obtenção da resistência da madeira ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento ( $F_e$ ) x deformação específica ( $\epsilon$ ).

Figura 2.2: Diagrama de tensão de embutimento ( $f_e$ ) x deformação específica de embutimento específica ( $\epsilon$ ).

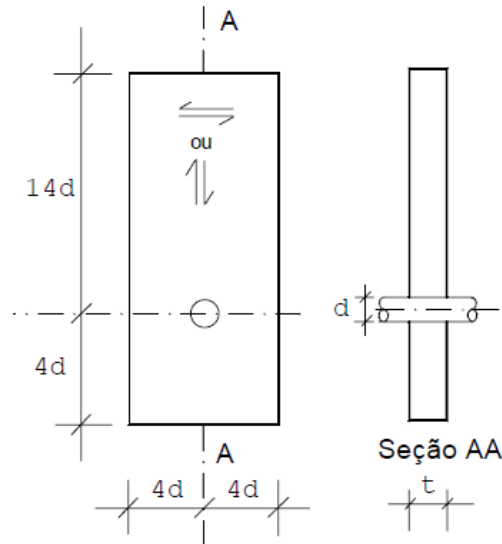


Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).

Para as dimensões físicas dos corpos de prova (CPs) a ABNT NBR 7190:1997 recomenda que para ensaios na direção paralela às fibras estes devem possuir forma prismática, de seção retangular com dimensões:  $8.d$  de largura e  $t = 2.d$  de espessura, correspondentes, com o comprimento ao longo das fibras de  $18.d$ . Para a resistência ao

embutimento na direção normal às fibras da madeira, o corpo de prova deve possuir as mesmas dimensões anteriores, tomando-se o eixo maior na direção normal em relação às fibras da madeira *vide* Figura 2.3.

Figura 2.3: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e normal às fibras, segundo norma brasileira.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

#### 2.1.1.1 Correção da resistência ao embutimento pela umidade

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 propõe que seja realizada uma correção dos valores de resistência ao embutimento ( $f_{e,u\%}$ ) para cada corpo de prova considerando a sua umidade relativa no momento do ensaio ( $U\%$ ) para obtenção de um valor de resistência na condição-padrão de referencia de 12% de umidade relativa ( $f_{e,12}$ ). Na seção 6.2.1 da norma é apresentada a fórmula para esta correção. *Vide* Equação 2.3.

$$f_{e,12} = f_e \cdot \left[ 1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.3)$$

#### 2.1.2 Norma europeia EN 383:2007

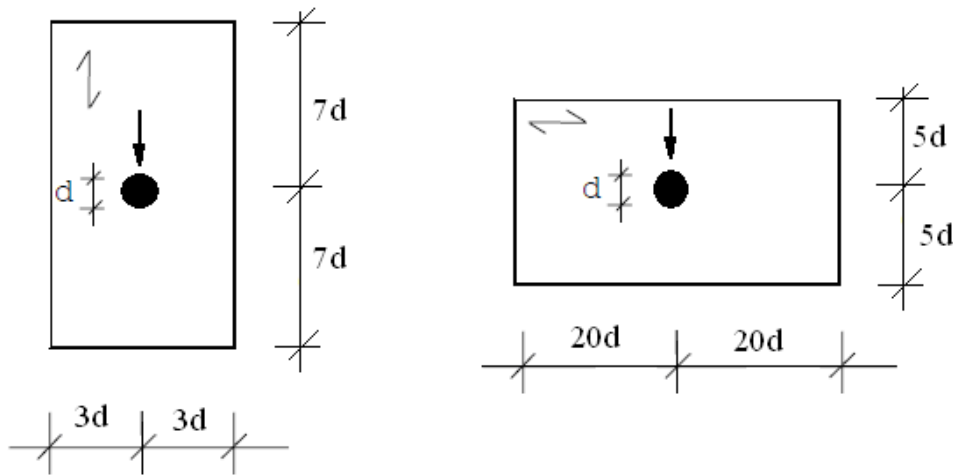
A norma europeia EN 383:2007 proposta pelo EUROCODE 5 trata sobre a determinação da resistência da madeira ao embutimento. De acordo com o referido documento, a resistência da madeira ao embutimento ( $f_e$ ) é igual ao maior valor entre a máxima força resistida pelo corpo de prova ( $F_{m\acute{a}x}$ ) e a força que provoca o deslocamento

relativo de 5 mm entre o pino metálico e o corpo de prova ( $F_{5mm}$ ), dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso ( $d$ ) e a espessura do corpo de prova ( $t$ ), *vide* Equação 2.4.

$$f_e = \frac{\text{maior entre}(F_{m\acute{a}x}, F_{5mm})}{t.d} \quad (2.4)$$

As dimensões dos corpos de prova para realização dos ensaios de embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras da madeira, segundo a norma podem ser observadas na Figura 2.4.

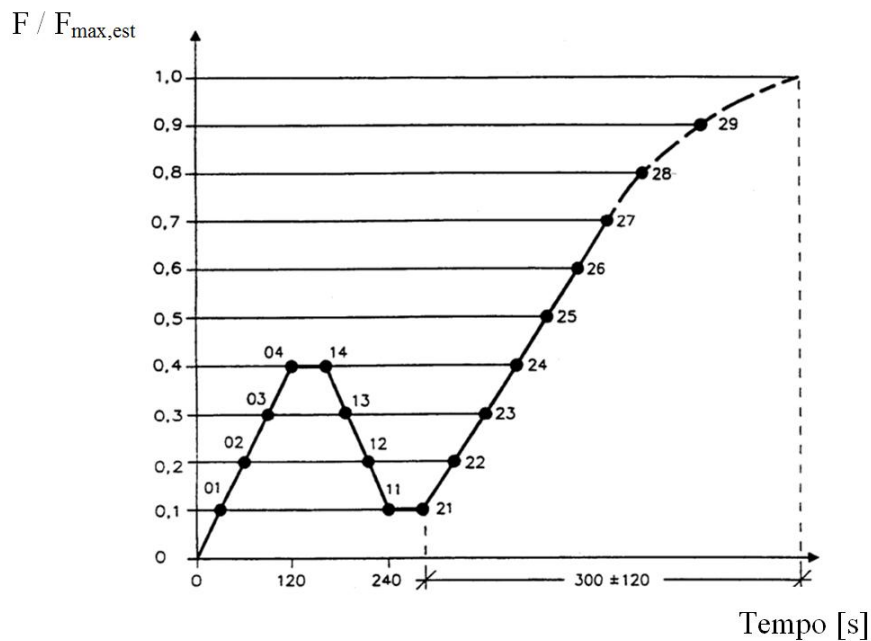
Figura 2.4: Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras, segundo norma europeia.



Fonte: EN 383:2007.

Antes da realização dos ensaios deve ser estimada a força de carregamento máxima ( $F_{max,est}$ ) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionada do mesmo lote das amostras a serem ensaiadas. Este valor de força ( $F_{max,est}$ ) deve ser aplicado em um ciclo de carregamento de até 40% deste valor, mantendo-o por 30 segundos, seguido de um descarregamento até o valor de 10%, mantendo-o por 30 segundos. Em seguida, deve ser aplicado um carregamento até ocorrer a ruptura do corpo de prova ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira. O ciclo de carregamento recomendado pela norma pode ser apreciado na Figura 2.5.

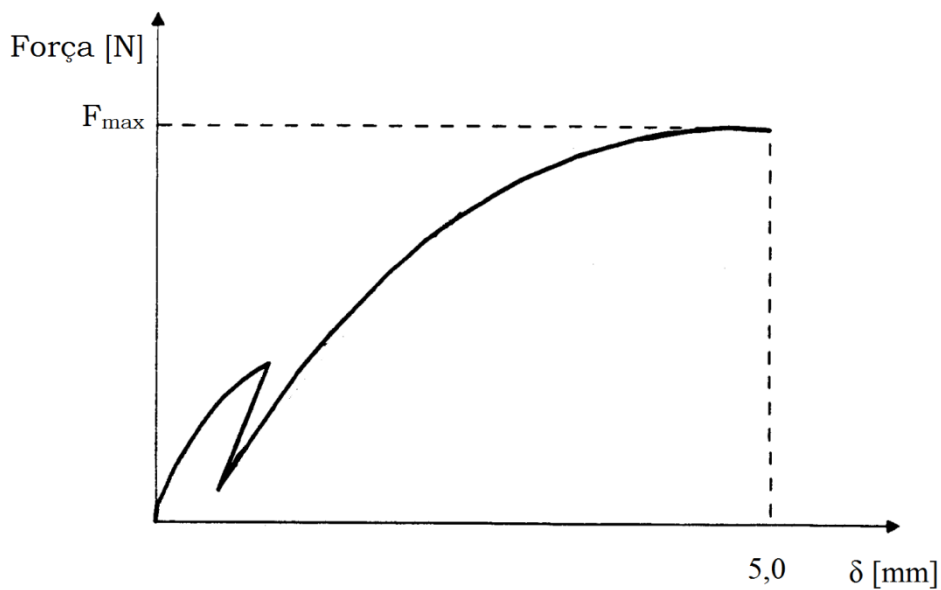
Figura 2.5: Diagrama de ciclo de carregamento para ensaio de embutimento segundo EN 383:2007.



Fonte: EN 383:2007 (Adaptada).

O gráfico da Figura 2.6 ilustra a forma de obtenção da resistência da madeira ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento por deslocamento ( $\delta$ ).

Figura 2.6: Diagrama força de embutimento por deslocamento.



Fonte: EN 383:2007 (Modificada).

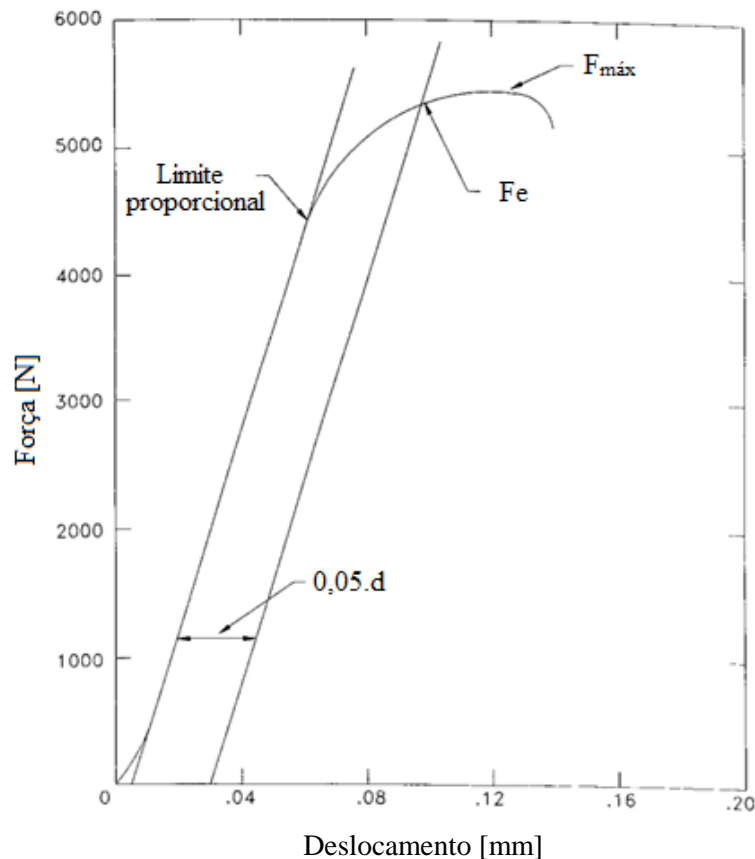
### 2.1.3 Norma americana ASTM D5764:2007

Na norma americana ASTM D5764:2007, a resistência da madeira ao embutimento é determinada a partir da razão entre a força que causa o deslocamento residual igual a 5% em relação ao diâmetro do pino metálico ( $F_{e5\%}$ ), e a área resistente ao embutimento dada pelo produto entre o diâmetro do pino ( $d$ ) e a espessura da peça de madeira ( $t$ ), *vide* Equação 2.5.

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t.d} \quad (2.5)$$

A ASTM D5764:2007 não determina a realização de ciclos de carregamento, somente recomendando um carregamento que gere um deslocamento constante de 1,0 mm/min até a ruptura do corpo de prova. O gráfico da Figura 2.7 ilustra a forma de obtenção da resistência ao embutimento, a partir do diagrama força de embutimento por deslocamento.

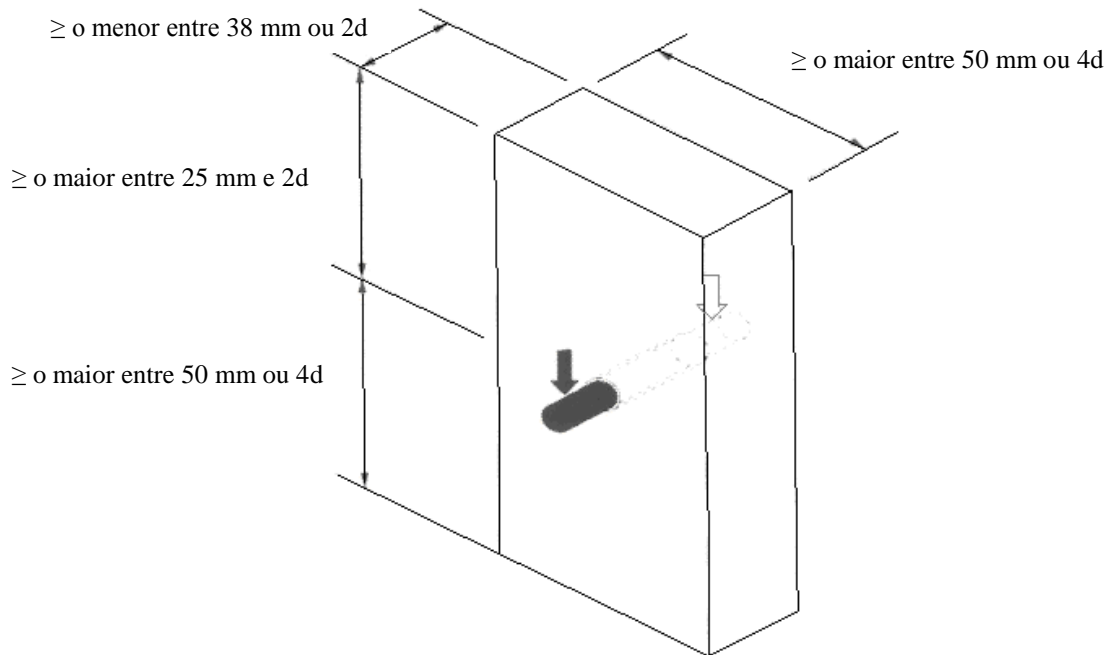
Figura 2.7: Diagrama tensão por deslocamento.



Fonte: ASTM D5764:2007 (Adaptada).

Os corpos de prova para realização dos ensaios devem possuir o formato prismático retangular com um furo em sua face. Na Figura 2.8 se encontram as dimensões para o corpo de prova nas direções paralela e normal às fibras da madeira.

Figura 2.8: Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao embutimento segundo a norma americana.



Fonte: ASTM D5764:2007 (Adaptada).

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

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

### 2.2.1 Norma brasileira ABNT NBR 7190:1997

Segundo a ABNT NBR 7190:1997 as resistências analíticas ao embutimento na direção paralela ( $f_{e0}$ ) e normal ( $f_{e90}$ ) às fibras são obtidas a partir da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ), *vide* equações 2.6 e 2.7. Nesse último caso, também é utilizado o fator de correção ( $\alpha_e$ ) para diferentes diâmetros de pino, *vide* Tabela 2.1.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (2.6)$$



$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (2.7)$$

Tabela 2.1: Valores de  $\alpha_e$  para diferentes diâmetros de pinos (d).

Diâmetro do pino [cm]	$\leq 0,62$	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	$\geq 7,5$
Coefficiente $\alpha_e$ [adim]	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,0

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptada).

### 2.2.2 Norma europeia EN 383:2007

Segundo o EUROCODE 5:2004, a resistência analítica ao embutimento para ligações com parafusos que possuam até 3 cm de diâmetro, com forças aplicadas formando um ângulo  $\alpha$  com a direção das fibras ( $f_{h,\alpha,k}$ ), para peças com pré-furação, pode ser calculada pela Equação 2.8.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (2.8)$$

A resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ( $f_{h,0,k}$ ) é calculada levando em consideração a densidade característica da madeira ( $\rho_k$ ) e o diâmetro do pino metálico (d), *vide* Equação 2.9.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (2.9)$$

Para o cálculo do fator  $k_{90}$  são utilizadas as equações 2.10 e 2.11, para madeiras macias e duras, respectivamente. Nas equações as unidades utilizadas são milímetro para o diâmetro do pino metálico e  $\text{Kg/m}^3$  para a densidade aparente da madeira.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (2.10)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (2.11)$$

### 2.2.3 Norma americana ASTM D5764:2007

A norma americana a partir do documento NDS (2001) estabelece as Equações 2.12 e 2.13 para estimar a resistência ao embutimento nas direções paralela ( $f_{e0}$ ) e normal ( $f_{e90}$ ) em relação às fibras da madeira utilizando como parâmetros a densidade aparente da madeira ( $\rho$ ) e o diâmetro do pino ( $d$ ).

$$f_{e0} = 0,07725 \cdot \rho \quad (2.12)$$

$$f_{e90} = 212 \cdot (0,001 \cdot \rho)^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (2.13)$$

## 2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DE REGRESSÃO PROPOSTOS PARA DETERMINAÇÃO DE VALOR DE RESISTÊNCIA

Os métodos de regressão propostos a seguir têm como finalidade determinar o ponto do limiar de resistência da madeira ao embutimento à maneira dos métodos definidos pelas normas estudadas (*vide* seções 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3).

O uso de métodos estatísticos ao invés de métodos gráficos (como no caso das normas brasileira e americana) ou de métodos determinísticos (caso da norma europeia) foi proposto no trabalho com objetivo de estudar através de maneiras alternativas qual o ponto ideal de resistência da madeira ao embutimento. Métodos estatísticos têm a possibilidade de ser otimizados e ajustados para diminuir a dispersão de dados da resposta de um determinado grupo de ensaios.

Os métodos propõem-se a utilizar informações do comportamento da madeira tanto do regime elástico quanto do plástico para determinar mediante metodologias estatísticas de fácil implementação computacional um ponto ideal para a resistência ao embutimento. O cruzamento de informações dos dois regimes, elástico e plástico, ao invés de somente um, como é o caso das atuais normas, poderia ser considerada como uma abordagem inteligente e mais completa. Abordagens semelhantes à proposta podem também ser utilizadas para o estudo do comportamento de materiais que apresentam características de resposta mecânica semelhantes à da madeira.

Espera-se assim, através dos métodos de regressão, descrever melhor o comportamento natural da madeira quando solicitada mecanicamente e determinar valores de resistência ao embutimento mais representativos e homogêneos para a espécie do que os métodos atuais.

Nesta pesquisa foram aplicados três métodos de regressão baseados em metodologias estatísticas que consideram diferentes critérios para o ajuste de regressão e obtenção de ponto de resistência, os critérios adotados são apresentados nas seções correspondentes a cada método *vide* seções 2.3.1 a 2.3.3.

O comportamento mecânico da madeira é complexo devido a se tratar de um material de origem biológica, para simplificá-lo pode-se dividir a curva de resposta ao ensaio de embutimento em diversas seções, neste caso correspondentes aos regimes elástico, elasto-plástico e totalmente plástico. Matemáticos e estatísticos usam comumente modelos de regressão segmentados para descrever problemas deste tipo, pois a técnica permite a modelagem de cada região do conjunto de pontos bem como as junções destas partes (Seber & Wild (1989)). Um exemplo disto é o modelo *broken-stick*, no qual retas que representam fases diferentes de um processo são unidas abruptamente em um ponto de transição (ponto crítico). Este modelo pode ser aplicado para estudar a resistência de materiais com comportamento mecânico similar aos materiais metálicos, visto que durante a fase elástica a deformação em resposta à tensão é linear e, ainda, a mudança do regime elástico para o plástico é bem definida, marcada por um ponto (em forma de quina) na curva de resposta de ensaio do material.

Entretanto há problemas nos quais um ponto de mudança abrupto não faz sentido na prática, tendo em vista que o comportamento natural dos dados evidencia uma mudança gradual entre fases. Para estes fenômenos, estatísticos têm formulado versões dos modelos segmentados com zonas de transição de fase suaves como Seber & Wild (1989), Ferreira (2015) e Chiu *et al.* (2006). Um exemplo é a regressão *bent-cable* de Chiu *et al.* (2006), a qual consiste na união de regimes lineares por meio de junções polinomiais quadráticas. Métodos deste tipo podem ser mais adequados para descrever a resistência da madeira ao embutimento, visto que os pontos de resposta apresentam um padrão recurvado, sem a evidência de um limite exato onde ocorra a transição do comportamento elástico para o plástico, em outras palavras, os dados indicam a existência de uma zona de transição, decorrente do comportamento elasto-plástico da madeira.

Neste trabalho, as regressões *broken-stick* e *bent-cable* foram utilizadas para modelar as curvas de resposta mecânica da madeira ao ensaio de embutimento. Adicionalmente, na seção 2.3.3, é apresentado um novo método para a determinação precisa do fim do regime elástico e do valor do ponto crítico.

### 2.3.1 Método de regressão *bent-cable*

O método *bent-cable* proposto pelo autor Chiu *et al.* (2006) consiste em um método de regressão que define uma região de transição entre dois regimes de comportamento diferentes, definindo um limite de começo e fim da transição entre regimes. Nesta pesquisa define-se como ponto de resistência ao embutimento o ponto médio entre estes dois limites.

A seguir reproduzem-se as bases do método *bent-cable* de maneira simplificada focando na implementação funcional para efeitos de apresenta-lo, com base nas anotações de Chiu *et al.* (2006), como segue:

Denota-se o modelo *bent-cable* por  $f$ , a co-variável por  $x$ , e o vetor dos parâmetros de regressão por  $\theta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \tau, \gamma)$ . Para construir  $f$ , primeiro considere o *bent-cable* básico:

$$q(x; \tau, \gamma) = \frac{(x - \tau + \gamma)^2}{4\gamma} \mathbf{1}\{|x - \tau| \leq \gamma\} + (x - \tau) \mathbf{1}\{x > \tau + \gamma\} \quad (2.14)$$

Escreve-se o *bent-cable* completo como:

$$f_{\theta}(x) \equiv f(x; \beta_0, \beta_1, \beta_2, \tau, \gamma) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 q(x; \tau, \gamma) \quad (2.15)$$

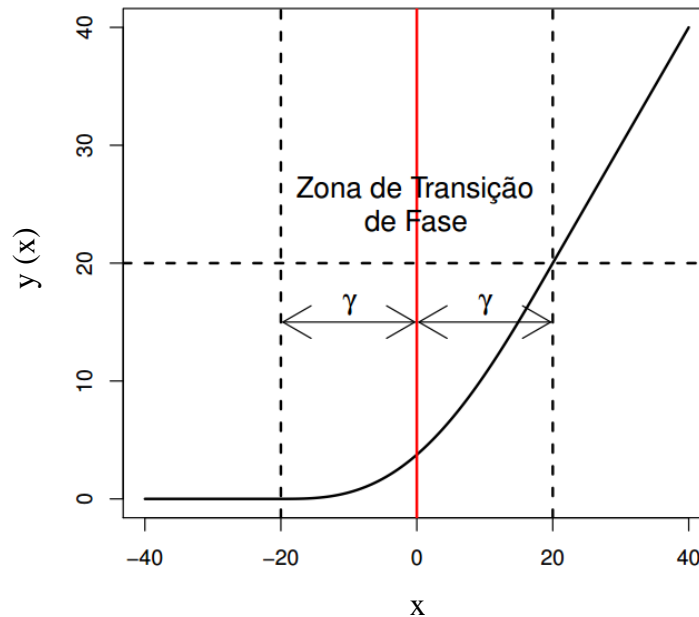
Observe que a parametrização (2.15) é linear nos  $\beta_j$ 's, mas não é linear nos parâmetros de transição ou curvatura,  $\tau$  e  $\gamma$  (ponto de transição e metade da largura da zona de transição, respectivamente). Dada uma sequência de valores co-variáveis,  $\{x_i\}_{i=1}^n$ , o modelo de regressão é:

$$Y_i = f_{\theta}(x_i) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.16)$$

Onde os  $\varepsilon_i$ 's são erros aleatórios com media 0 e variância  $\sigma^2$ .

Na Figura 2.9 pode se ver o gráfico da função de transição  $q$ , inserida dentro do modelo *bent-cable* na aplicação do método para um conjunto de dados. A linha preta representa a suavização para o conjunto de dados, a reta vertical vermelha indica o ponto de transição entre os dois regimes e o parâmetro  $\gamma$  com as linhas verticais tracejadas mostram a largura da zona de transição.

Figura 2.9: Junção de transição suave quadrática, base do método *bent-cable*.



Fonte: Ferreira (2015).

### 2.3.2 Método de regressão *broken-stick*

O método *broken-stick* consiste em ajustar retas a um conjunto de dados com dois ou mais regimes com comportamentos aproximados ao comportamento linear, mas com coeficientes angulares diferentes, é possível também definir um ponto de transição entre os regimes por meio da determinação do ponto de intercessão destas retas. Define-se nesta pesquisa como valor de resistência ao embutimento a coordenada de força do ponto de intercessão das retas.

A definição do método *broken-stick*, para ‘n’ regimes, é descrita de maneira simplificada, transcrita das anotações de Ferreira (2015), como segue:

Seja um modelo de regressão simples, que considera apenas uma variável explanatória e usualmente é expresso por:

$$y_i = \eta(x_i) + q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.17)$$

em que  $y_i$  é a  $i$ -ésima das  $n$  respostas observadas de uma variável aleatória  $Y$ ,  $q_i$  é o  $i$ -ésimo erro aleatório e  $\eta(x_i)$  é a resposta esperada condicionada ao  $i$ -ésimo valor da variável explanatória, denotado por  $x_i$ . No contexto de análise de regressão, o valor  $x_i$  é mensurado pelo pesquisador de forma precisa, com erros desprezíveis.

Na regressão segmentada, a parte fixa do modelo é desdobrada em:

$$\eta(x) = \eta(x|\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\tau}) = \begin{cases} g_1(x|\boldsymbol{\beta}_1), & A \leq x \leq \tau_1, \\ g_2(x|\boldsymbol{\beta}_2), & \tau_1 < x \leq \tau_2, \\ \vdots & \vdots \\ g_D(x|\boldsymbol{\beta}_D), & \tau_{D-1} < x \leq B, \end{cases} \quad (2.18)$$

na qual: as funções  $g_j$ 's, com  $j = 1, 2, \dots, D$ , denominadas também por regimes, geralmente são polinômios de 1º e 2º graus ou funções não lineares de  $x$  com poucos parâmetros que caracterizam a forma das  $D$  fases do processo estudado;  $\beta_j$ 's são os vetores de parâmetros associados a cada um dos regimes, de maneira que  $\boldsymbol{\beta}^T = (\beta_1^T, \beta_2^T, \dots, \beta_D^T)$ ;  $A$  e  $B$  são os limites inferior e superior do domínio de regressão e  $\boldsymbol{\tau}^T = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{D-1})$ , com  $A < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{D-1} < B$ . Os elementos do vetor  $\boldsymbol{\tau}$  são os valores das abscissas que delimitam a partição proposta do domínio de regressão e usualmente recebem nomes como pontos de junção, de transição, de mudança ou pontos finais.

A modelagem de respostas contínuas exige, ainda, a imposição da seguinte restrição:

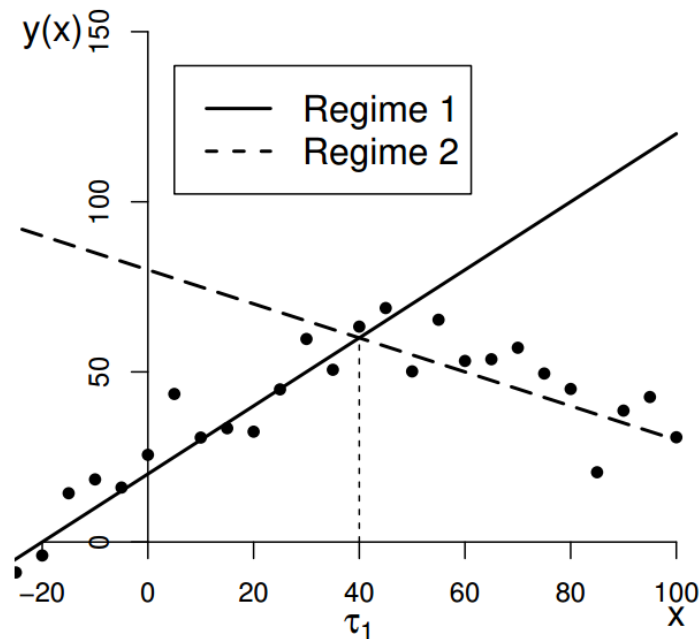
$$g_l(x = \tau_l | \beta_l) = g_{l+1}(x = \tau_l | \beta_{l+1}), \quad \text{para } l = 1, \dots, D - 1. \quad (2.19)$$

Os gráficos deste modelo caracterizam-se pela presença de quinas, que ocorrem nas intersecções de regimes adjacentes, o que implica a inexistência da derivada de  $\eta(x)$  sob os pontos de mudança. O problema é que sem derivadas contínuas da parte fixa do modelo, os métodos usuais de estimação e inferência em regressão não linear não são aplicáveis. Além disso, mudanças repentinas são incomuns na natureza, as transições de fase geralmente são fenômenos graduais.

Para esta pesquisa foi considerado o comportamento da madeira como sendo formado somente por dois regimes e um ponto de transição, desta maneira os resultados do método podem ser comparados à resposta das normas estudadas e dos demais métodos de regressão propostos. Em revisões deste estudo, ou em estudos futuros podem ser considerados mais regimes para modelar o comportamento da madeira ou ainda de outros materiais com características de resposta similares através do método *broken-stick*.

Na Figura 2.10 é possível ver a aplicação do método para uma resposta com dois regimes diferentes. As retas contínua e tracejada representam as aproximações lineares para os diferentes regimes, enquanto que o ponto de intercessão delas,  $\tau_l$  corresponde ao ponto de mudança de regime.

Figura 2.10: Análise de dados por método *broken-stick*.



Fonte: Ferreira (2015).

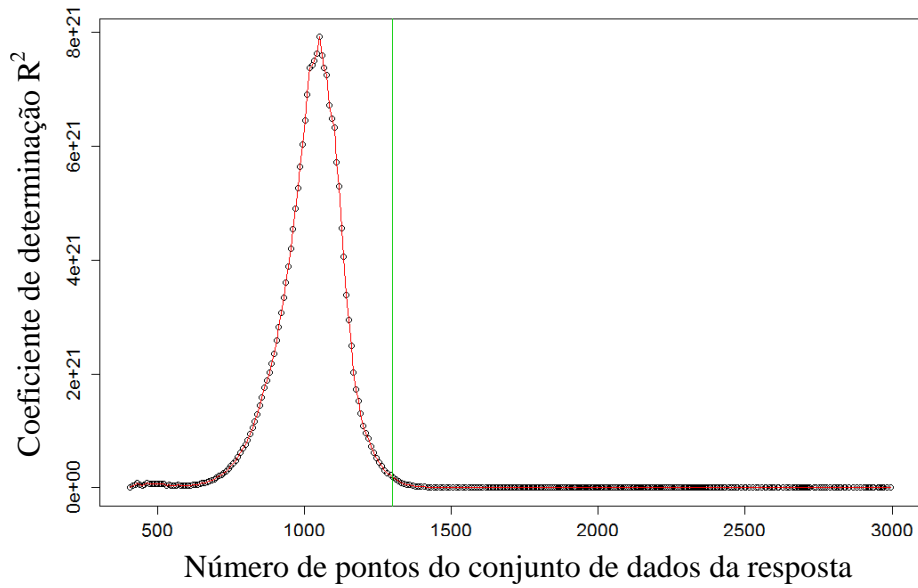
### 2.3.3 Método de regressão proposto

O método proposto consiste em traçar uma reta com um conjunto pequeno de pontos iniciais, 50 no caso, e com base neles calcular o parâmetro estatístico de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da melhor reta ajustada para o conjunto. Em passos seguintes, e até atingir o fim dos dados, adiciona-se ao conjunto o próximo ponto de resposta subsequente, adicionando um ponto por vez e recalculando-se a cada adição a reta da melhor aproximação para o conjunto e o valor de  $R^2$ . Desta maneira elabora-se um vetor de dados com o par ordenado dos valores de  $R^2$  por quantidade de pontos adicionados ao conjunto (denominado de 'res.cp1' no *script* do programa, *vide* Apêndice D).

Traça-se um gráfico de  $R^2$  por número de pontos suavizado por meio de modelo de regressão não paramétrica (*splines*), e então encontra-se o ponto a partir do qual a curva de  $R^2$  torna-se decrescente. Este processo permite maximizar  $R^2$  determinando o conjunto de pontos que caracteriza o melhor regime linear e pode-se tomar este ponto como sendo o limite de mudança de comportamento.

Na Figura 2.11 é possível ver os valores de  $R^2$  por número de pontos da variável explicativa ( $x$ ), a linha vermelha representa a suavização por *splines* e a reta vertical verde indica o ponto para o qual se dá a máxima determinação do conjunto.

Figura 2.11 Gráfico de  $R^2$  do método proposto implementado no *software* R.

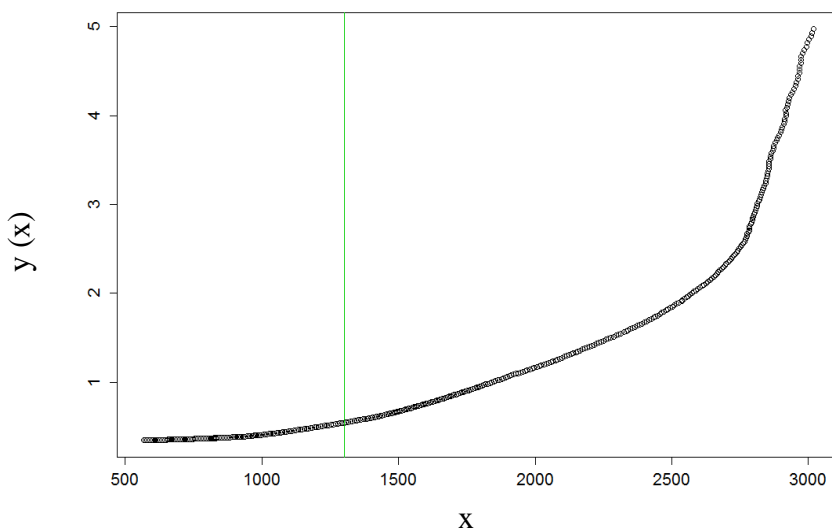


Fonte: O autor (2017).

Nesta pesquisa assume-se o último ponto que melhor explica de maneira linear o conjunto de dados como sendo o valor de resistência ao embutimento do corpo de prova.

Na Figura 2.12 a reta vertical verde representa o limite de mudança de comportamento que define o ponto de resistência ao embutimento representado no gráfico de um conjunto de dados de resposta do material, obtido pelo método proposto.

Figura 2.12: Análise de dados pelo método proposto para um conjunto de dados implementado no *software* R.



Fonte: O autor (2017).



## 2.4 TRABALHOS CIENTÍFICOS SOBRE RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO

Almeida (2014) faz uma abordagem comparativa entre métodos de ensaio propostos pelas normas ABNT NBR 7190:1997, ASTM D5764:2007 e EN 383:2007, dentre outras, com a finalidade de propor um método mais adequado para determinar a resistência ao embutimento da madeira, já que no seu trabalho o autor considera como muito pequenas as deformações limites consideradas pela norma brasileira. Com isto chega à conclusão que os resultados obtidos pela norma europeia por serem maiores em comparação as normas americana e brasileira seriam mais adequados para o uso em cálculos de estruturas de madeira. Almeida (2014) utilizou na sua pesquisa 6 espécies de madeira e 4 diâmetros de pino diferentes (8, 10, 12 e 16 mm) para a determinação da resistência ao embutimento mediante 3 repetições para cada tratamento.

Valle (1999), Stamato (2002) e Almeida (2014) utilizando as diretrizes das normas ABNT NBR 7190:1997, ASTM D5764:2007 e EN 383:2007 encontraram valores médios de resistência ao embutimento maiores utilizando o método europeu quando comparado com o método descrito tanto nas normas americana quanto na norma brasileira, nas duas direções (normal e paralela) em relação às fibras. Segundo os autores, isso acontece porque a norma brasileira considera um procedimento gráfico com deformação específica residual 2‰ (2,8% de  $d$ , *vide* Equação 2.2) e pontos de determinação do trecho linear fixos de  $0,1 F_{e,est}$  e  $0,5 F_{e,est}$ . No caso da norma americana, também com um procedimento gráfico, porém com o valor de deslocamento residual estabelecido de 5% do diâmetro do pino ( $d$ ) e sendo o trecho linear da curva determinado pela linearidade em si da curva e não de pontos pré-estabelecidos. Por outro lado, a norma europeia define a resistência ao embutimento por meio determinístico estabelecendo um deslocamento igual a 5 mm, caso a ruptura do corpo de prova não ocorra antes e aponta a resistência como o maior valor dentre os obtidos no intervalo de deslocamento.

## 2.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os diferentes autores estudados chegaram a conclusões semelhantes sobre os valores de resistência ao embutimento obtidos por meio das normas brasileira, americana e europeia, afirmando que os valores da primeira sempre se mostram menores em comparação com as demais e que os valores da última mostram-se maiores.

A norma brasileira utiliza a deformação específica o que configura em um valor de deslocamento muito pequeno como parâmetro para determinação da resistência ao embutimento, diferentemente dos documentos normativos europeu e americano que utilizam um deslocamento maior entre o pino metálico e a madeira, não limitando desta maneira exibir o comportamento completo da madeira ao embutimento. Além disso, a norma brasileira estabelece dois pontos fixos para determinar a reta teórica do trecho linear da curva de comportamento do material, o que não sempre é verdade, contrasta com isto o fato da norma americana fixar tal reta como paralela ao primeiro trecho linear da curva, determinada pela própria linearidade dos dados e não por pontos pré-fixados.

Sobre a resistência calculada analiticamente os documentos normativos EUROCODE 5:2004 e NDS (2001) levam em consideração somente a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento. Por sua vez, ABNT NBR 7190:1997 utiliza a resistência à compressão na direção paralela as fibras, sendo necessários ensaios mecânicos para a obtenção desta propriedade e, assim, para o cálculo da resistência ao embutimento. Considera também fatores de correção em pontos discretos para cada diâmetro do pino ao invés de utilizar uma função de correção contínua. Esta diferença entre parâmetros necessários para o cálculo analítico da resistência ao embutimento faz com que no caso da norma brasileira seja necessário realizar ensaios mecânicos de compressão na madeira analisada para a obtenção do resultado analítico da resistência ao embutimento, requerendo aparelhagem e metodologia específica para tal, nem sempre disponível e sempre onerosa. No caso das normas europeia e americana são requeridos parâmetros de fácil obtenção mediante métodos de medição simples que requerem aparelhagem mínima de medição como balança e paquímetro, fáceis de serem obtidos em qualquer laboratório.

Uma vez que a vantagem de se possuir um método analítico seja a não necessidade de realização de ensaios mecânicos para obtenção da resistência desejada, é contraditório o fato de a norma brasileira propor como parâmetro necessário para o cálculo da resistência ao embutimento um valor que provem de ensaios mecânicos. Em contrapartida as normas europeia e americana propõem parâmetros de simples obtenção para o cálculo da mesma resistência, não sendo necessária a realização de ensaios mecânicos.

Os diferentes autores estudados e as normas propostas não se atentam ao estudo da dispersão de resultados dos ensaios, partindo da consideração que todo valor de resistência obtido mediante ensaio é representativo estatisticamente. Os pesquisadores estudados utilizam muitos tratamentos com número de amostras pequeno. As normas não estabelecem número mínimo de corpos de prova para determinação de valores de resistência experimentais. Os

autores estudados analisam a proximidade dos valores analíticos e experimentais por comparação direta. Tudo isto mostra que os dados obtidos dos experimentos são tratados comumente pelos pesquisadores e autores com pouco critério estatístico, comprometendo conseqüentemente as conclusões derivadas das análises destes. Uma base estatística sólida para o planejamento, execução e posterior análise de dados, assegura que os resultados obtidos mediante experimentação sejam confiáveis, replicáveis por outros pesquisadores e que seja seguro retirar conclusões deles.

Métodos estatísticos de análise de regressão representam ferramentas versáteis, tanto na implementação como no uso, sendo aplicáveis a uma grande diversidade de situações e podendo ser largamente ajustados e reconfigurados para atender especificidades necessárias ou requeridas. Os modelos utilizados nesta pesquisa possuem a flexibilidade necessária para serem ajustados com relativa facilidade para determinação do ponto de resistência ao embutimento. As possibilidades de implementação destes métodos foram restringidas e padronizadas para que os resultados provenientes de cada um deles sejam comparáveis entre si, porém, em uma diferente abordagem isto pode ser mudado de maneira a utilizar mais amplamente os recursos que cada método oferece.

O uso de ferramentas computacionais, como o *software* de linguagem R, permitem ao pesquisador efetuar a análise de seus dados de forma simples e completa, com relativo pouco esforço, além de abrirem possibilidades de implementação de metodologias desenvolvidas por ele mesmo, como foi o caso desta pesquisa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados para obtenção da resistência ao embutimento de pinos metálicos em madeiras de reflorestamento dos tipos pinus e eucaliptos através de ensaios experimentais e cálculos analíticos propostos pelas normas brasileira ABNT NBR 7190:1997, europeia EN 383:2007 e americana ASTM D5764:2007.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a composição dos corpos de prova foram utilizadas madeiras de reflorestamento de Pinus (*Pinus spp.*), classe C25 e Eucalipto (*Eucalyptus spp.*), classe C40, ambas com umidade aproximada de  $12\% \pm 1\%$ .

Foram utilizados pregos metálicos com cabeça para construção civil, de aço polido não temperado, de qualidade comercial com bitola JP x LPP: 24x60 (JP - Jauge de Paris; LPP - Linhas de Polegadas Portuguesa). Os pregos têm diâmetro médio de  $6,50 \pm 0,01$  mm e comprimento de  $135 \pm 5$  mm com tensão de escoamento aproximada de 600 MPa.

Para a condução dos ensaios mecânicos foi utilizada a máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL30000, com atuador servo hidráulico com capacidade 300 KN (30.000 Kgf) com medidor de deslocamento eletrônico (transdutor) próprio e sistema de aquisição de dados totalmente informatizado. A máquina foi previamente calibrada antes da realização dos ensaios pela própria empresa fabricante.

Para aferição da massa dos corpos de prova 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 efetuar as medidas das dimensões dos corpos de provas foi utilizado um paquímetro com leitura digital com erro de  $\pm 0,01$  mm e uma régua de aço graduada com erro de  $\pm 0,5$  mm.

A máquina de ensaios e os instrumentos de medida encontram-se disponíveis no Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP, Campus Itapeva, em ambiente permanentemente climatizado a  $20 \pm 3$  °C.

Para as análises e tratamento de dados e modelagem estatísticas foi utilizado o *software* livre e de código aberto RStudio versão 0.99.903, baseado na linguagem de programação R.

Para os cálculos analíticos e confecção de tabelas foi utilizado o *software* Excel parte do Microsoft Office Professional Plus 2010, versão 14.0.4760.1000 de 64 bits.

### 3.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

Para os ensaios experimentais de embutimento foram confeccionados 25 corpos de prova de cada um dos 12 tratamentos, de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EN 383:2007 e ASTM D5764:2007 para madeira de pinus e de eucalipto nas direções normal e paralela às fibras, totalizando 300 corpos de provas confeccionados. Todos os corpos de prova foram lixados para corrigir imperfeições dos mesmos e foi efetuada pré-furação com broca para madeira de 6,5 mm de diâmetro, para inserção do pino. A pré-furação foi efetuada somente antes do ensaio.

Para obter a resistência ( $f_{e,est}$ ) e a força máxima ao embutimento estimada ( $F_{max,est}$ ), no caso das normas ABNT NBR 7190:1997 e EN 383:2007, respectivamente, foram confeccionados 5 corpos de prova extras para cada tratamento, procedentes do mesmo material utilizado nos ensaios efetivos.

A ordem de ensaio foi aleatorizada para a totalidade dos corpos de prova, independente do tratamento, a fim de distribuir uniformemente os erros aleatórios intrínsecos de todo processo.

Os corpos de prova foram identificados de acordo com o tratamento e numerados. Os tratamentos foram nomeados de acordo com a norma usada, direção das fibras e espécie de madeira, da seguinte maneira:

**N D M**, onde:

N - Norma utilizada: “A” para americana, “B” para brasileira e “E” para europeia;

D - Direção das fibras: “N” para normal e “P” para paralela;

M - Espécie da madeira: “E” para eucalipto, “P” para pinus.

Assim por exemplo, o tratamento “ENE” corresponde ao ensaio da norma europeia no sentido normal às fibras confeccionado em madeira de eucalipto.

Os corpos de prova passaram 90 dias em uma climatizadora, apropriada para tal, até estabilizarem a umidade relativa em  $12 \pm 1\%$ .

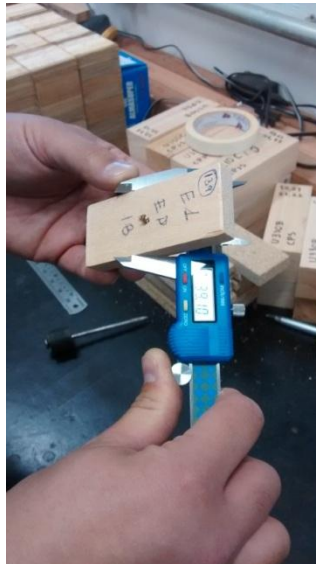
Os passos do ensaio experimental compreenderam: a medição das dimensões do corpo de prova (Figuras 3.1a, 3.1b e 3.1c), colocação do pino metálico (Figura 3.2a), posicionamento do corpo de prova no suporte de ensaio e fixação do transdutor (Figura 3.2b),

posicionamento do aplicador de carga (Figura 3.2c), retirada e exame visual do corpo de prova pós-ensaio (Figuras 3.3a e 3.3b) e determinação da massa mediante passagem final (Figura 3.3c).

Figura 3.1: Detalhe da medição das dimensões do corpo de prova antes do ensaio. (a) Altura, (b) largura e (c) espessura.



(a)



(b)



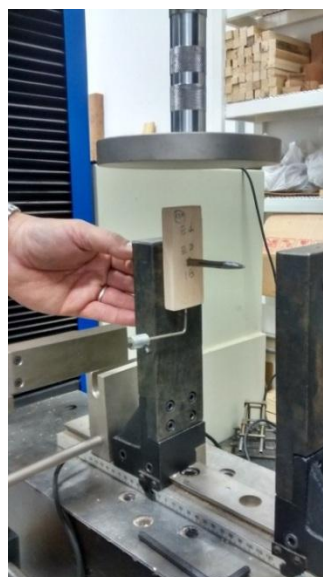
(c)

Fonte: O autor (2017).

Figura 3.2: Posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios. (a) Colocação do pino metálico, (b) Fixação do transdutor e (c) posicionamento do aplicador de carga.



(a)



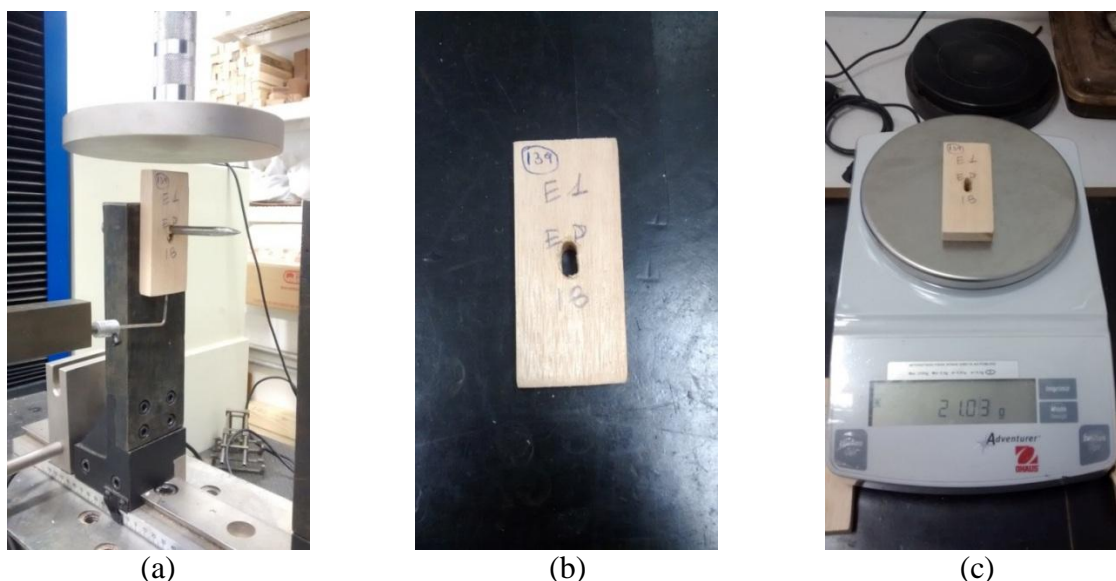
(b)



(c)

Fonte: O autor (2017).

Figura 3.3: Corpo de prova pós-ensaio. (a) Retirada, (b) exame visual das deformações e (c) determinação da massa úmida.



Fonte: O autor (2017).

Para determinação da umidade relativa exata do corpo de prova durante o ensaio foi medida a massa logo após o ensaio ( $m_u$ ) (Figura 3.3c) de cada corpo de prova e comparada com a sua respectiva massa seca ( $m_s$ ). Para a determinação da massa seca todos os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C durante 10 dias. Mediante a Equação 3.1, proposta pela ABNT NBR 7190:1997, foi possível calcular para cada corpo de prova a umidade relativa (U%) que possuía durante o ensaio.

$$U\% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

### 3.3 OBTENÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA EXPERIMENTAIS

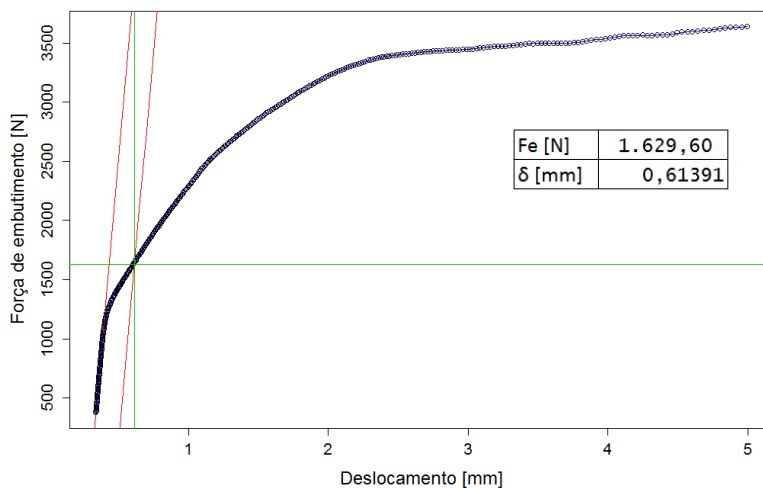
O equipamento de ensaios experimentais, independente da norma aplicada, dá como resposta uma matriz de pontos de pares ordenados de força de embutimento ( $F_e$ ) expressa em Newtons e seu deslocamento correspondente ( $\delta$ ) em milímetros.

Todos os corpos de prova foram ensaiados até o deslocamento absoluto ( $\delta$ ) de 7,0 mm, indo além do critério de parada proposto por cada método. Com isto obteve-se pontos de resposta do comportamento do material estendidos além dos limites normais de ensaios, a fim de coletar informações que normalmente seriam ignoradas. O aumento do limite de deslocamento dos critérios de parada não modifica em nada os resultados que seriam

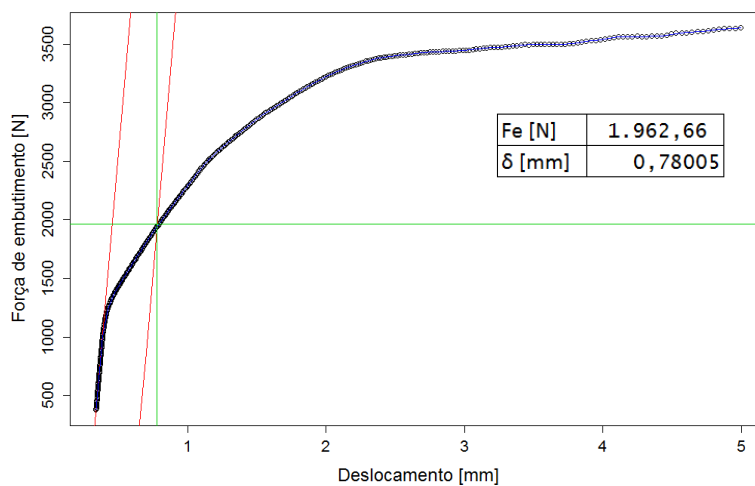
normalmente obtidos para cada norma se tais limites não fossem alterados. Para o equipamento e as configurações utilizadas na pesquisa o aumento do limite de deslocamento não representa nenhum risco à máquina de ensaios, aos equipamentos de leitura de resposta nem ao operador.

A Figura 3.4 nos itens (a), (b) e (c) mostra de maneira gráfica a implementação dos métodos através do *software* R para determinação do valor de resistência de uma curva de resposta de determinado conjunto de dados de um corpo de prova para cada norma estudada ABNT NBR 7190:1997, NDS (2001) e EUROCODE 5:2004, respectivamente. Nas Figuras as retas verdes horizontais e verticais representam as coordenadas dos pontos de resistência e os quadros expressam seu respectivo valor.

Figura 3.4: Determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) para as normas: (a) Brasileira, (b) americana e (c) europeia.

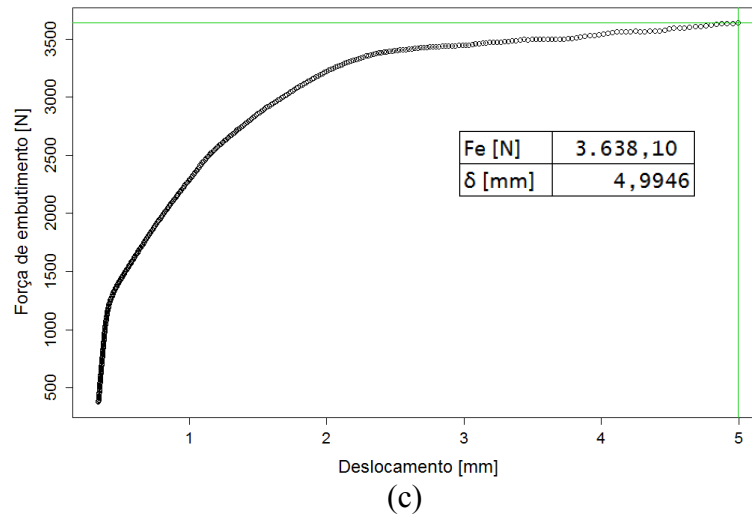


(a)



(b)





Fonte: O autor (2017)

No Apêndice A é possível consultar a rotina utilizada no *software* R para a determinação dos pontos de resistência para cada norma aplicada a partir da matriz de pontos de resposta de cada corpo de prova.

O conjunto de dados de valores de Força ( $F_e$ ) de todos os corpos de prova foi dividido pela área resistiva de cada corpo de prova correspondente (diâmetro do pino ( $d$ ) x espessura do corpo de prova ( $t$ )) para a obtenção dos valores de resistência ao embutimento ( $f_e$ ) e sendo ajustadas as unidades de medida para apresentar os resultados em Mega-Pascals (MPa).

Os valores de resistência ao embutimento ( $f_e$ ) foram corrigidos pela umidade relativa ( $U\%$ ) de cada corpo de prova segundo a Equação 2.3, (*vide* seção 2.1.1.1) para obtenção da resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ).

Nesta pesquisa também foi proposto um estudo considerando-se a resistência específica ao embutimento ( $f_{e,\rho}$ ). Esta resistência foi definida como sendo a razão entre a resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ) e a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) de cada corpo de prova. Define-se a resistência específica ( $f_{e,\rho}$ ) na Formula 3.2 como segue:

$$f_{e,\rho} = \frac{f_{e,12} \left[ \frac{Mpa}{Kg} \right]}{\rho_{ap} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]} \cdot 10^3 \quad \left[ \frac{kPa \cdot m^3}{Kg} \right] \quad (3.2)$$

A cada elemento deste grupo de resistências anteriormente definidas ( $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ ) para evitar repetição dar-se-á no texto, deste ponto em diante, o nome de modalidade de resistência.

### 3.4 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros para o cálculo da resistência ao embutimento nas direções paralela e normal de acordo com as normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e NDS (2001), (*vide* seção 2.3).

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados para cálculo de  $f_{c0}$  e  $f_{e90}$  para cada uma das normas.

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

Fonte: O autor (2017).

O parâmetro  $\alpha_e$  utilizado para o cálculo da resistência ao embutimento na direção normal em relação às fibras foi determinado de acordo com a ABNT NBR 7190:1997 (*vide* Tabela 2.1), mediante interpolação linear para  $\alpha_e$  em função do diâmetro do pino metálico, tomando-se por base os dois pontos próximos ao valor de diâmetro do pino metálico utilizado no ensaio.

Para o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) foram utilizados os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras, obtidos mediante ensaio mecânico de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, utilizando-se um total de 5 corpos de prova para cada espécie, provenientes da mesma prancha de madeira dos corpos de prova de embutimento.

A densidade ( $\rho$ ) e a densidade aparente característica da madeira ( $\rho_k$ ) utilizadas no NDS (2001) e EUROCODE 5:2004, respectivamente, foram aproximadas pela média dos valores de densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) das madeiras. A densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) foi obtida mediante medição direta e pesagem dos corpos de prova de compressão paralela às fibras com umidade relativa de 12 %.

Para o cálculo do parâmetro  $k_{90}$ , utilizado pelo EUROCODE 5:2004 foi considerado o pinus como madeira menos densa e o eucalipto como madeira mais densa.

### 3.5 METODOLOGIA DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO PROPOSTAS PARA DETERMINAÇÃO DE VALOR DE RESISTÊNCIA

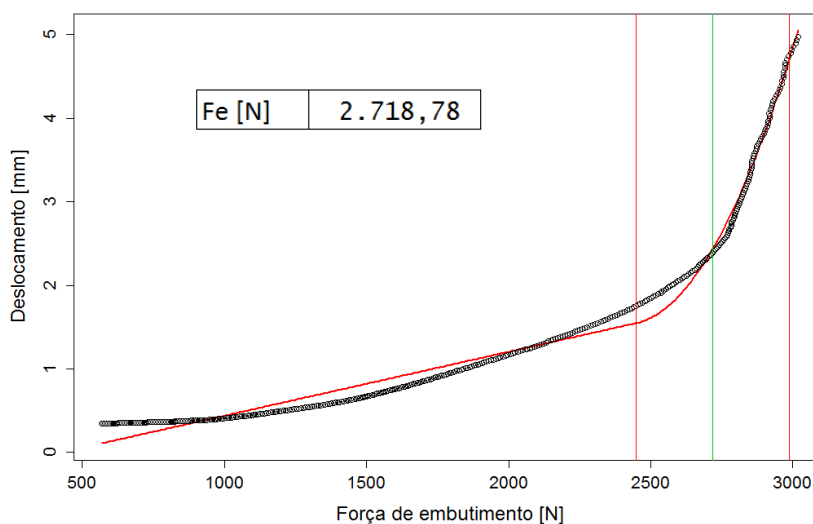
Para posterior comparação de resultados foram implementados os métodos de regressão para determinação de resistência de todos os corpos de prova de todos os tratamentos.

A metodologia utilizada nesta pesquisa, para os métodos *bent-cable* e *broken-stick*, descrita nas seções 2.3.1 e 2.3.2, respectivamente, foi adaptada para a linguagem de programação estatística R. Os *scripts* dos programas elaborados no *software* R-Studio podem ser encontrados, respectivamente, nos Apêndices B e C deste trabalho.

Nas Figuras referentes às análises de regressão os eixos foram alterados da forma de apresentação tradicional para coincidirem no eixo das abcissas com a variável de entrada, variável dependente ou comumente denominada de variável explicativa na estatística, neste caso a força (F), e no eixo das ordenadas com a variável de saída, variável mesurada ou de resposta, no caso o deslocamento ( $\delta$ ). Esta disposição das variáveis nos gráficos é mais correta do ponto de vista estatístico, razão pela qual será mantida quando utilizada para representar gráficos de regressão.

Na Figura 3.5 pode se ver o resultado gráfico da aplicação do método *bent-cable* no *software* R para a resposta de um corpo de prova ao ensaio de embutimento. As linhas verticais vermelhas mostram os limites da região de transição, a linha verde indica o ponto central da região de transição que define o valor de resistência ao embutimento.

Figura 3.5: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método *bent-cable* implementado no *software* R.

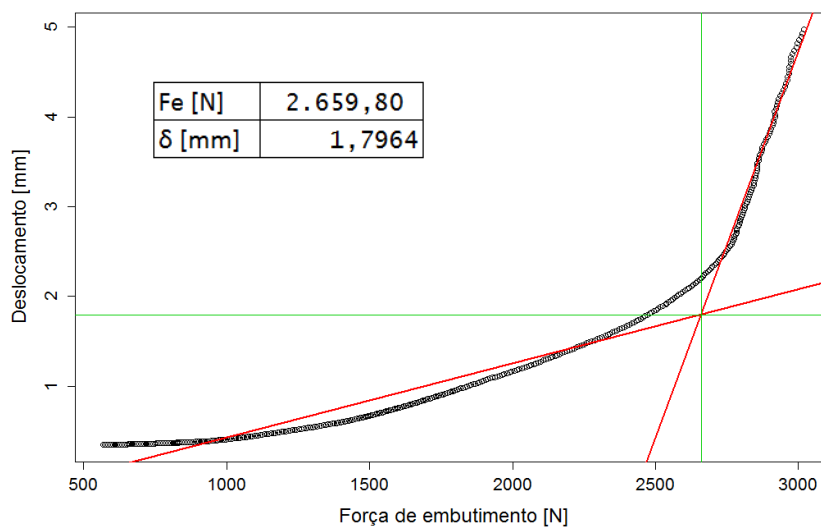


Fonte: O autor (2017).

Nesta pesquisa foi considerado o ponto central do regime de transição como sendo o ponto ideal de resistência ao embutimento, porém esta decisão foi tomada pelo autor em uma primeira análise. Nada impede que em futuros estudos seja considerado o limite inferior, ou mesmo o limite superior da região de transição como sendo o ponto ideal de resistência. Métodos estatísticos de regressão podem ser adaptados às necessidades específicas do pesquisador devido a sua flexibilidade e considerações como a anteriormente citada neste parágrafo podem ser adotadas a critério do autor.

Na Figura 3.6 é possível ver o resultado gráfico da aplicação do método *broken-stick* no *software* R para a resposta de um corpo de prova ao ensaio de embutimento. As linhas vermelhas representam a melhor aproximação linear para os dois regimes considerados, elástico e plástico. As coordenadas do ponto de mudança de regime, no caso o ponto de intercessão das retas, determinam o valor de resistência ao embutimento e seu deslocamento correspondente, como considerado nesta pesquisa pelo autor, *vide* item 2.3.2.

Figura 3.6: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método *broken-stick* implementado no *software* R.



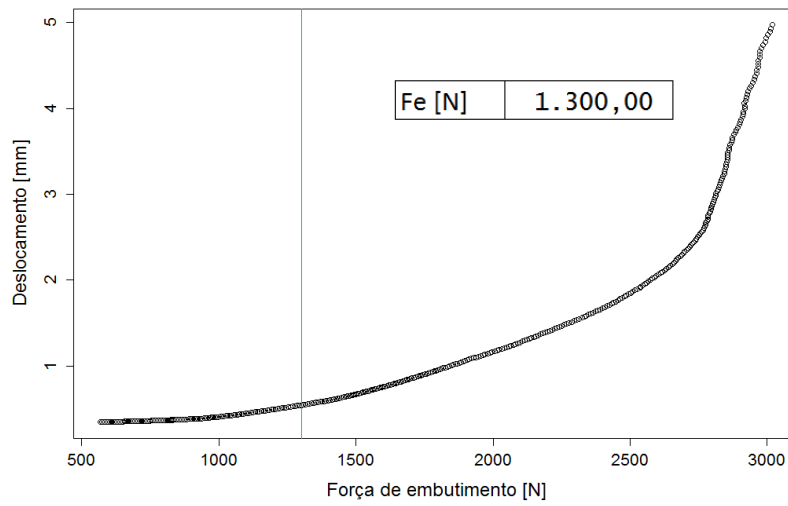
Fonte: O autor (2017).

O *script* para o método proposto foi inteiramente desenvolvido na linguagem de programação R. Tal *script* encontra-se com detalhes no Apêndice D deste trabalho.

A posição dos eixos das variáveis para a representação gráfica do método proposto também foi alterada da forma tradicional para a forma utilizada nos métodos anteriormente citados, a fim de manter uma uniformidade no que se refere à representação gráfica dos dados para os métodos de regressão estudados.

Na Figura 3.7 a reta vertical verde representa o limite de proporcionalidade entre as variáveis, que caracteriza o comportamento elástico, e define, conforme considerado pelo autor, o ponto de resistência ao embutimento obtido pelo método proposto. *Vide* 2.3.3 para detalhes sobre considerações do autor.

Figura 3.7: Método de determinação de força de embutimento ( $F_e$ ) pelo método proposto implementado no *software* R.



Fonte: O autor (2017).

De maneira idêntica aquela descrita no final do item 3.3, os valores de força de embutimento resultantes da aplicação dos métodos de regressão também foram transformadas para obterem-se os valores das modalidades de resistência, sendo elas a resistência ao embutimento ( $f_e$ ), a resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ) e a resistência específica ao embutimento ( $f_{e,\rho}$ ) e de igual maneira suas unidades de medida foram ajustadas.

### 3.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

#### 3.6.1 Resultados experimentais

Foram realizadas análises estatísticas descritivas por meio de diagramas de caixa ou *boxplot* e do estudo da distribuição dos resíduos dos resultados de resistência para todos os tratamentos e todas as modalidades de resistência estudadas, isto é  $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ .

Realizaram-se análises estatísticas de variância para um modelo linear ajustado por meio de mínimos quadrados ponderados. A significância dos efeitos principais dos fatores experimentais (madeira, norma e orientação das fibras) e interações foram avaliadas por meio

do teste F, ao nível de 5%. A comparação múltipla entre pares de tratamentos foi realizada por meio do teste de Games-Howell, a 5% de significância, devido à heterogeneidade de variâncias e aos tamanhos amostrais diferentes entre os grupos comparados.

Por último foi efetuada uma análise de correlação entre as modalidades de resistência e analisado, por meio do coeficiente de variação, qual das resistências foi melhor em termos de qualidade (menor dispersão de resultados relativos à média). Para efeito didático e visual foi utilizado, na Figura 4.10 um *score* de cores para diferenciar o maior, médio e menor valor de CV para cada tratamento (*scores* dentro de cada linha).

### 3.6.2 Resultados dos métodos analíticos

Primeiramente foi realizada uma análise de aderência entre os valores experimentais e analíticos para  $f_e$ . Como não existe correlação entre os dois valores e para continuar a analisar e comparar de maneira quantitativa os resultados foi proposto realizar as comparações descritas a seguir.

Os resultados dos métodos analíticos de determinação de resistência foram comparados à média dos resultados dos métodos experimentais (com correção de umidade) através de comparação direta por meio do parâmetro de discrepância definido como segue na Fórmula 3.9.

$$Discrepância = \left( \frac{f_e \text{ analítico}}{f_{e,12} \text{ experimental}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3.9)$$

Foi proposto este método de comparação direta entre valores fixos e valores amostrais ao invés de métodos estatísticos como seria formalmente correto, pois a discrepância entre os valores analíticos e as distribuições dos resultados foi muito grande. Para pequenas discrepâncias entre a média e os valores analíticos de cada tratamento (onde o valor analítico estivesse contido nos limites de distribuição da amostra) seria correta a comparação por métodos estatísticos, porém não foi o caso.

### 3.6.3 Resultados de métodos estatísticos de regressão

Os métodos de regressão segmentada e os métodos de determinação de ponto de resistência das normas estudadas foram aplicados à totalidade das respostas dos corpos de prova ensaiados para determinar os valores de resistência. Dividiu-se a metodologia de cada norma em duas partes, sendo uma de configurações experimentais, para confeccionar e ensaiar os corpos de prova (Processo I) e obter a matriz de pontos de resposta do

comportamento do material (Resultado I), e outra parte referente à determinação do valor de resistência (Processo II), para analisar o comportamento da resposta do material e associar-lhe um valor de resistência (Resultado II). Este último processo (Processo II), foi aplicado à totalidade das respostas dos corpos de prova obtidos.

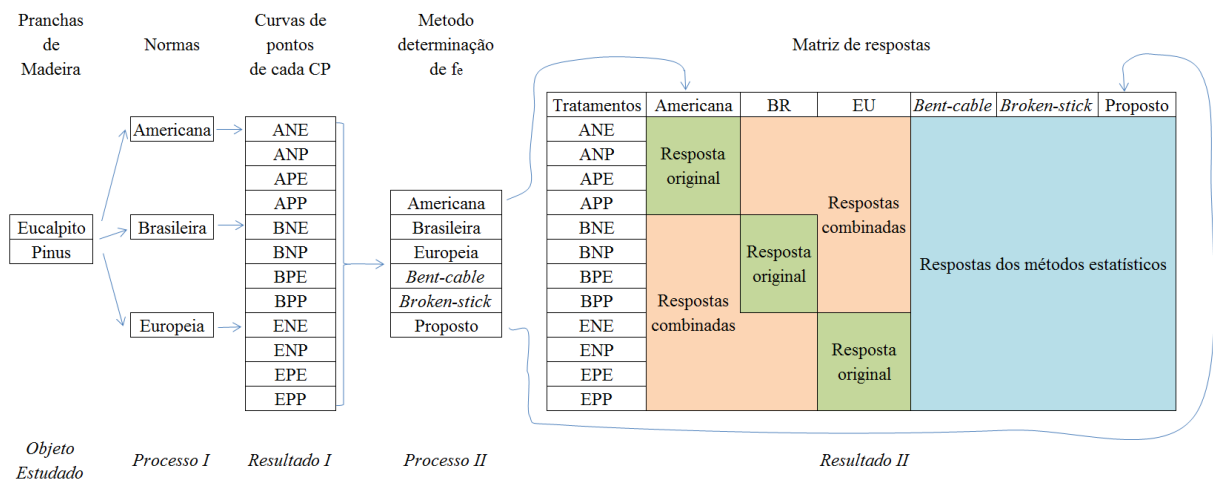
Como foi anteriormente citado (*vide* seção 3.3) todos os corpos de prova foram ensaiados até os 7,0 mm de deslocamento absoluto e, dessa forma, esta pesquisa conta com um banco de dados de curvas de comportamento para todos os corpos de prova ensaiados com qualidade suficiente para conduzir os testes estatísticos de análise de regressão segmentada e os demais métodos normativos.

O processo de determinação de ponto de resistência foi aplicado à totalidade dos corpos de prova para poderem ser efetuadas análises comparativas pareadas e com um único conjunto de dados. As curvas de pontos (Resultado II) servem também como material de análise para os métodos estatísticos que por si só não possuem metodologias para ensaios de material e obtenção de curvas de resposta, mas somente de análise destas.

Tendo-se aplicado esta combinação de metodologias esta pesquisa compreende um banco de dados de resistência ao embutimento com três matrizes 12 x 6 (Número de tratamentos x número de métodos de análise), uma para cada modalidade de resistência analisada ( $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ ).

A separação da metodologia das normas em duas partes e combinação da aplicação de métodos estatísticos de regressão é representada de maneira didática para melhor compreensão do leitor pela Figura 3.8.

Figura 3.8: Representação esquemática didática da combinação de metodologias implementadas na pesquisa.



Fonte: O autor (2017).

Para analisar os valores de média e a qualidade dos resultados dos métodos estatísticos de regressão segmentada e do método proposto foram elaboradas duas tabelas de resultados tratamentos x métodos de determinação de  $f_c$  ordenadas por *scores* de valores (médias ou desvios padrões ou CV) de maior para menor por código de cores (Tabelas 4.13 e 4.14). Desta maneira se fazem visíveis comparativamente os níveis de resistência obtidos através de cada método, assim como seus respectivos desvios (entenda-se qualidade).

Foi escolhido trabalhar diretamente com o desvio padrão (SD) ao invés do coeficiente de variação (CV) para no caso das comparações dos resultados referidos à mesma variável. Fazer comparações através do CV poderia parecer mais estandardizado, porém quando comparados valores da mesma variável não há razão para trabalhar com o CV ao invés do SD. Existe um efeito nocivo ao se utilizar o CV para comparar resultados de uma mesma variável ao invés do SD, que consiste na distorção dos valores de dispersão de um grupo de resultados (um tratamento, por exemplo) com média muito grande, o qual no caso de ter um SD grande passa a ter um CV pequeno, pois a média é alta.

### 3.7 METODOLOGIA DA ANALISE NUMÉRICA

As simulações numéricas dos ensaios experimentais de embutimento foram efetuadas com utilização do *software* ABAQUS 6.14 com licença de utilização acadêmica disponível na EESC/USP. Foram testados vários níveis de refinamento e configuração de malha de elementos finitos até que os resultados de tensões conduzissem a respostas satisfatórias em termos de processamento numérico.

Nesta pesquisa foi proposta uma abordagem de modelos numéricos tridimensional. Os modelos foram avaliados a partir de consideração da não linearidade física do material.

Os corpos de prova foram discretizados em elementos do tipo sólido para que fosse possível a avaliação da plastificação da madeira para os carregamentos aplicados.

Nos itens seguintes estão apresentados os aspectos gerais da estratégia de modelagem desenvolvida, juntamente com os comentários mais relevantes.

#### 3.7.1 Elementos finitos utilizados

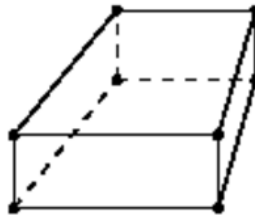
Os modelos numéricos desenvolvidos foram elaborados com base em elementos pré-definidos, disponibilizados na biblioteca do próprio ABAQUS. Os critérios de escolha utilizados para seleção de cada elemento finito, assim como suas características são apresentados a seguir.



### 3.7.1.1 Elemento tipo *Hex-Structured*

O elemento *Hex-Structured* é um elemento hexaédrico, contínuo, tridimensional, que possui oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade, ou seja, translações segundo os eixos x, y e z. O elemento é capaz de simular o comportamento com a não-linearidade física do material envolvido, o que permite avaliar as deformações plásticas no modelo. A Figura 3.9 apresenta uma representação do referido elemento.

Figura 3.9: Elemento *Hex-Structured*.

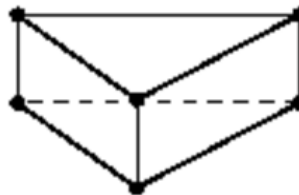


Fonte: Guia do usuário do ABAQUS 6.14.

### 3.7.1.2 Elemento tipo *Wedge - Sweep*

O elemento *Wedge - Sweep* é um elemento triangular prismático, contínuo, tridimensional, que possui seis nós, tendo cada nó três graus de liberdade. O elemento também é capaz de simular o comportamento com a não-linearidade física, o que permite avaliar as deformações plásticas no modelo. A Figura 3.10 apresenta uma representação do referido elemento.

Figura 3.10: Elemento *Wedge - Sweep*.



Fonte: Guia do usuário do ABAQUS 6.14.

## 3.7.2 Definição de malha

Os modelos de corpo de prova dos diversos ensaios estudados foram divididos em três diferentes regiões onde foram utilizados elementos finitos com configurações diferentes.

Na região de inserção do pino foram utilizados elementos do tipo *Hex - Structured* e dispostos de forma radial ao centro do cilindro de inserção do pino. Essa estratégia foi

admitida para distribuir de forma simétrica os elementos ao longo da região de contato. A partir deste ponto do texto, esta região será referida como região I.

Na região de contato com o aplicador de carga também foram utilizados elementos do tipo *Hex – Structured*, mas dispostos de forma ortogonal. Assim todos os elementos ficaram dispostos de maneira simétrica, com as mesmas dimensões e sujeitos às mesmas condições de carga. A partir deste ponto do texto, esta região será referida como região III.

Na região intermediárias entre as regiões I e III foram utilizados elementos do tipo *Wedge – Sweep*, para melhor acomodar a transição entre as referidas regiões e assim evitar que os elementos do mesmo tipo ficassem com dimensões muito diferentes uns dos outros ou com distorções de ângulos de quina maiores que 120 graus. Este tipo de elemento possibilita uma menor distorção de forma quando acomodado à geometrias complexas do que os demais tipos. Esta região será referida deste ponto em diante como região II.

Testes de possíveis malhas efetuados com diversos outros elementos disponíveis na biblioteca do ABAQUS não apresentaram configurações satisfatórias para acomodar com pouca distorção dos elementos, a diferença de arranjo das regiões I e II.

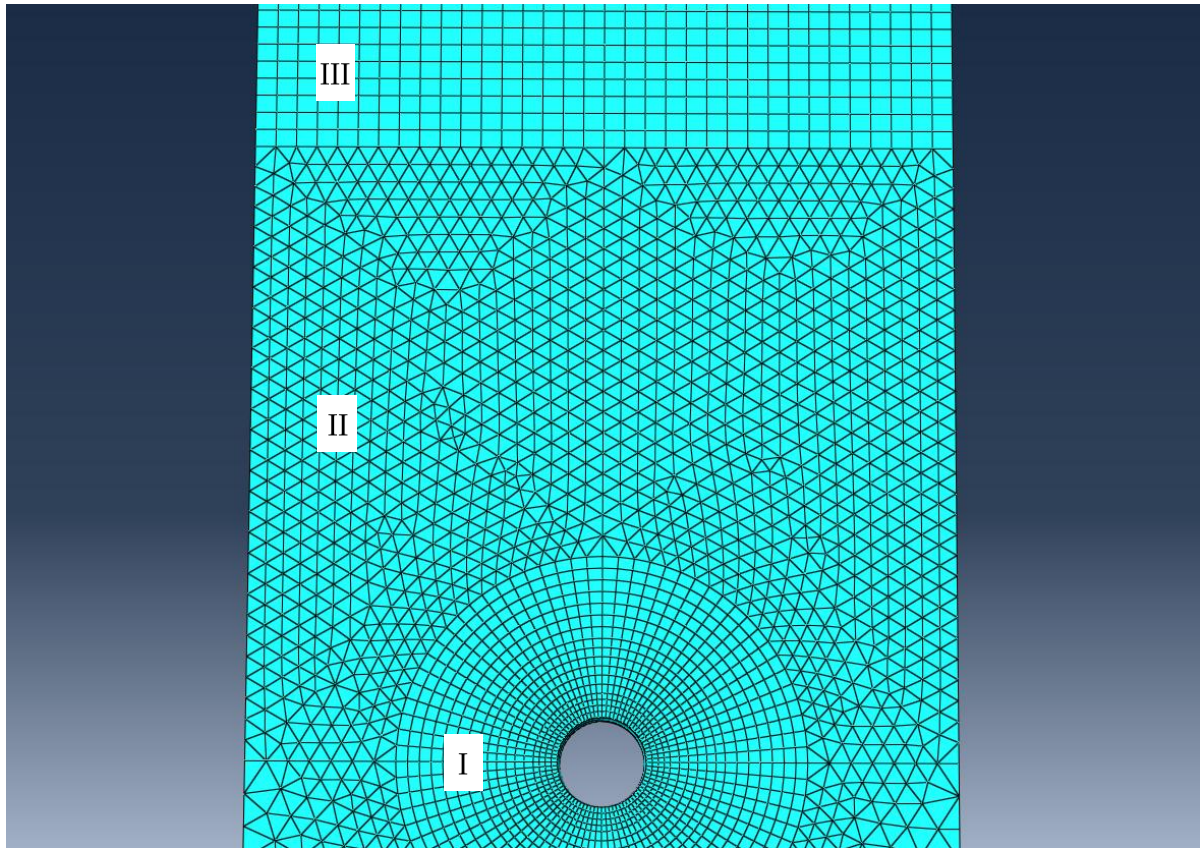
A união entre as diferentes regiões do modelo numérico foi efetuada a partir da consideração de nós comuns as duas regiões unidas. Essa estratégia visou evitar problemas de convergência do modelo durante o processamento computacional.

As malhas foram discretizadas primeiramente por tamanho médio de elemento, sendo considerada uma aresta média de 1,5 mm, e logo foram feitos ajustes em regiões específicas para ajustar a proporcionalidade entre as dimensões dos corpos e assim evitar alongamento ou achatamento dos elementos como na região I, nas proximidades do pino.

A malha foi gerada pelo próprio sistema de geração de malha do ABAQUS, de maneira automática e direta, respeitando-se os parâmetros previamente estabelecidos pelo usuário.

Na Figura 3.11 são apresentadas as regiões I, II e III. Na referida Figura é possível ver a diferença da disposição do mesmo tipo de elemento no caso das regiões I e III, como também a acomodação dos elementos na região II, além do refino de malha utilizado. O corpo de prova apresentado na Figura em questão está representado de maneira bidimensional somente denotando a face plana, normal ao eixo do pino, no entanto, trata-se de uma figura prismática tridimensional completa modelada no *software*. Planos paralelos ao representado mantem a exata mesma configuração de malha, de maneira coincidente nó a nó a este.

Figura 3.11: Discretização da malha dos modelos e tipos de elementos finitos nas diferentes regiões.



Fonte: O autor (2017).

### 3.7.3 Discretização de malha

A região I compreende um volume virtual do corpo de prova que consiste em um cilindro equicêntrico com o cilindro vazado de inserção do pino (furo) e que se estende com um diâmetro igual à metade da largura ( $b$ ) ou altura ( $h$ ) (o que for menor) do corpo de prova para cada norma. Este cilindro foi dividido radialmente na sua circunferência desde o seu centro até a sua largura total em 81 partes equiespaçadas para assim gerar 80 elementos por cada camada de iguais dimensões, ou 20 elementos iguais por quadrante.

O corpo de prova, na sua totalidade, foi dividido em 9 planos equiespaçados, normais ao eixo do pino, gerando na totalidade 8 blocos laminares paralelos e idênticos entre si como o apresentado de maneira bidimensional pela Figura 3.11. As divisões de largura das camadas foram feitas à maneira de manter as proporções dos elementos mais próximas do cubo equilátero.

O restante da malha, no caso as regiões II e III foram geradas automaticamente pelo *software* ABAQUS, respeitando-se os tipos diferentes de elemento e adotando-se a regra de

tamanho de 1,5 mm por aresta de elemento. O *software* tem uma estratégia de preenchimento de malha que leva em consideração este tamanho indicado pelo usuário para grande parte da malha, porém distorce este valor, gerando elementos de tamanho diverso, maiores ou menores, para garantir o total preenchimento da região de interesse do corpo de prova. Isto não confere nenhum problema, já que os maiores e menores elementos são de tamanhos aproximados, gerando distorções nos resultados que são desprezíveis.

A Tabela 3.2 apresenta a quantidade de elementos gerados por corpo de prova de cada norma.

Tabela 3.2: Número de elementos finitos gerados na malha por configuração de corpo de prova

Norma	Numero de elementos gerados
Brasileira (Normal e paralela)	86.752
Americana (Normal e paralela)	34.256
Europeia Normal	101.024
Europeia Paralela	34.720

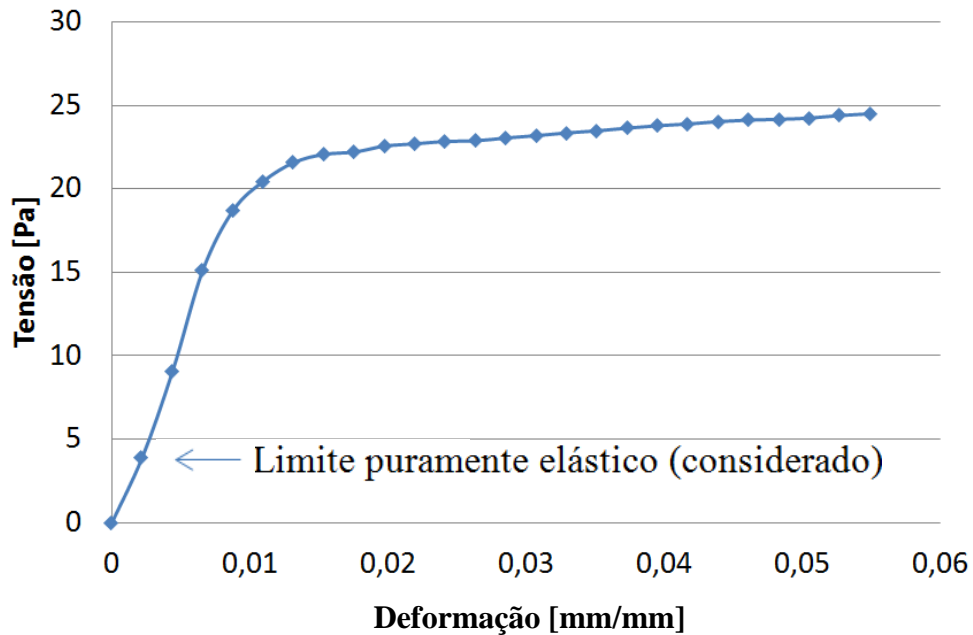
Fonte: O autor (2017).

### 3.7.4 Propriedades dos materiais utilizados

Para a modelagem dos corpos de prova foi considerada a utilização da madeira como material ortotrópico, isto é um material com diferentes propriedades físicas para cada uma das três direções ortogonais principais da madeira (longitudinal, transversal e radial), sendo a direção longitudinal às fibras tomada sempre como a direção principal, no caso do sistema de coordenadas do ABAQUS, e corresponde à direção y. Esta abordagem foi escolhida tomando-se por base a experiência de Molina (2008).

O modelo utilizado para representar o comportamento da madeira foi o modelo elasto-plástico, o qual é caracterizado por uma região de comportamento puramente elástico com o restante do comportamento em regime elasto-plástico, tendendo a puramente plástico para tensões últimas no material. O comportamento elástico do material foi modelado com base nos parâmetros ortotrópico utilizados por Molina (2008) e o comportamento elasto-plástico foi determinado com base nas configurações do ABAQUS mediante tabela de pontos experimentais de corpos de prova ensaiados com comportamento próximo do teórico ideal para a madeira, como apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12: Comportamento elasto-plástico adotado para a madeira.



Fonte: O Autor (2017).

No total para caracterizar o comportamento mecânico da madeira foram utilizados 9 parâmetros (Propriedades características de resistência mecânica) para descrever o regime puramente elástico e uma tabela de pontos (Tabela 3.4) com duas variáveis (Tensão e deformação) em pares de pontos para o comportamento elasto-plástico nas direções paralela e normal (22 e 25 pares de pontos respectivamente). Todos os parâmetros utilizados são apresentados a seguir.

#### 3.7.4.1 Propriedades elásticas da madeira.

$E_x$ ;  $E_y$ ;  $E_z$ : módulos de elasticidades na direção tangencial, direção das fibras da madeira e direção radial, respectivamente;

$\nu_{xy}$ ;  $\nu_{yz}$ ;  $\nu_{xz}$ : coeficientes de Poisson nos planos  $xy$ ,  $yz$  e  $xz$ , respectivamente;

$G_{xy}$ ;  $G_{yz}$ ;  $G_{xz}$ : módulos de elasticidade transversais nos planos  $xy$ ,  $yz$  e  $xz$ , respectivamente.

Tabela 3.3: Propriedades elásticas da madeira.

Parâmetro	Valor	Unidade
$E_x$	204	MPa
$E_y$	2042	MPa
$E_z$	204	MPa

Tabela 3.3: Propriedades elásticas da madeira. (Continuação)

Parâmetro	Valor	Unidade
$v_{xy}$	0,013	Adim
$v_{yz}$	0,23	Adim
$v_{xz}$	0,013	Adim
$G_{xy}$	102	MPa
$G_{yz}$	102	MPa
$G_{xz}$	102	MPa

Fonte: O autor (2017).

### 3.7.4.2 Propriedades plásticas da madeira.

Tabela 3.4: Propriedades plásticas da madeira.

Direção paralela às fibras		Direção normal às fibras	
Tensão de escoamento [MPa]	Deformação plástica [adim]	Tensão de escoamento [MPa]	Deformação plástica [adim]
3,904481404	0	7,387054	0
9,066297066	0,002197802	18,54282	0,00597
15,14206514	0,004395604	22,62409	0,029851
18,71794872	0,006593407	24,51669	0,035821
20,46777547	0,008791209	25,7254	0,041791
21,58350658	0,010989011	26,73788	0,047761
22,06860707	0,013186813	27,50769	0,053731
22,20836221	0,015384615	28,31582	0,059701
22,56756757	0,017582418	28,94398	0,065672
22,7003927	0,01978022	29,22612	0,071642
22,84130284	0,021978022	30,23861	0,077612
23,05266805	0,026373626	31,79332	0,089552
23,19242319	0,028571429	32,61771	0,095522
23,35643336	0,030769231	33,29347	0,101493
23,48117348	0,032967033	34,10972	0,107463
23,64518365	0,035164835	34,87837	0,113433
23,78609379	0,037362637	36,03251	0,119403
23,88773389	0,03956044	37,24122	0,125373
24,03557404	0,041758242	38,42671	0,131343
24,12219912	0,043956044	39,80029	0,137313
24,16839917	0,046153846	41,00203	0,143284
24,24693925	0,048351648		
24,39477939	0,050549451		
24,5045045	0,052747253		

Fonte: O Autor (2017).

### 3.7.4.3 Relações admitidas entre as propriedades elásticas da madeira.

$$\begin{aligned} E_y &= E_z = (E_y/10); \\ G &= G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = (E_y/20); \\ \nu_{xz} &= 0,23; \quad \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0,013. \end{aligned}$$

### 3.7.5 Condições de contorno e aplicação de carregamento

As condições de contorno e a aplicação de carregamentos foram adotadas de tal maneira a reproduzir as condições dos ensaios experimentais, para entender o comportamento das tensões internas geradas durante o ensaio. Portanto, ao invés de se utilizar como entrada a aplicação de uma carga fixa, optou-se pela aplicação progressiva de deslocamento nas mesmas proporções do ensaio experimental, programadas na máquina para o avanço absoluto de até 7,0 mm até a parada do ensaio. No *software* após o ensaio virtual do modelo é possível ver os resultados da distribuição de tensão para cada passo de incremento de deslocamento aplicado, então, cada um dos resultados gráficos e numéricos apresentados na seção 4.4 deste trabalho mostram as distribuições de tensão finais para a condição de parada estabelecida pela norma correspondente ao ensaio.

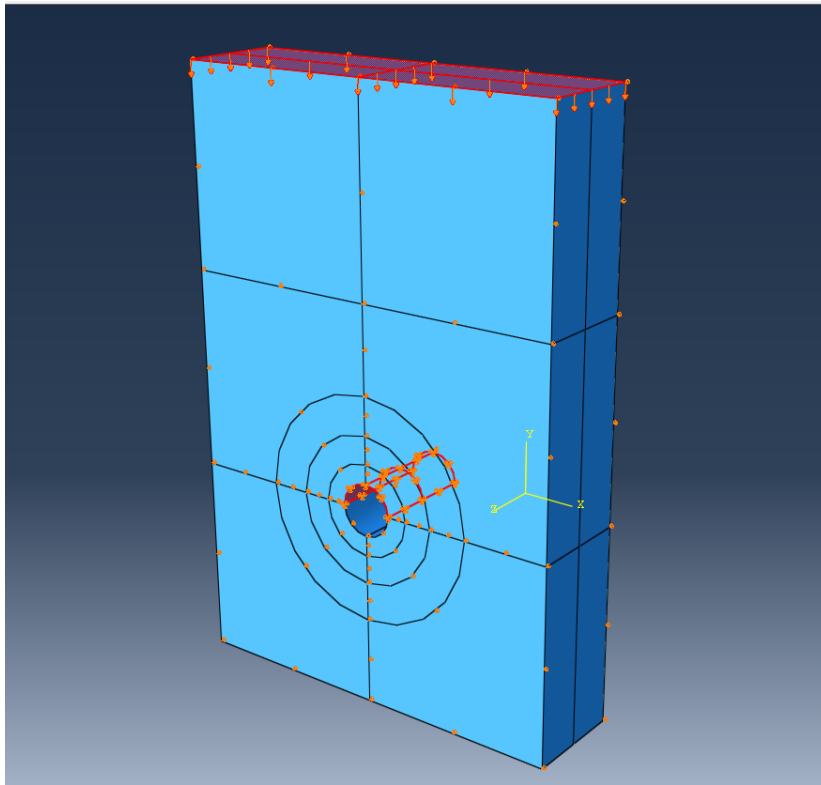
A rotina do programa de elementos finitos foi dividida em 10 ciclos para todos os casos estudados, com o carregamento sendo aplicado uniforme e incrementalmente com os critérios de convergência dos modelos sendo verificados ciclo a ciclo pelo *software*.

Para simplificar o modelo e evitar ter interação de dois elementos o pino foi considerado completamente rígido. Esta estratégia foi adotada visto que a rigidez do pino (superior em 10 vezes) e a sua tensão de escoamento (superior em 25 vezes) supera em muito a da madeira e que, portanto, sua contribuição na deformação plástica do conjunto é mínima. O pino metálico utilizado (prego) tem tensão de escoamento de aproximadamente 600 MPa. Para tal foi adicionada uma restrição de deslocamento na direção da aplicação da carga (direção  $y$ ) na superfície de contato com o pino, ou a área resistiva do corpo de prova. O pino poderia ser modelado tendo interação de deformação elástica em conjunto com o corpo de prova, sem que isto resulte em grandes ganhos em questões de resultados e significando um gasto e esforço computacional muito maior, acrescido da demora de processamento e problemas de convergência decorrentes da alta deformação do material do corpo de prova nas regiões da proximidade do pino e principalmente na interface de contato em contraste com a quase nula deformação do corpo do pino.

Modelagens considerando dois materiais diferentes, ou mais, e a interação entre eles são indicados para situações onde existem deformações próximas entre os materiais dos elementos.

Como a configuração do suporte do pino no ensaio experimental gera uma restrição de deslocamento nas faces do corpo de prova (*vide* Figura 3.2 (c)) foi adicionada a mesma condição de restrição ao modelo (restrição de deslocamento em z nas faces dos planos xy). A Figura 3.13 apresenta as condições de contorno, mostrando a superfície de aplicação de carga, a superfície de restrição do pino, e as superfícies frontais, além do eixo de coordenadas utilizado.

Figura 3.13: Superfícies de aplicação de carga e de atribuição de condições de contorno.



Fonte: O Autor (2017).

A imagem apresenta somente um corpo de prova da norma brasileira, no entanto condições de contorno análogas foram utilizadas para os demais modelos de corpo de prova das normas estudadas.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a resistência da madeira ao embutimento tanto por meio experimental como analítico aplicando os procedimentos recomendados pelas três normas estudadas. Também são apresentados os resultados dos parâmetros físicos e de resistência necessários aos cálculos analíticos da resistência ao embutimento. É também apresentado um estudo comparativo entre os resultados obtidos através das normas e dos métodos de regressão. Por fim são apresentados os resultados das análises de tensões dos modelos numéricos.

### 4.1 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO POR MEIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste item são apresentados os resultados obtidos para a resistência ao embutimento a partir dos ensaios experimentais. Apresenta-se ainda a análise dos valores de resistência de todos os ensaios realizados por meio do estudo das variáveis de resistência definidas. Também é apresentado no final deste item um estudo comparativo para analisar a qualidade destas variáveis.

A Tabela 4.1 apresenta a média dos resultados experimentais dos ensaios de embutimento para cada tratamento. A referida tabela contém o par ordenado de força de embutimento ( $F_e$ ) e o deslocamento associado ( $\delta$ ) resultantes da aplicação dos métodos de ensaio, assim como os valores calculados de: resistência experimental ao embutimento ( $f_e$ ), resistência experimental ao embutimento corrigida para a umidade de 12 % ( $f_{e,12}$ ) e resistência específica ao embutimento ( $f_{e,\rho}$ ), corrigida pela densidade.

Tabela 4.1: Média dos resultados experimentais do ensaio de embutimento por tratamento.

Tratamento: Norma-Direção-Espécie	$F_e$ [N]	$\delta$ [mm]	$f_e$ [MPa]	$f_{e,12}$ [MPa]	$f_{e,\rho}$ [MPa.m <sup>3</sup> /Kg]
ANE	1.262,86	0,91	14,85	14,73	29,77
ANP	1.807,02	1,16	21,15	20,67	42,79
APE	1.787,40	1,18	21,06	20,94	46,01
APP	2.370,12	1,10	28,25	29,35	57,95
BNE	1.994,80	0,69	24,15	24,00	43,05
BNP	1.430,51	0,94	16,69	16,74	38,41
BPE	2.256,33	0,74	27,21	27,62	49,34
BPP	1.826,94	0,64	21,14	21,62	45,16
ENE	3.083,10	4,97	35,69	37,15	75,29

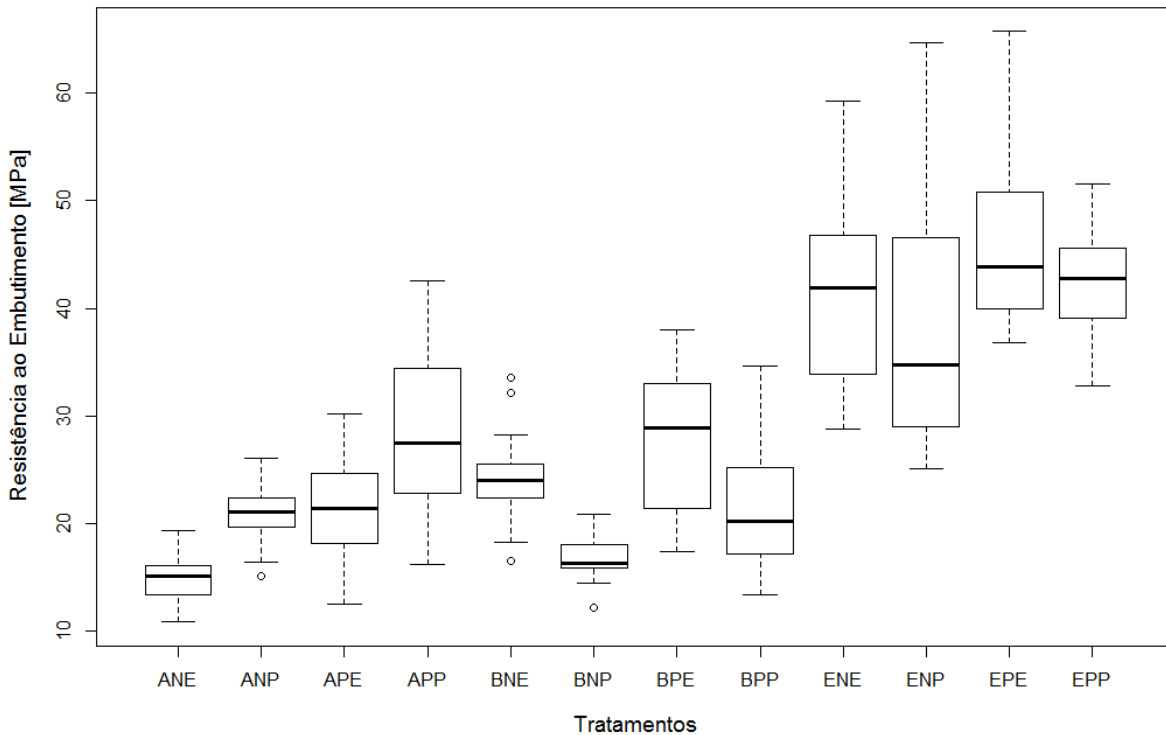
Tabela 4.1: Média dos resultados experimentais do ensaio de embutimento por tratamento. (Continuação).

Tratamento: Norma-Direção-Espécie	$F_e$ [N]	$\delta$ [mm]	$f_e$ [MPa]	$f_{e,12}$ [MPa]	$f_{e,\rho}$ [MPa.m <sup>3</sup> /Kg]
ENP	3.947,88	4,98	37,80	38,64	74,67
EPE	3.581,80	4,58	43,68	44,68	88,68
EPP	4.407,47	3,20	42,36	43,10	78,10

Fonte: O Autor (2017).

A Figura 4.1 apresenta o *boxplot* da resistência ao embutimento ( $f_e$ ) para cada tratamento.

Figura 4.1: *Boxplot* da resistência ao embutimento ( $f_e$ ) por tratamento.



Fonte: O Autor (2017).

Na Figura 4.1 é possível observar que existiu uma proximidade entre as medianas dos valores de resistência obtidos mediante a norma brasileira e a norma americana. Isto pode ser explicado com base no fato de que as duas normas propõe métodos de determinação do ponto de resistência similares (*vide* Figura 2.7 e Figura 2.2), o que resulta na obtenção de valores de resistência semelhantes, mesmo apesar da diferença de geometria dos corpos de prova e dos ciclos de carga aplicados em cada caso.

Também conforme a Figura 4.1, pode-se notar que a mediana da resistência para todos os casos foi maior para a norma europeia. Efeito notadamente proveniente do fato da norma europeia permitir maiores deslocamentos absolutos, correspondendo conseqüentemente a maiores forças resultantes. Apesar de apresentar os maiores valores, tal norma apresentou grande variação dos valores de resistência, produzindo resultados que requerem um maior número de ensaios para serem representativos, quando comparados às demais normas.

Na Figura 4.1 verificou-se que as normas americana e brasileira quando associadas à orientação normal apresentaram as menores dispersões para a resistência ao embutimento. Isto pode ser explicado com base na a região resistiva dos corpos de prova (região entre o pino e o aplicador de carga) que foi mais uniforme na direção normal do que na direção paralela. Uma causa provável deste resultado pode ser devido a que o material resistente ao embutimento na direção normal pode contemplar várias camadas de crescimento da árvore na espessura (t) do corpo de prova, enquanto que na direção paralela o material resistente pode ser formado por somente uma ou umas poucas camadas de crescimento. Assim, a partir de uma mesma prancha podem ser cortados na direção paralela, mesmo lado a lado, corpos de prova compostos por diferentes camadas de crescimento, sendo que este efeito é minimizado no caso da direção normal.

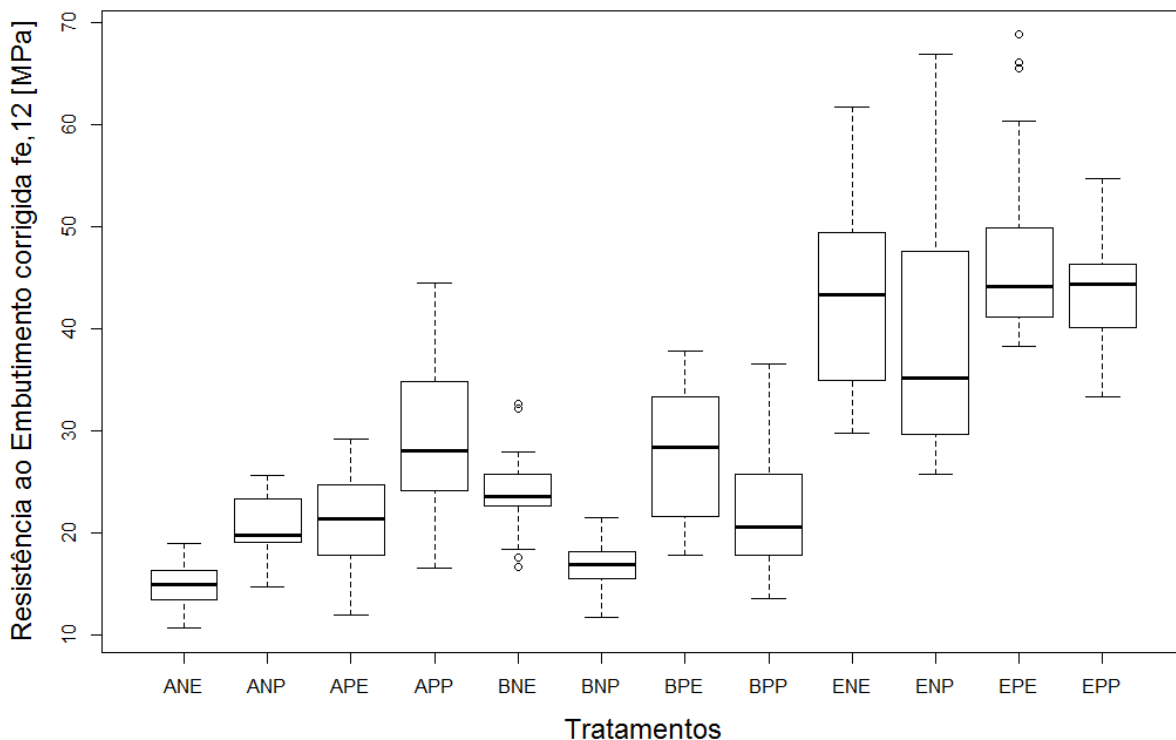
Este efeito de pouca dispersão dos resultados associado à direção normal não foi verificado na norma europeia. Isto pode ser causado devido ao fato de que a região resistiva do corpo de prova (entre o pino e o aplicador de carga) da norma europeia na direção normal às fibras considerou uma menor dimensão do que nas demais normas (até 70 % menor; europeia 32,5 mm; americana 50 mm; brasileira 91 mm) e, portanto, foi composto por muito menos material e eventual menor quantidade de camadas de crescimento, o que pode ter contribuído para a maior dispersão de dados pelo efeito já acima explicado. O contrário se verificou para o caso da norma brasileira, que teve a maior região resistiva e a menor dispersão de dados.

Outra provável causa deste efeito pode ser devido à que o método de determinação do ponto de resistência ao embutimento pela norma europeia considera como valor de resistência um ponto da curva no final do regime plástico, enquanto que as normas brasileira e americana obtiveram este valor ainda no meio ou final do regime elástico, começo do plástico, *vide* Figuras 3.4 (a), (b) e (c). O coeficiente de elasticidade (coeficiente angular da reta do regime elástico) é um parâmetro característico do comportamento mecânico dos materiais, inclusive da madeira, que tende a ser homogêneo e variar pouco de acordo com a região ou os pontos onde é medido. No entanto, pode não ser o caso dos parâmetros que regem o comportamento

plástico da madeira, que podem sofrer influência de acordo com o lugar onde são medidos ou mesmo com a posição do corpo de prova dentro da tora de madeira. Como a norma europeia baseia a obtenção do resultado no regime plástico e as demais normas no regime elástico isto pode estar associado à obtenção de resultados mais dispersos.

A norma brasileira padroniza que os valores de resistência sejam corrigidos pela umidade dos corpos de prova segundo a Fórmula 3.3. A Figura 4.2 apresenta o *boxplot* da resistência ao embutimento corrigida para a umidade de 12 % ( $f_{e,12}$ ) para cada tratamento. Os valores das demais normas também foram corrigidos pela umidade para efeito comparativo.

Figura 4.2: *Boxplot* da resistência ao embutimento corrigida para a umidade de 12 % ( $f_{e,12}$ ) por tratamento.

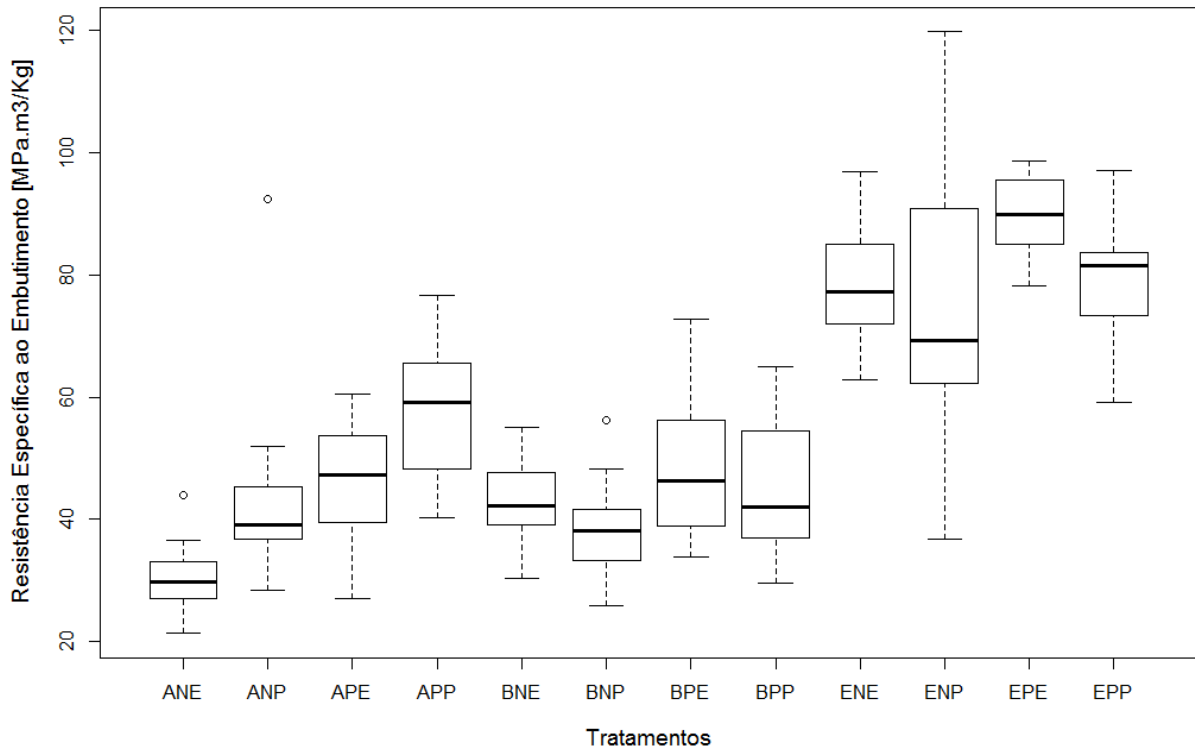


Fonte: O Autor (2017).

Apesar de a norma brasileira indicar que a correção da umidade sobre a resistência seja para padronizar os valores, o que se verifica é uma piora na distribuição de alguns tratamentos, como ANP, BNE e EPP, somente corrigindo de maneira ténue a distribuição no caso do BNP. Além disso, aumentam os *outliers* ou pontos com valores discrepantes ou atípicos que não são explicados pela distribuição normal que passam de 5 na  $f_e$  para 7 na  $f_{e,12}$ .

Nesta pesquisa foi introduzido o conceito de resistência específica ao embutimento ( $f_{e,p}$ ), definida segundo a Fórmula 3.2 que será analisada daqui em diante. A Figura 4.3 apresenta o *boxplot* desta modalidade de resistência para cada tratamento.

Figura 4.3: *Boxplot* da resistência ao embutimento corrigida pela densidade ( $f_{e,p}$ ) por tratamento.



Fonte: O Autor (2017).

A obtenção da resistência específica ( $f_{e,p}$ ) (corrigida pela densidade) apresentou maior homogeneidade de variâncias nos diferentes tratamentos (Figura 4.3) e uma melhoria na distribuição dos resultados com efeito acentuado para a norma europeia, com exceção do tratamento ENP que teve sua variância aumentada. Como a densidade da madeira passa a ser considerada, neste caso, os valores de resistências para espécies com densidades distintas tenderam a se aproximar. A norma europeia continuou apresentando os maiores valores medianos para a resistência. Contudo, tais valores tendem a se tornarem mais confiáveis devido a uma redução sensível na dispersão.

A correção da resistência pela densidade ofereceu também um efeito positivo sobre a quantidade de *outliers*, que passaram de 5 e 7 no caso da  $f_e$  e  $f_{e,12}$ , respectivamente, para somente 3 no caso da  $f_{e,p}$ .

Estes efeitos observados podem sugerir que a correção pela densidade tenha um efeito benéfico na distribuição dos resultados de resistência. No caso desta pesquisa foi definida a resistência específica tomando-se por base a resistência corrigida pela umidade. Os valores e suas distribuições seriam diferentes se fosse tomado por base a resistência sem correção.

Nas seções 4.1.1 a 4.1.3 a seguir são apresentados estudos das modalidades de resistência pelo método da análise de variâncias, assumindo-se as considerações da seção 3.6.

#### 4.1.1 Análise de variância para resistência ao embutimento ( $f_e$ )

Verificou-se que o coeficiente de determinação para o modelo linear ajustado foi de 0,7979, o que significa que os fatores experimentais explicaram 79,8% da variação observada na resposta resistência original. Já o coeficiente de variação do experimento foi de 22,30%.

Tabela 4.2: Análise de variância para a resistência ao embutimento ( $f_e$ ).

	GDL	SQ	SQM	Teste F	P-valor
Madeira	1	1,1	1,1	1,117	0,2929
Norma	2	709,0	354,5	354,519	<2E-16 ***
Orientação	1	66,0	66,0	66,031	3,46E-14 ***
Madeira : Norma	2	123,1	61,6	61,573	<2E-16 ***
Madeira : Orientação	1	0,0	0,0	0,004	0,9470
Norma : Orientação	2	3,5	1,7	1,734	0,1790
Madeira : Norma : Orientação	2	0,2	0,1	0,109	0,8970
Residuais	215	215,0	1,0		

\*\*\* < 0,001.

Fonte: O Autor (2017).

Pela ANOVA foram verificados o efeito principal da orientação das fibras da madeira, o efeito principal da norma e a interação entre madeira e norma como sendo significativos ao nível de 5%, por meio do teste F. Outros efeitos principais e interações não foram relevantes.

Tabela 4.3: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento ( $f_e$ ).

Norma	Madeira*	
	Pinus	Eucalipto
Americana	24,78±0,98 a	17,95±0,84 a
Brasileira	19,01±0,69 b	25,68±0,97 b
Europeia	40,80±1,36 c	44,18±1,67 c

\*Letras diferentes nas colunas indicam médias estatisticamente distintas pelo teste de Games-Howell a 5% de significância.

Fonte: O Autor (2017).

A análise de resistência ao embutimento ( $f_e$ ) deve considerar também o desdobramento da interação madeira - norma, o que é apresentado na Tabela 4.3.

De acordo com a Tabela 4.3 as normas diferiram significativamente quanto à resistência média, tanto no pinus quanto no eucalipto (Games-Howell,  $p < 0,001$ ). A norma europeia apresentou valores de resistência maiores do que os obtidos com as normas brasileira e americana, sendo, portanto a menos conservadora.

A interação entre os fatores experimentais norma e madeira ocorreu devido ao fato de que a norma americana apresentou média de resistência inferior à brasileira no caso da madeira de eucalipto, enquanto que na madeira de pinus o seu resultado foi superior. Pelas configurações experimentais das normativas, era esperado que os resultados dos ensaios da norma americana fossem sempre maiores que os da norma brasileira para a mesma madeira.

A interação entre norma e madeira, em tese, não deveria existir. A heterogeneidade natural ao longo das pranchas de madeira de onde foram extraídos os corpos de prova pode ter contribuído para as diferenças observadas. Provavelmente o material usado para testar a norma americana com eucalipto era de pior qualidade que os demais, gerando distorções nos resultados. Os corpos de prova para ensaiar diferentes normas foram retirados em blocos de partes diferentes das pranchas de madeira por questões técnicas.

#### 4.1.2 Análise de variância para resistência ao embutimento corrigida pela umidade

( $f_{e,12}$ )

O coeficiente de determinação do modelo linear ajustado foi de 0,7439, o que significa que 74,39% da variação observada na resposta da resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ) foram explicados pelos fatores experimentais. O coeficiente de variação do experimento foi de 11,83%.

Tabela 4.4: Análise de variância para a resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ).

	GDL	SQ	SQM	Teste F	P-valor
Madeira	1	4,2	4,2	4,218	0,0412 *
Norma	2	705,9	352,9	352,943	< 2E-16 ***
Orientação	1	67,4	67,4	67,384	2,05E-14 ***
Madeira : Norma	2	117,1	58,5	58,540	< 2E-16 ***
Madeira : Orientação	1	0,2	0,2	0,243	0,6226
Norma : Orientação	2	4,3	2,1	2,133	0,1210
Madeira : Norma : Orientação	2	0,4	0,2	0,216	0,8056
Residuais	215	215,0	1,0		

\* < 0,05; \*\*\* < 0,001.

Por meio da Tabela 4.4 da ANOVA, pode-se observar que efeito principal de orientação e a interação madeira - norma foram significativos ao nível de 5%. Para cada tipo de madeira, os pares de normas diferiram entre si quanto à resistência corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ). A interação foi identificada pelo fato da resistência  $f_{e,12}$  ser menor para a norma americana do que para a brasileira no que se refere à madeira de eucalipto, enquanto que no pinus observou-se o inverso. Note-se que esta interação permaneceu proveniente da resistência  $f_e$  mesmo após a correção pela umidade, notando-se que a causa do desvio não esteve relacionada aos fatores que envolveram a umidade.

Tabela 4.5: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ).

Norma	Madeira*	
	Pinus	Eucalipto
Americana	25,11±1,09 a	17,84±0,84 a
Brasileira	19,28±0,74 b	25,81±0,98 b
Europeia	41,57±1,40 c	45,76±1,76 c

\*Letras diferentes nas colunas indicam médias estatisticamente distintas pelo teste de Games-Howell a 5% de significância.

Fonte: O Autor (2017).

#### 4.1.3 Análise de variância para resistência ao embutimento específica ( $f_{e,\rho}$ )

O modelo linear ajustado apresentou coeficiente de determinação igual a 0,815, ou seja, os fatores experimentais explicaram 81,5% da variabilidade na medida de resistência específica. O coeficiente de variação do experimento foi de 18,10%.

Tabela 4.6: Análise de variância para a resistência ao embutimento específica ( $f_{e,\rho}$ ).

	GDL	SQ	SQM	Teste F	P-valor
Madeira	1	7,4	7,4	7,412	0,00701 **
Norma	2	1197,5	598,7	598,731	<2E-16 ***
Orientação	1	86,3	86,3	86,322	<2E-16 ***
Madeira : Norma	2	75,5	37,7	37,729	9,03E-15 ***
Madeira : Orientação	1	1,0	1,0	1,046	0,30760
Norma : Orientação	2	8,2	4,1	4,090	0,01806 *
Madeira : Norma : Orientação	2	1,2	0,6	0,580	0,56105
Residuais	215	215,0	1,0		

\* < 0,05; \*\* < 0,01; \*\*\* < 0,001.

Fonte: O Autor (2017).

As interações madeira - norma e norma - orientação das fibras mostraram significativas ao nível de 5%, por meio do teste F da ANOVA. Como há interações



significativas envolvendo todos os fatores estudados, os efeitos principais não possuem qualquer significado prático, o que significa que devem ser efetuados desdobramentos das interações para avaliar os efeitos simples dos fatores experimentais.

Tabela 4.7: Interação madeira - norma para resistência ao embutimento específica ( $f_{e,p}$ ).

Norma	Madeira*	
	Pinus	Eucalipto
Americana	49,55±1,93 a	37,89±1,96 a
Brasileira	41,76±1,44 b	46,20±1,75 b
Europeia	76,92±2,46 c	83,75±1,73 c

\*Letras diferentes nas colunas indicam médias estatisticamente distintas pelo teste de Games-Howell a 5% de significância.

Fonte: O Autor (2017).

A partir do desdobramento entre a interação madeira - norma (Tabela 4.7) observou-se que todos os métodos diferiram entre si quanto à resistência específica, tanto na madeira de pinus quanto na de eucalipto. Nas duas situações, a norma europeia apresentou maiores resultados. A interação justificou-se pelo fato da norma americana apresentar menor resistência na madeira de eucalipto quando comparada ao pinus, enquanto que para as demais normas se verifica o contrário. Por meio deste estudo pode-se perceber que a causa desta interação tem raiz na resistência  $f_e$ , e não nos fatores derivados da densidade  $e$ , por tanto, não foi alterada ou corrigida pela introdução deste fator.

Quanto à interação orientação - norma (Tabela 4.8) pode ser observado que na orientação paralela não houvera diferenças dos resultados sobre resistência específica entre a norma americana e brasileira, sendo esta última maior que a primeira. Em tese esta interação não deveria existir, como se apresenta somente para a  $f_{e,p}$  e não para as demais modalidades de resistência, conclui-se que foi introduzida após a correção da resistência pela densidade.

Tabela 4.8: Interação norma – orientação das fibras para resistência ao embutimento corrigida pela umidade ( $f_{e,12}$ ).

Norma	Orientação*	
	Normal	Paralelo
Americana	35,47±1,30 a	52,75±1,90 a
Brasileira	40,22±1,16 b	46,89±1,79 a
Europeia	76,99±2,79 c	82,99±1,59 b

\*Letras diferentes nas colunas indicam médias estatisticamente distintas pelo teste de Games-Howell a 5% de significância.

Fonte: O Autor (2017).

#### 4.1.4 Correlações e comparação entre $f_e$ , $f_{e,12}$ e $f_{e,\rho}$

A Figura 4.4 apresenta de maneira gráfica as correlações entre os resultados de todas as modalidades de resistência estudadas, isto é,  $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ . Os valores correspondentes das correlações podem ser encontrados na Tabela 4.9.

Como pode ser visto através das correlações do teste T pareado, o cálculo da resistência  $f_{e,12}$  difere pouco dos valores da  $f_e$ , o que é esperado pois todos os corpos de prova possuíam no momento do ensaio umidades bem próximas, devido a um planejamento de tempo e condições de manuseio visando climatização bem sucedidos.

As correlações entre a  $f_e$  e a  $f_{e,\rho}$  mostram que a correção pela densidade teve um efeito acentuado sobre os valores de resistência originais, denotando que não todos os corpos de prova tinham a mesma densidade, mesmo provindo da mesma tora de madeira, o que é respaldado pela teoria. A densidade variou em média 14% para eucalipto e 13% para o pinus.

Figura 4.4: Gráfico de correlações entre  $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ .

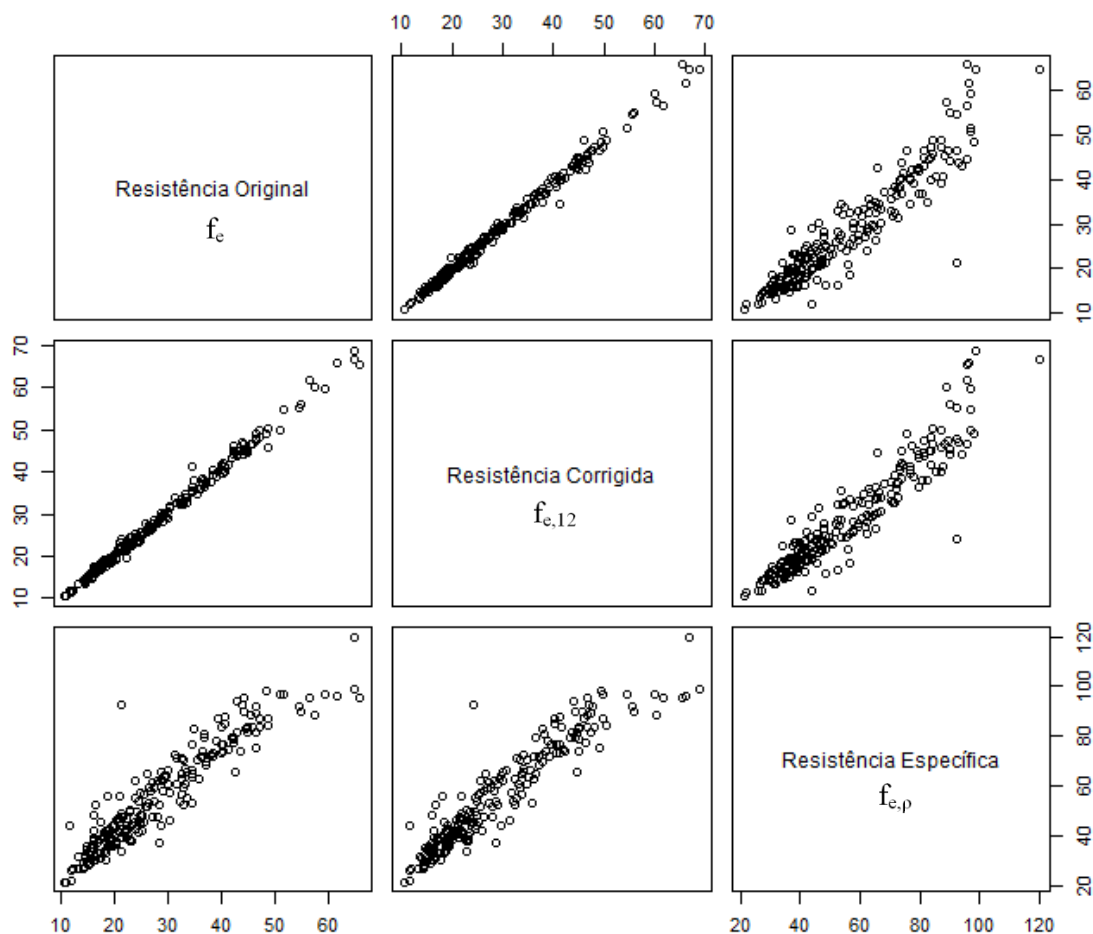


Tabela 4.9: Valores de correlação entre  $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,p}$ .

	$f_e$	$f_{e,12}$	$f_{e,p}$
$f_e$	1	0,9966622	0,9366438
$f_{e,12}$	0,9966622	1	0,9394895
$f_{e,p}$	0,9366438	0,9394895	1

Fonte: O Autor (2017).

Na Tabela 4.10 abaixo são apresentados os coeficientes de variação (CV) das respostas de resistência para cada tratamento estudado. Como as modalidades de resistência são variáveis distintas entre si e tem unidades de medida diferentes, é necessária a utilização do CV como base para comparação. O método que apresenta menor CV para a maioria dos tratamentos apresenta também menor erro relativo e, portanto, é a medida de resistência mais confiável.

Tabela 4.10: Coeficiente de variação de modalidades de resistência por tratamento, com classificação de *score* de valores pra cada tratamento mediante código de cores.

Tratamento	Coeficiente de variação [%]		
	$f_e$	$f_{e,12}$	$f_{e,p}$
ANE	16,38%	16,77%	19,03%
ANP	12,80%	13,79%	30,12%
APE	23,04%	22,71%	21,33%
APP	24,90%	25,56%	18,51%
BNE	18,53%	18,13%	15,92%
BNP	11,49%	13,02%	17,73%
BPE	23,55%	23,40%	24,57%
BPP	25,88%	26,38%	24,09%
ENE	17,33%	18,30%	9,85%
ENP	30,67%	31,05%	29,35%
EPE	16,55%	15,34%	6,53%
EPP	12,00%	12,00%	11,72%

Legenda: Maior valor    Valor intermediário    Menor valor

Fonte: O autor (2017).

Para 67% dos tratamentos a modalidade de resistência  $f_{e,p}$  mostrou valores com a menor dispersão do grupo. Seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ), nas ANOVAs, de 81,5% também é o maior de todos (contra 79,80% para  $f_e$  e 74,39% para  $f_{e,12}$ ), mostrando que a variável  $f_{e,p}$  consegue explicar melhor os resultados que as demais. Por estas considerações, dentre as modalidades de resistência, a  $f_{e,p}$  possui a melhor qualidade em termos de dispersão

de dados. No que diz respeito à confiabilidade (maior homogeneidade de menores valores) também foi a modalidade com melhor resultado, porém existiram valores discrepantes a esta tendência geral, no caso do tratamento ANP pode se perceber que o CV apresentou resultado com discrepância maior que 100% comparado aos CV's das demais modalidades. Para os demais casos (BNP e BPE) a discrepância não foi tão significativa.

Dentro do grupo existiram tratamentos que tiveram suas dispersões resumidas por meio de CV's fortemente reduzidas, como o caso do APP, ENE e EPE. Para os demais valores o efeito de correção da dispersão pela densidade existiu sim, mas não foi tão significativo.

O segundo lugar no *score* de qualidade foi ocupado pela modalidade de resistência  $f_e$ , pois apesar de não ter uma confiabilidade elevada (pela heterogeneidade entre posições dos tratamentos nos diferentes *scores*) apresentou média de CV's e maior homogeneidade que a  $f_{e,12}$ . Em outras palavras, a correção pela umidade proposta pela norma brasileira talvez tenha prejudicado a qualidade dos dados introduzindo, de alguma forma, erros relativos. Esta conclusão é reforçada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada variável (79,80% para  $f_e$  e 74,39% para  $f_{e,12}$ ) apresentado nos itens 4.1.1 e 4.1.2 deste trabalho.

Por meio destas análises foi possível perceber que a expressão de valores de resistência ao embutimento por meio de correção pela densidade de cada corpo de prova, denominada nesta pesquisa de 'resistência específica ao embutimento -  $f_{e,\rho}$ ', pode ser uma alternativa de padronização interessante para tabelar dados de resistência nas normativas, podendo assim melhorar a qualidade dos dados.

Corrigindo a dispersão devida à diferença de densidade de cada corpo de prova possibilita-se que pesquisadores e usuários das normas cometam menos erros ao utilizarem valores de resistência específica do que valores de resistência sem correção.

#### 4.2 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO POR MEIO DE CÁLCULO ANALÍTICO

A Tabela 4.11 apresenta os valores dos parâmetros utilizados no cálculo da resistência analítica para cada tratamento.

Tabela 4.11: Valores dos parâmetros utilizados para cálculo da resistência analítica por tratamento.

Tratamento	$f_{c0}$ [MPa]	$\alpha_e$ [adim]	d [mm]	$\rho_k$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$k_{90}$ [adim]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
ANE	-	-	-	-	-	538,49
ANP	-	-	-	-	-	511,63
APE	-	-	6,50	-	-	538,49
APP	-	-	6,50	-	-	511,63
BNE	61,60	2,45	-	-	-	-
BNP	35,62	2,45	-	-	-	-
BPE	61,60	-	-	-	-	-
BPP	35,62	-	-	-	-	-
ENE	-	-	6,50	538,50	1,00	-
ENP	-	-	6,50	511,63	1,45	-
EPE	-	-	6,50	538,50	-	-
EPP	-	-	6,50	511,63	-	-

Fonte: O autor (2017).

A Tabela 4.12 apresenta os valores analíticos de resistência ao embutimento calculadas para cada tratamento ( $f_e$  analítico), contrastados comparativamente com os valores de resistência ao embutimento sem correção  $f_e$ . O valor discrepância foi calculado como sendo a diferença percentual entre o valor analítico e experimental (sem correções) tomando-se como base o valor experimental, *vide* Fórmula 3.9.

Tabela 4.12: Resultados da resistência ao embutimento calculada analiticamente para cada tratamento e comparativo com  $f_e$  experimental.

Tratamento: Norma-Direção- Espécie	$f_e$ analítico [MPa]	$f_e$ experimental [MPa]	Discrepância
ANE	33,38	14,72 ± 0,59	127%
ANP	30,99	20,66 ± 0,62	50%
APE	41,60	20,94 ± 1,15	99%
APP	39,52	29,35 ± 1,59	35%
BNE	37,21	23,99 ± 1,05	55%
BNP	21,52	16,73 ± 0,47	29%
BPE	61,6	27,62 ± 1,56	123%

Tabela 4.12: Resultados da resistência ao embutimento calculada analiticamente para cada tratamento e comparativo com  $f_e$  experimental. (Continuação).

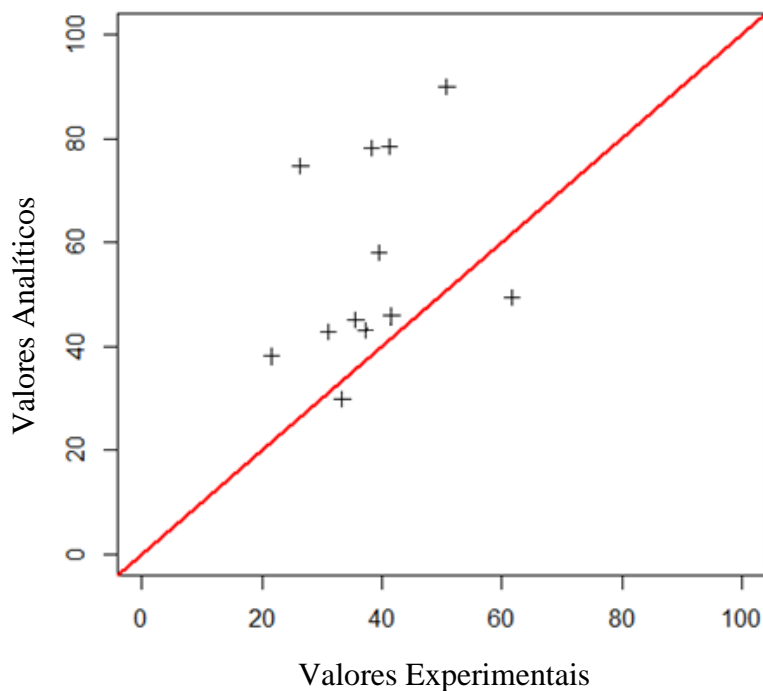
Tratamento: Norma-Direção- Espécie	$f_e$ analítico [MPa]	$f_e$ experimental [MPa]	Discrepância
BPP	35,62	$21,61 \pm 1,16$	65%
ENE	41,18	$37,15 \pm 2,14$	11%
ENP	26,42	$38,64 \pm 3,46$	-32%
EPE	50,81	$44,68 \pm 1,83$	14%
EPP	38,33	$43,09 \pm 1,07$	-11%

Fonte: O autor (2017).

A Figura 4.5 apresenta o gráfico dos valores experimentais em função dos analíticos. A reta representa a igualdade entre estes valores. Os pontos representam os valores de resistência experimental  $f_e$ , e as cruces representam os valores de resistência analítica.

Analisando-se a referida figura fica notório que não houvera aderência entre os valores experimentais e analíticos, sendo estes últimos em sua maioria superiores aos valores experimentais, com exceção de somente dois pontos.

Figura 4.5: Valores experimentais em função dos valores analíticos para  $f_e$ .



Fonte: O autor (2017).

Através da comparação entre os valores de discrepância da Tabela 4.12 foi observado que, de modo geral, os valores analíticos de resistência ao embutimento superestimaram a resistência ao embutimento em torno de 70% em média, chegando aos 127% a mais do que a resistência experimental para o pior caso. A exceção foi a norma europeia que apresentou valores analíticos mais próximos dos experimentais, com destaque para os tratamentos ENP e EPP que sobrestimaram a resistência ao embutimento. A norma americana apresenta os piores resultados com uma média de superestimação de 77% a mais que os valores experimentais, seguido pela norma brasileira que apresenta uma média de superestimação de 68%. Note que uma superestimação de 100% corresponde ao dobro do valor de referência.

Valores de cálculos analíticos deveriam ser conservadores quando comparados a valores experimentais, pois ao utilizá-los para basear o cálculo de projetos de estruturas o projetista não deveria superestimar os valores de resistência somente por não possuir condições de realizar ensaios experimentais no material de trabalho, mas sim deveria efetuar os cálculos conservadores já que a resistência exata do material é desconhecida.

Os valores analíticos mais acertados corresponderam ao grupo da direção paralela da norma europeia, contendo inclusive valores sobrestimados. O cálculo de este grupo se baseou nos parâmetros diâmetro do pino ( $d$ ) e densidade da madeira ( $\rho$ ), ou seja, os mesmos utilizados para o cálculo do grupo AP (americana paralela), mas combinados de maneira diferente e com outras constantes multiplicadoras. Isto mostrou que apesar de este outro grupo se basear nos mesmos parâmetros, não conseguiu combiná-los de maneira eficaz para obtenção de um resultado satisfatório.

Os demais grupos possuem discrepâncias similares e, portanto, não podem ser considerados como melhores ou piores o uso de tais ou quais parâmetros para estimar a resistência ao embutimento e sim a capacidade de combiná-lo mediante fórmulas.

Cabe ressaltar que somente a norma brasileira baseia os cálculos em um parâmetro de resistência mecânica provinda de ensaio experimental para a determinação analítica de outra resistência. Esse fato parece ser contraproducente, pois a grande vantagem de se utilizar uma fórmula analítica é justamente a não necessidade de realizar um ensaio mecânico. No momento em que se faz necessário realizar um ensaio experimental seria melhor determinar diretamente a resistência ao embutimento. No entanto, pode-se argumentar que a resistência à compressão é um valor comumente tabelado e de fácil disponibilidade em diversas normativas, o que é um argumento forte se não fosse pelo péssimo resultado da previsão dos valores por meio de fórmulas.

Seria mais interessante utilizar parâmetros de fácil obtenção como densidade da madeira e outras propriedades físicas simples, medidas diretamente no material de interesse para o projeto do que esperar por informações que podem levar a erros devido a valores tabelados para famílias com espécies com diferentes resistências ou a considerar valores tabelados de indivíduos adultos e trabalhar com lenhos mais jovens etc.

#### 4.3 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO OBTIDOS ATRAVÉS DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE REGRESSÃO

A Tabela 4.13 apresenta a média dos resultados da implementação dos métodos de determinação de valor de resistência para todos os tratamentos. Foi utilizado um código de cores para denotar o *score* entre os valores de cada tratamento (cada linha) e assim evidenciar a comparação entre os métodos. Os resultados são apresentados somente para  $f_e$  e não para as demais modalidades de resistência pois apresentam os exatos mesmos *scores* apesar de ter valores numéricos diferentes, o que para efeitos comparativos desta pesquisa não acrescentariam informações.

Tabela 4.13: Média da resistência ao embutimento  $f_e$  por método e tratamento, com classificação de *score* de valores linha a linha.

Tratamento	Média de $f_e$					
	Brasileira	Americana	Europeia	<i>Bent-cable</i>	<i>Broken-stick</i>	Proposto
ANE	13,96	14,85	22,52	19,59	17,91	15,60
ANP	21,28	21,15	31,07	25,53	23,54	19,81
APE	19,96	21,06	34,21	29,18	24,95	18,43
APP	27,22	28,25	40,86	38,49	35,03	19,89
BNE	24,15	27,30	38,51	34,17	31,83	17,34
BNP	16,69	17,73	25,15	21,64	20,34	15,40
BPE	27,21	30,78	48,91	46,63	43,51	16,65
BPP	21,14	23,81	35,43	33,04	31,30	15,86
ENE	17,10	18,21	35,69	16,64	16,74	15,88
ENP	17,25	20,20	37,80	23,81	22,53	12,51
EPE	24,99	28,88	43,68	41,05	39,75	14,72
EPP	28,63	32,07	42,36	38,87	35,89	15,41

Legenda: Maior 2<sup>do</sup> maior 3<sup>ro</sup> maior 3<sup>ro</sup> menor 2<sup>do</sup> menor Menor

Fonte: O autor (2017).

É notório que existe uma forte tendência de classificação entre níveis de resistência obtidos por meio de cada método, independente do tratamento analisado (com exceção do



tratamento ENE), com 4 classificados em níveis muito claros e 2 classificados com forte tendência.

As maiores médias de resistência foram obtidas incontestavelmente para o método da norma europeia, sendo seguido pelo método *bent-cable* com valores 16% menores em média e o método *broken-stick* com valores em média de somente 7% atrás deste último. A classificação também foi muito clara respeito ao método mais conservador, no caso o método proposto, seguido pelo método da norma brasileira com valores em média 39% maiores e, por último, pela norma americana com valores em média 10% maiores que a norma brasileira.

O único tratamento analisado que diferiu parcialmente desta classificação foi o ENE, que apesar de classificar o método da norma europeia e o proposto como o menos e mais conservador, respectivamente, classificou os demais métodos de maneira diferente à tendência geral. As causas deste efeito foram de difícil identificação e explicação, pois a classificação por níveis de resistência constituiu em uma medida relacionada intimamente com a maneira como cada método analisa o comportamento de resposta do material e atribui um valor de resistência. Por isso, esta foi uma medida com tendência tão uniforme como é observado na Tabela 4.13. Porém é importante notar que existiu pouca diferença entre os valores médios de  $f_e$  para cada método nos casos discrepantes. Este comportamento de valores muito próximos se verificou também nos demais tratamentos envolvendo a direção normal, o que não ocorreu para os tratamentos envolvendo a direção paralela.

A partir dos resultados deste estudo foi possível inferir que os métodos produziram respostas mais próximas quando foram analisados os tratamentos envolvendo a direção normal às fibras. Ou também, que os ensaios de embutimento na direção normal às fibras quando analisados pelos métodos estudados conseguiram exprimir melhor os valores característicos para a resistência mecânica, sendo esta uma afirmação apoiada pela teoria. A direção normal às fibras tende a ser mais homogênea em termos de resistência mecânica do que a direção paralela conforme já discutido no item 4.1 deste trabalho.

No caso dos desvios padrões de  $f_e$  para cada tratamento analisado por cada método foi possível observar por meio da Tabela 4.14 a alta qualidade dos resultados obtidos pelo método proposto com a quase totalidade das menores dispersões de resultados observadas, com somente uma exceção (tratamento ANP), denotando que em termos de qualidade (baixa dispersão de resultados) foi claramente superior aos demais.

Tabela 4.14: Classificação de desvios padrões dos valores de  $f_{e,12}$  por método e tratamento, com classificação de *score* de valores.

Tratamento	Desvio padrão da $f_e$					
	Brasileira	Americana	Europeia	<i>Bent-cable</i>	<i>Broken-stick</i>	Proposto
ANE	3,80	2,43	2,70	3,71	2,48	0,92
ANP	2,91	2,71	3,90	4,53	2,98	3,05
APE	5,00	4,85	3,92	8,42	8,61	3,29
APP	9,39	7,03	8,41	8,31	7,19	4,19
BNE	4,47	5,09	3,90	7,51	6,43	2,98
BNP	1,92	2,28	2,87	3,90	3,27	0,98
BPE	6,41	6,81	9,26	9,28	7,91	2,40
BPP	5,47	6,15	6,48	6,38	6,26	2,27
ENE	3,92	5,56	6,19	6,28	5,84	2,68
ENP	2,45	5,13	11,59	7,39	6,34	0,41
EPE	10,64	11,69	7,23	6,41	5,93	4,24
EPP	8,16	7,86	5,08	5,48	6,28	3,18

Legenda: Maior 2<sup>do</sup> maior 3<sup>ro</sup> maior 3<sup>ro</sup> menor 2<sup>do</sup> menor Menor

Fonte: O autor (2017).

O método brasileiro apesar de também apresentar alguns valores com baixa dispersão, ocupando a segunda posição, apresentou também valores com alta dispersão, incluindo 3 de 12 valores com as maiores dispersões do grupo, mostrando que não teve uma boa confiabilidade, neste caso.

O método da norma americana se mostrou uma alternativa intermediária para obter baixas dispersões, pois, apesar de terem sido obtidos valores de dispersão na sua maioria com um *score* abaixo do método brasileiro apresentaram valores com maior confiabilidade, isto é, mais regulares em questões de dispersão, sem valores com muito alta dispersão no meio de valores com baixa dispersão.

O método da norma europeia manteve a primeira posição no quesito baixa regularidade de determinação de ponto de resistência (ou não regularidade da dispersão), denotando que a baixa qualidade observada não foi devida somente às configurações do ensaio, da ciclagem ou das dimensões dos corpos de prova como poderia ser suposto de maneira precipitada pelos resultados obtidos no item 4.1, mas sim da maneira como a norma associa o valor de resistência à curva de resposta de comportamento do material.

A obtenção de valores ora dispersos, ora assertivos pode estar associada ao comportamento irregular do material no regime plástico da maneira como é entendida pelo método da norma europeia (por determinação de máximo valor).

Outros métodos que baseiam a obtenção do valor de resistência no estudo da região plástica do comportamento do material são o *bent-cable* e o *broken-stick*. Nos dois casos apesar de não terem um *score* alto no que diz respeito à baixas dispersões os dois métodos apresentam uma confiabilidade média, superior a do método da norma europeia, com destaque para o *broken-stick* que apresenta a valores de dispersão menores e confiabilidade maior entre os dois.

Cabe notar que como este *score* está associado à capacidade do método de analisar o comportamento do material e atribuir-lhe um ponto, e como entre os métodos que consideram a região de comportamento plástico do material o *broken-stick* apresentou a melhor qualidade, pode-se deduzir que dentre as três abordagens de estudo do regime plástico (europeia: máximo valor; *Bent-cable*: identificação da região de transição; e *broken-stick*: estudo do coeficiente angular do regime linear), o *broken-stick* possuiu a abordagem mais acertada para considerar o comportamento plástico na determinação da resistência ao embutimento.

Por causa da região de transição entre os regimes elástico e plástico ser muito extensa e de ter sido implementado o método *broken-stick* sem ser considerada esta condição do comportamento da madeira ao embutimento, os ajustes da reta de regressão para o regime elástico não foram muito satisfatórios (*vide* Figura 3.6). Estas regressões de reta podem ser corrigidas em trabalhos futuros mediante ajustes, para melhorar a qualidade das respostas. O método ainda comporta a possibilidade de serem considerados mais regimes de comportamento do material (ao invés de somente dois, como feito nesta pesquisa) para obter resultados mais aprimorados. Estas considerações podem ser estudadas em pesquisas futuras.

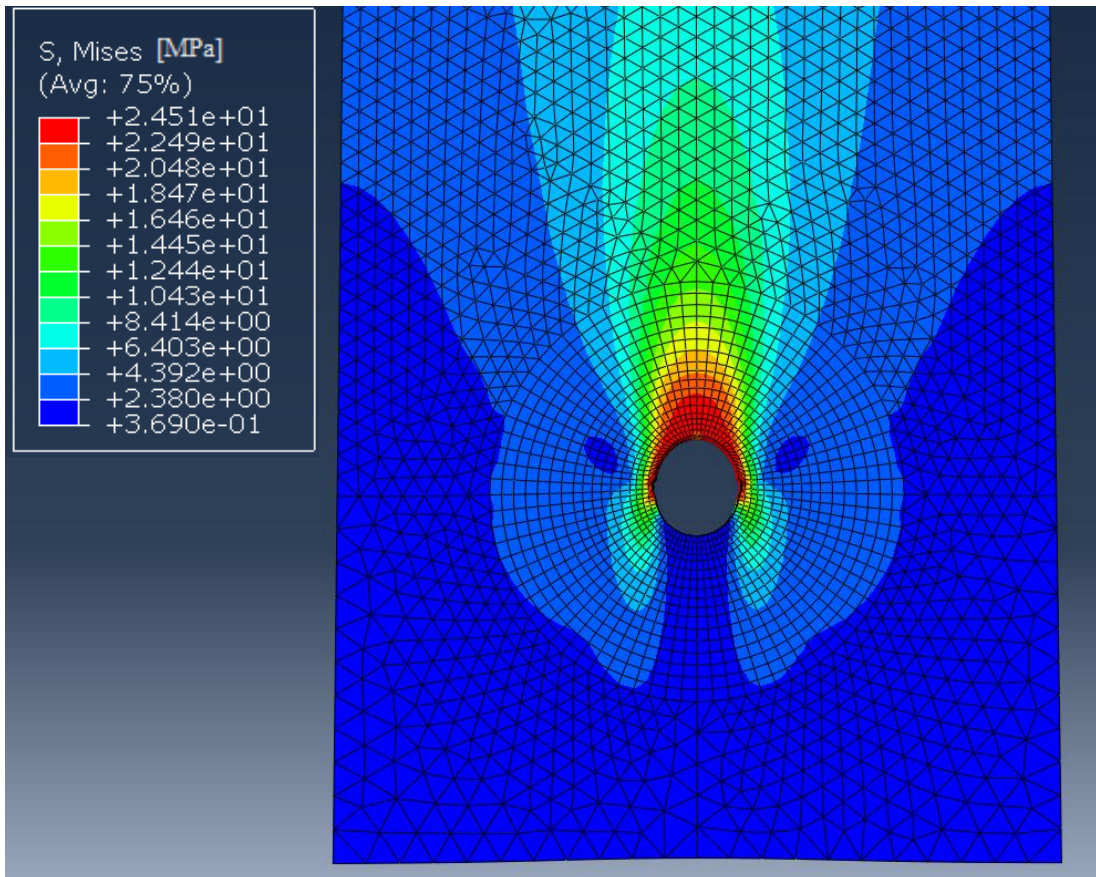
#### 4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

Os resultados das simulações computacionais fornecidos possibilitaram a avaliação dos níveis de esmagamento e danificação da madeira nas regiões de interesse.

Por meio dos modelos avaliaram-se as distribuições e níveis de tensões nas regiões das proximidades da inserção do pino metálico e definiu-se uma região de alta intensidade de tensões e deformações que correspondeu à área do material afetada pelo embutimento do pino na madeira.

As figuras que apresentam a distribuição de tensões dos modelos estudados foram elaboradas através do *software* ABAQUS, todas são acompanhadas de legendas indicando os valores das tensões calculados pelo *software*.

Figura 4.6: Estado de tensões pelo critério Von Mises correspondentes para o modelo de corpo de prova da norma brasileira na direção paralela às fibras.



Fonte: O autor (2017).

Figura 4.7: Deformações observadas no corpo de prova de pinus ensaiado para o modelo da norma brasileiro na direção paralela às fibras.



Fonte: O autor (2017).

O modelo numérico do corpo de prova paralelo para a norma brasileira da Figura 4.6 atingiu o limite de resistência do material de 24,50 MPa no ponto logo acima do pino e se estendendo para uma distância de aprox. 5 mm acima (note que a região I de malha tem a medida de 13 mm de raio para este caso), para um deslocamento máximo do aplicador de carga de 0,9 mm, com critério de parada condicionado pela norma.

Na Figura 4.6 é possível determinar uma distância de ação mais pronunciada das tensões somente acima do pino e concentradas em faixa estreita (largura  $< 2.d$ ). Isto é verificado experimentalmente, e pode ser observado este comportamento na Figura 4.7. Nota: O corpo de prova da figura foi ensaiado até o limite de 7,0 mm.

O código de 12 cores do azul para o vermelho corresponde às tensões de até: 10 (azul), 15, 25, 35, 40 (verde claro), 50 (verde), 60, 70 (amarelo), 75, 80, 90 e 100 (vermelho) % da tensão máxima.

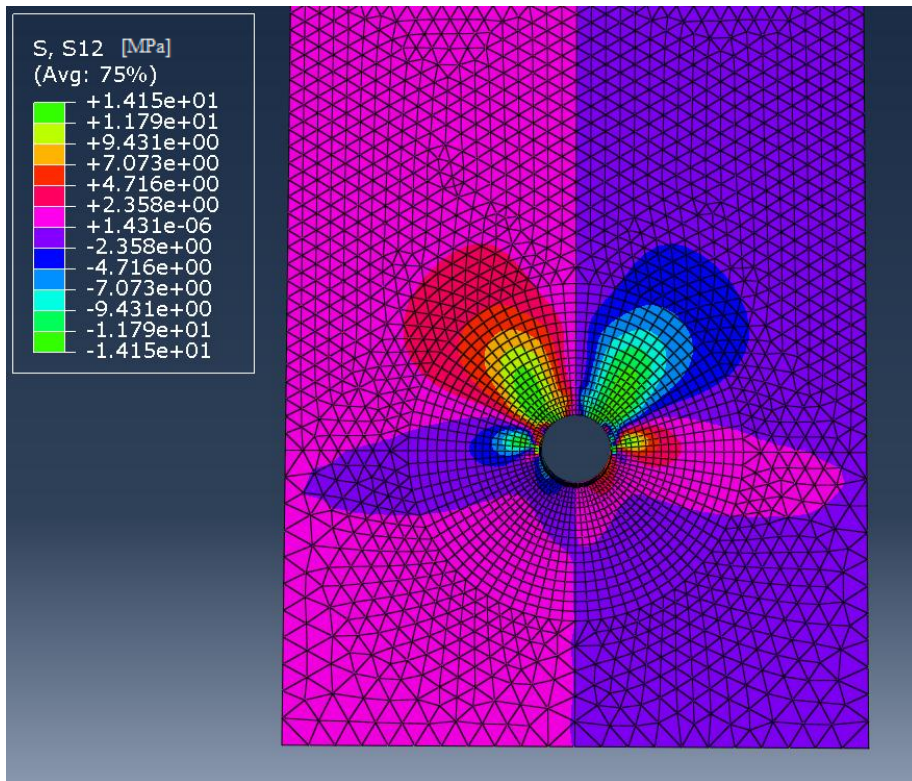
As tensões na região do aplicador de carga não ultrapassaram os 25% da tensão máxima.

Pode-se determinar um limite físico de atuação média das tensões como segue: A distância máxima de atuação de tensões da ordem de 50% (verde) da tensão máxima é de aprox. 4 vezes do diâmetro do pino, isto é, de aproximadamente 25 mm para este caso. Mediante este parâmetro de limite de atuação média pode-se verificar se o corpo de prova possui dimensões mínimas apropriadas para estas condições de ensaio ou se ele é muito mais extenso do que o necessário, tornando-se oneroso. Neste caso as proporções são adequadas, sendo um pouco exageradas para a dimensão acima do pino. Pela análise das tensões poderia se delimitar esta distância a somente 6 vezes o diâmetro do pino (ao invés de  $14.d$ ) para ter tensões de no máximo até 35% da tensão máxima.

O modelo do ensaio na direção normal às fibras seguiu as mesmas proporções e dimensões do que o modelo paralelo, porém com uma tensão máxima de 42,18 MPa. Já que os dois corpos de prova apresentaram as mesmas dimensões e distribuições de tensão estreitamente semelhantes, as conclusões feitas para um são pertinentes para os dois casos, motivo pelo qual não será apresentado aqui.

Tensões maiores são esperadas para os modelos na direção normal às fibras, já que os parâmetros de resistência inseridos no *software* são maiores (*vide* seção 3.7.4).

Figura 4.8: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo brasileiro na direção normal às fibras.



Fonte: O autor (2017).

Figura 4.9: Cisalhamento observado em corpo de prova de pinus ensaiado para o modelo da norma brasileira na direção normal às fibras.



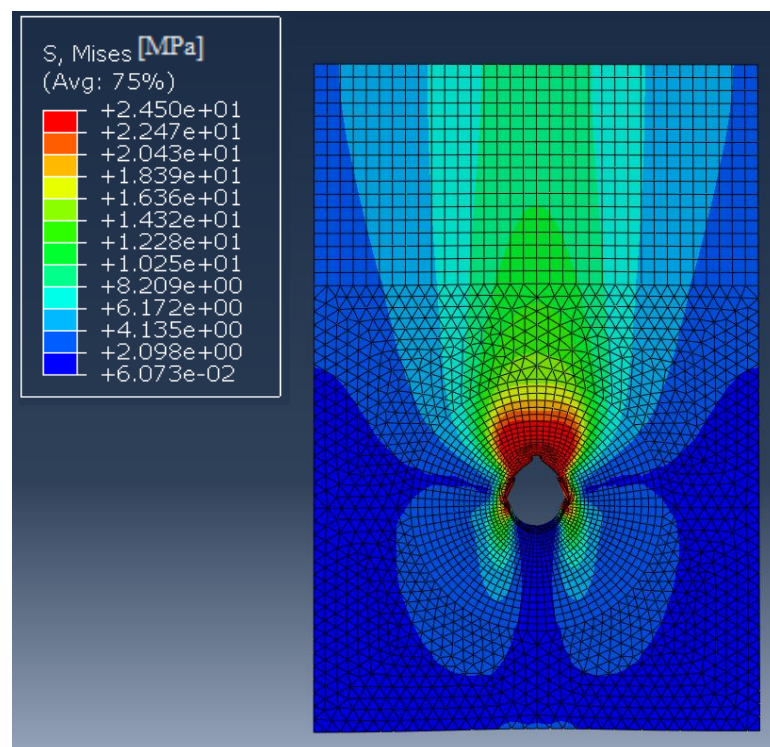
Fonte: O autor (2017).

Comparando as Figura 4.8 e 4.9 pode-se observar a semelhança do comportamento do cisalhamento entre o modelo numérico e o corpo de prova ensaiado. Isto reforça que a calibração do modelo foi bem executada. Nota: Corpo de prova e modelo numérico ensaiados até o limite de 7 mm para direção normal às fibras.

A Figura 4.10 segue para o código de cores as mesmas porcentagens do que o modelo da norma brasileira da Figura 4.6, porém a distribuição de tensões se verificou diferentes no modelo americano, já que essencialmente as dimensões do corpo de prova e o critério de parada foram diferentes. Portanto verificou-se que o modelo atingiu o limite de resistência do material de 24,50 MPa no ponto acima do pino e ligeiramente circundante, se estendendo para uma distância de aproximadamente 7 mm acima (note que a região I de malha tem a medida de 13 mm de raio para este caso), para um deslocamento máximo do aplicador de carga de 1,2 mm, com critério de parada condicionado pela norma.

A ação pronunciada das tensões (acima de 70%) tem uma configuração diferente do que aquela apresentada pelo modelo de corpo de prova da norma brasileira, caracterizando-se por uma ação mais ampla no sentido da largura do corpo de prova (b). Esta configuração pode ser efeito da menor distância entre o furo de inserção do pino e o aplicador de carga.

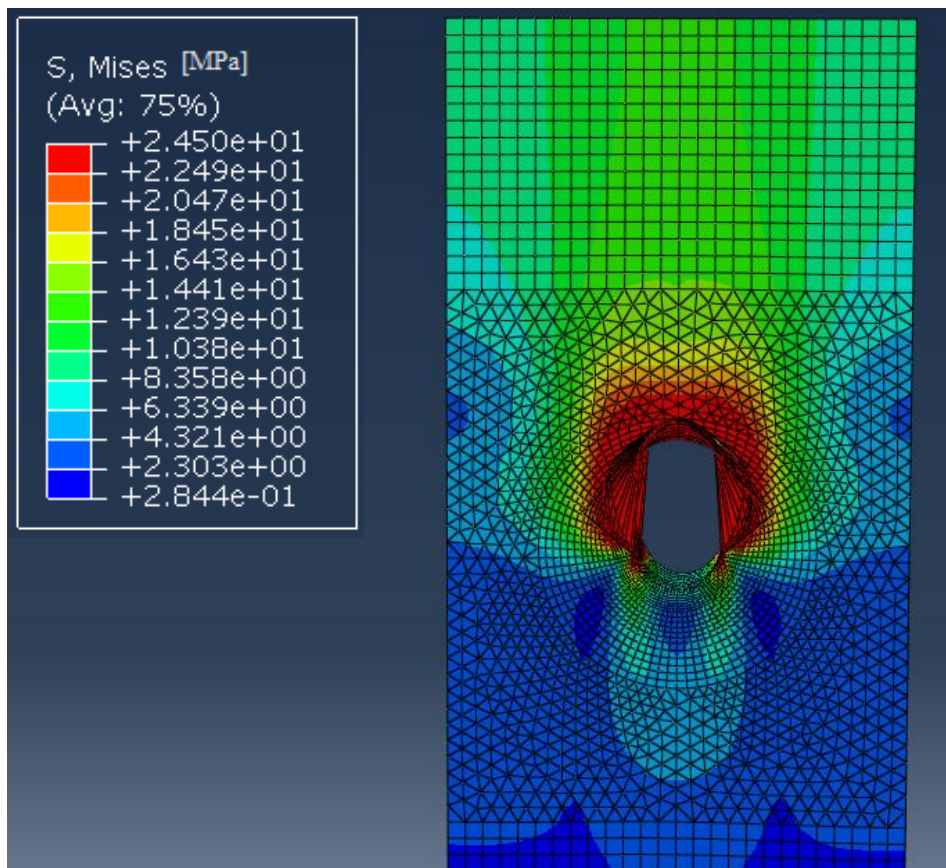
Figura 4.10: Estado de tensões pelo critério Von Mises para o modelo da norma americana na direção paralela às fibras.



As tensões na superfície do aplicador de carga chegam até os 40% da tensão máxima (faixa verde clara). O limite de atuação média das tensões não ultrapassou 5 vezes o diâmetro do pino, aproximadamente 33 mm. Considerando estes dados pode-se dizer que em questões de proporção de dimensões, para as condições estabelecidas pela norma, este corpo de prova foi mais bem dimensionado, com dimensões que permitiram a distribuição de tensões de maneira uniforme e sem o uso desnecessário de material para a sua confecção.

O estado de tensões para a direção normal segue uma distribuição muito semelhante à ilustrada na Figura 4.10 para a direção paralela, mas com um limite de resistência de 42,00 [MPa]. Como os dois corpos de prova possuem as mesmas dimensões as conclusões do modelo paralelo, nos moldes desta discussão, são válidas para o modelo normal.

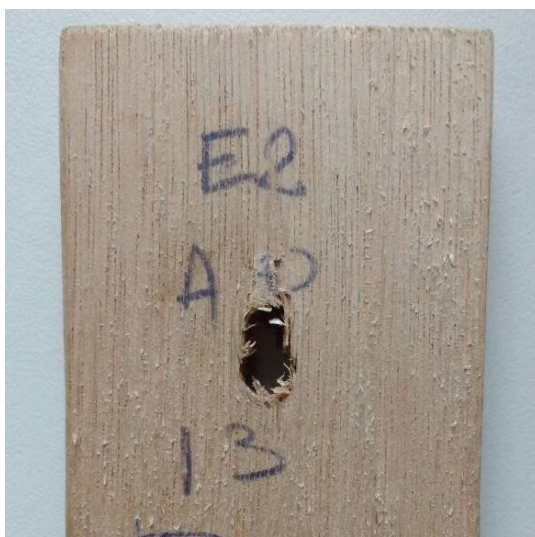
Figura 4.11: Estado de tensões pelo critério Von Mises correspondentes para o modelo da norma europeia na direção paralela às fibras.



Fonte: O autor (2017).



Figura 4.12: Embutimento observável em corpo de prova ensaiado para o modelo europeu na direção paralela às fibras.



Fonte: O autor (2017).

A Figura 4.11 segue para o código de cores as mesmas porcentagens do que o modelo brasileiro da Figura 4.6. O estado de tensões verificou-se totalmente diferente do que no modelo brasileiro e americano. Isto se deve principalmente à que o critério de parada da norma europeia solicitou o corpo de prova até a deformação absoluta de 5 mm (em média 0,9 mm e 1,2 mm para as normas brasileira e americana, respectivamente).

O modelo atingiu o limite de resistência do material de 24,50 MPa acima do furo do pino e até uma distância de aproximadamente 15 mm (aprox. 1/3 da distância até o aplicador de carga). Para efeito comparativo considerar que a região I de malha tem a medida de 9,75 mm de raio para este caso.

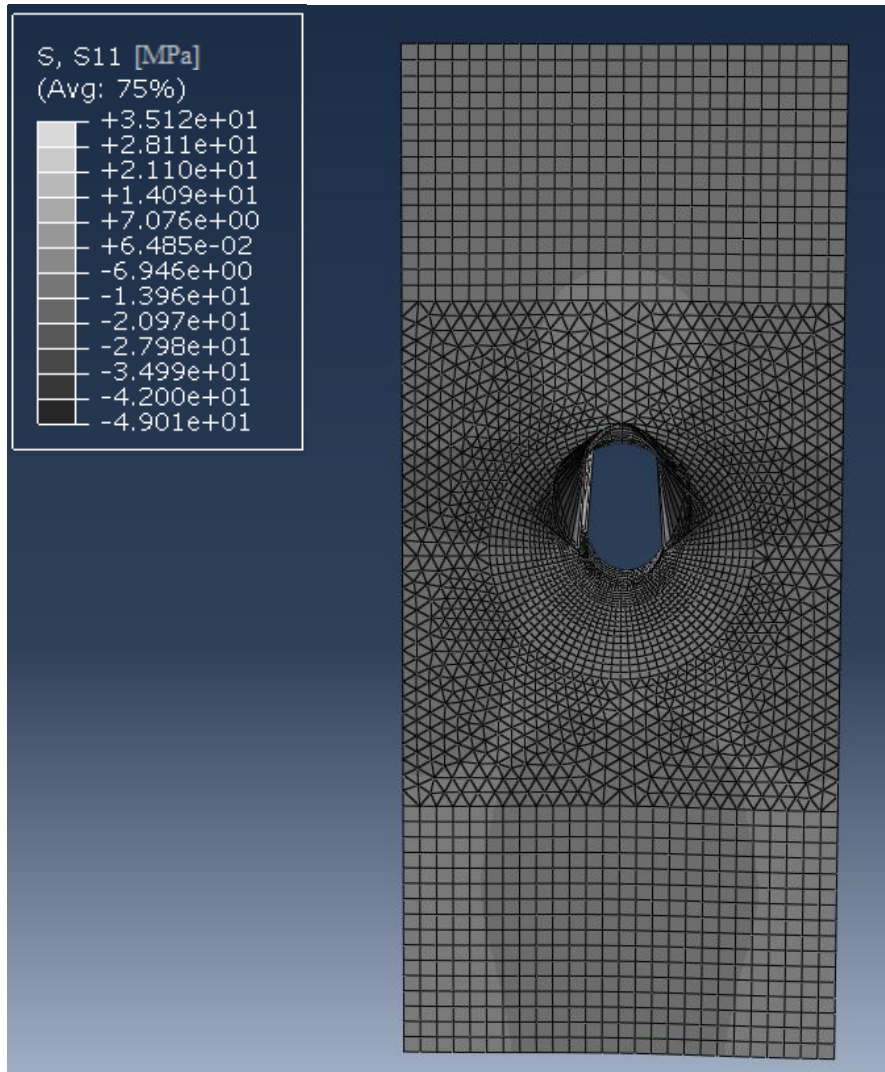
Deformações notórias e pronunciadas são observadas nos ensaios experimentais (*vide* Figura 4.12) denotando um alto nível de tensão concentrado na região.

A ação pronunciada das tensões (acima de 70%, faixa amarela e além) teve uma configuração diferente do que nos demais modelos, apresentando ação também nas laterais do furo de inserção do pino. A distância de embutimento exagerada imposta pelo método da norma geram tensões resistivas e de acomodação do material mais abrangentes, isto é, que envolvem mais material nos arredores da região comprimida pelo pino, fazendo que a configuração do estado de tensões fosse mais larga e diferente do que nos demais modelos.

Também ocorreu um achatamento da ponta do comportamento paraboloide das tensões, possivelmente originário da curta distância até o aplicador de carga, sendo que as tensões da superfície do aplicador de carga atingiram os 50% da tensão máxima em ampla

região. Este achatamento da cúspide do parabolóide de nível de tensão teve efeito de alterar a distribuição das tensões cisalhantes, restringindo de certa forma a distribuição natural desta no material. Este efeito pode ser visualizado na Figura 4.13, a seguir, e comparado às tensões cisalhantes do modelo brasileiro da Figura 4.7.

Figura 4.13: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo europeu na direção paralela às fibras.

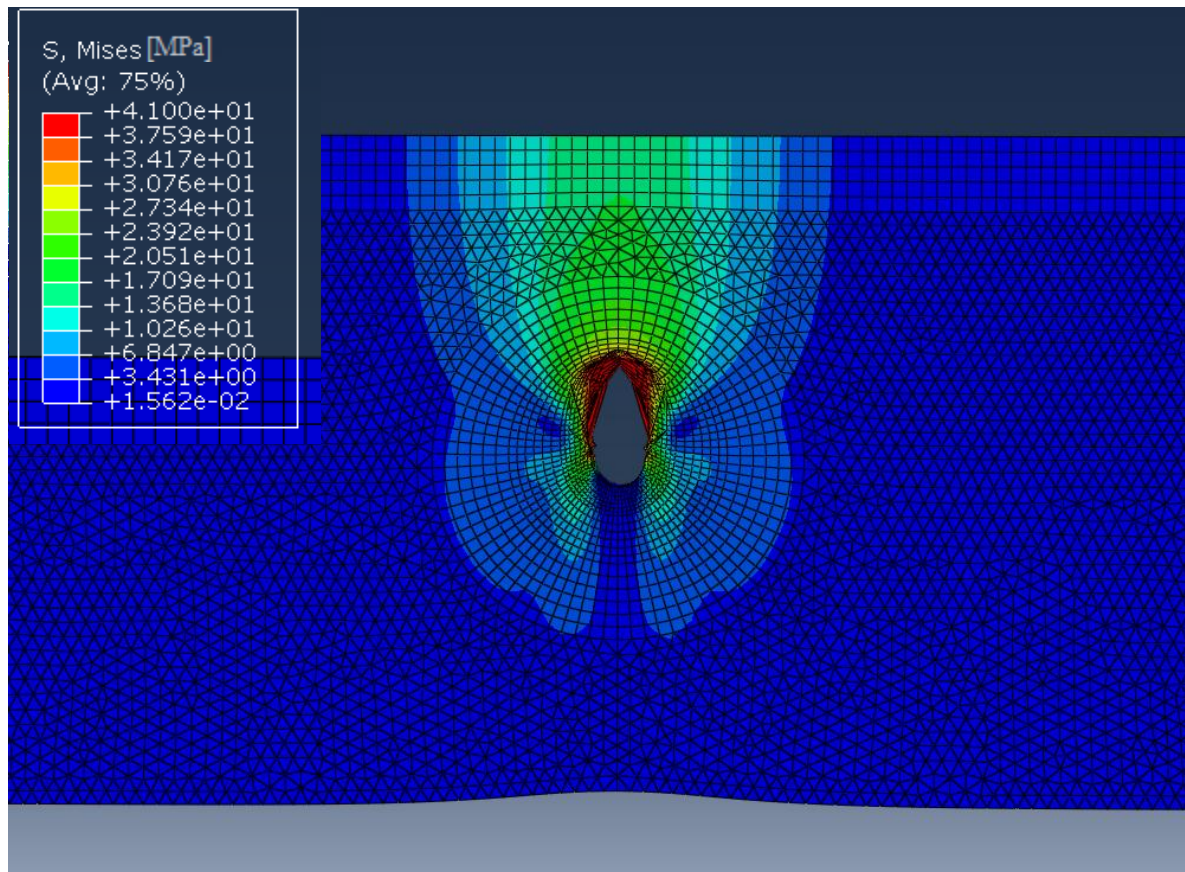


Fonte: O autor (2017).

Outra consideração importante do ponto de vista da atuação dos níveis de tensão dentro do corpo de prova foi sobre a largura deste (b), que se mostrou insuficiente para acomodar de maneira mais natural as tensões distorcidas (notar que houve a distorção das tensões nas laterais do corpo de prova na Figura 4.11) causadas pela pouca distância até o aplicador de carga.

Pode se definir por estas considerações como sendo insuficientes as dimensões do corpo de prova da norma europeia para distribuir de maneira natural as tensões provenientes do critério de ensaio de deslocamento imposto de 5 mm adotado pela norma, em comparação com as outras normas.

Figura 4.14: Estado de tensões pelo critério Von Mises e deformações correspondentes para o modelo europeu na direção normal às fibras.



Fonte: O autor (2017).

Os níveis de tensão por cor apresentados na Figura 4.14 foram iguais aos definidos para o modelo brasileiro, porém com tensão máxima de 4,10 MPa (lembrando: Valores até 10 (azul), 15, 25, 35, 40 (verde claro), 50 (verde), 60, 70 (amarelo), 75, 80, 90 e 100 (vermelho) %).

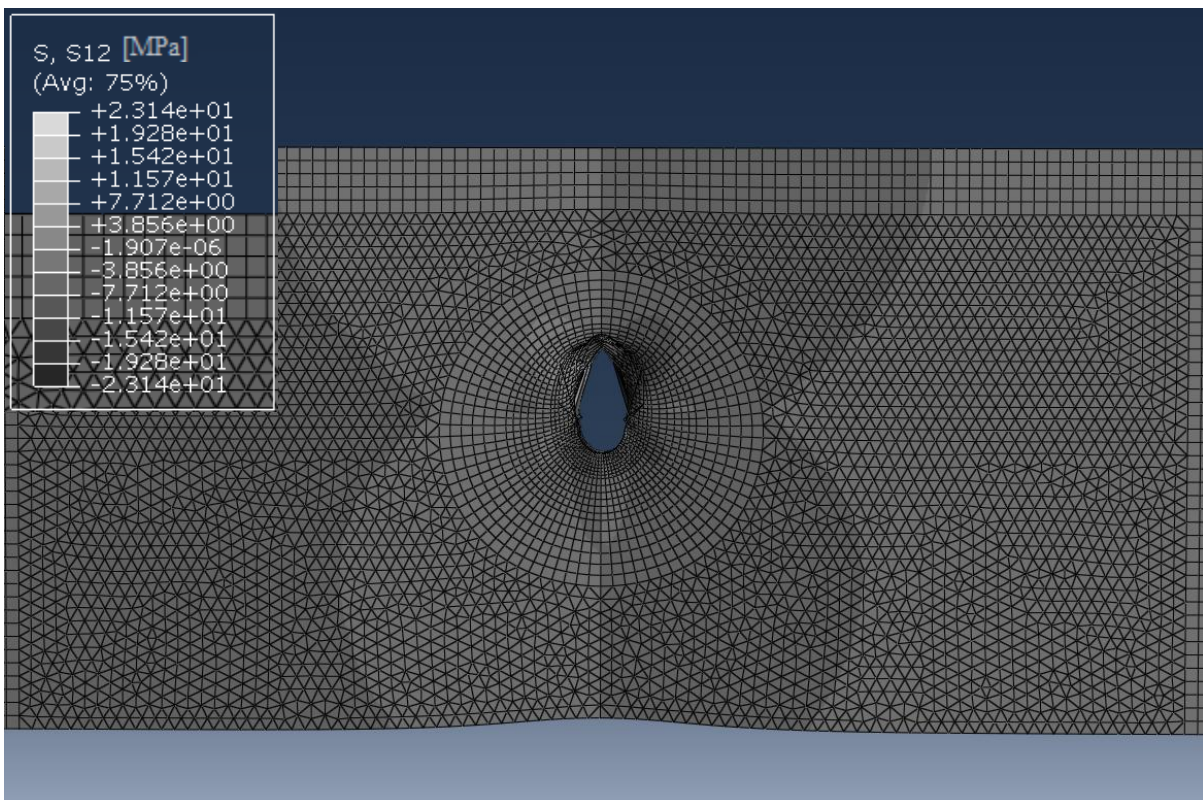
A distribuição das tensões do modelo normal para a norma europeia foi consideravelmente melhor que para o modelo paralelo às fibras, já que não se verificou o efeito de distorção causado pela insuficiência de material nas laterais, levando a uma distribuição de tensões mais natural.

Pelos valores diferentes das propriedades elasto-plásticas do material as tensões de nível elevado (acima de 70%) encontraram-se mais concentradas na região de deformação imposta pelo embutimento do pino.

Como a acomodação das tensões internas do material nas laterais foi melhor, a resposta deste modelo se assemelharam as do modelo americano, com distância razoável até o aplicador de carga, também com tensões em torno de 40% do máximo (faixa verde clara) na sua superfície de contato.

Como a tensão de resistência máxima da direção normal às fibras foi maior poder-se-ia considerar como razoável a distância entre o pino e o aplicador de carga, se não fosse pela distribuição das tensões de cisalhamento observáveis na Figura 4.15.

Figura 4.15: Distribuição de tensões cisalhantes no plano para o modelo europeu na direção normal às fibras.



Fonte: O autor (2017).

Esta distribuição de tensões de cisalhamento correspondeu a uma combinação das propriedades do material na orientação normal e a uma curta distância entre a inserção do pino e o aplicador de carga e pode considerar-se como ligeiramente distorcida em comparação com a da norma brasileira (*vide* Figura 7.7) devido à dimensão b (largura) muito extensa do corpo de prova. O efeito do cisalhamento pode ser observado na Figura 4.16, a seguir.

Figura 4.16: Cisalhamento observado em corpo de prova de eucalipto ensaiado para o modelo europeu na direção normal às fibras.



Fonte: O autor (2017).

Levando em conta a estas observações pode-se considerar a dimensão entre o pino e o aplicador de carga como satisfatória e a dimensão  $b$  (largura) como sendo exageradamente grandes e sem vantagens práticas no sentido de acomodação de tensões e do ponto de vista experimental, já que foram observados alguns problemas técnicos durante os ensaios experimentais devido a esta dimensão ser muito extensa, *vide* Figura 4.17 no tópico a seguir.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A retirada dos corpos de prova na direção normal às fibras segundo a norma brasileira apresentou dificuldades na extração devido as suas dimensões. Para as outras normas analisadas nessa pesquisa a retirada dos corpos de prova não apresentou dificuldades.

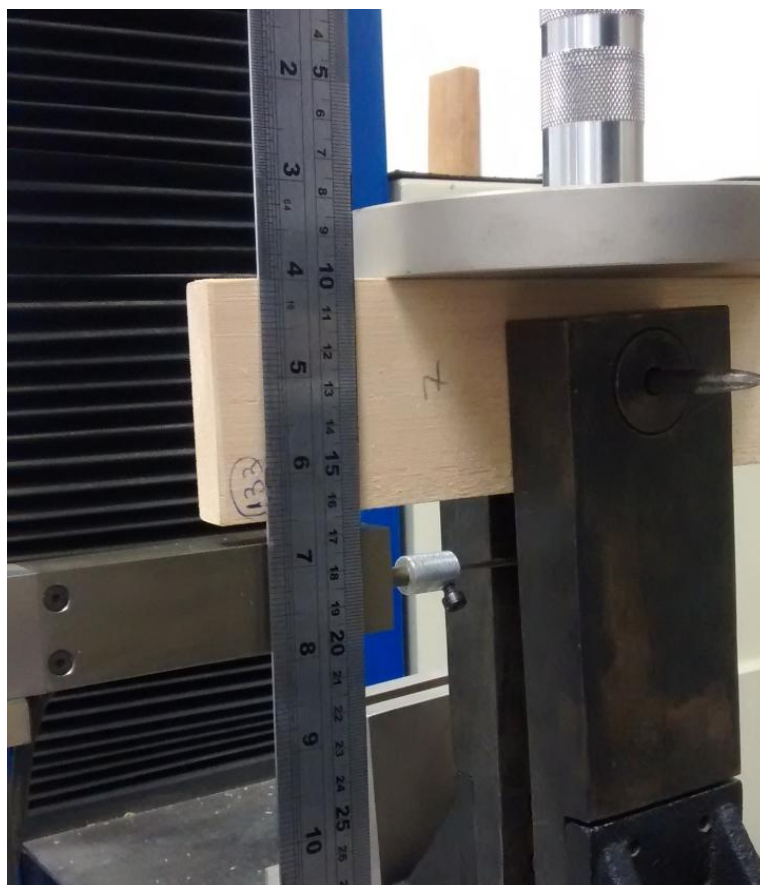
A norma europeia no sentido normal exigiu uma quantidade maior de material para confecção dos corpos de prova por causa das dimensões normatizadas serem muito grandes. O corpo de prova europeu apresentou um problema de ordem prática no momento do ensaio experimental devido a que sua dimensão largura ( $b$ ), por ser muito extensa, acabou colidindo com o transdutor de deslocamento da máquina de ensaios, durante o deslocamento, resultando em erros de leitura e em uma curva de pontos perdida. Para o problema ser corrigido nos ensaios seguintes verificou-se grande dificuldade em mudar a posição do transdutor para ficar bem acomodado, pois o espaço útil para acomodá-lo é muito restrito, *vide* Figura 4.17. No

entanto, o problema foi contornado mediante destreza própria do operador da máquina e de ajustes finos na posição do transdutor bem sucedidos.

A norma americana apresentou maior facilidade na execução dos ensaios por apresentar um único ciclo de carregamento. Além disso, a norma americana assim como a norma brasileira recomendam as mesmas dimensões do corpo de prova para as direções paralela e normal às fibras. A norma americana recomenda as menores dimensões para os corpos de provas dentre as três normas analisadas, gerando uma economia de material e possibilidade de extração de mais corpos de prova de uma mesma peça de madeira.

A norma brasileira apresentou um ensaio de longa duração resultando em uma taxa de ensaios por tempo baixa comparada com as outras normas, sendo o oposto verdadeiro para os ensaios segundo a norma americana.

Figura 4.17: Situação de ensaio onde o corpo de prova europeu colidiu com o transdutor de deslocamento.



Fonte: O autor (2017).

## 5 CONCLUSÕES

A avaliação comparativa entre as normas mostrou que as principais diferenças entre os valores de resistência ao embutimento obtidos para cada norma, provem das diferenças entre os métodos de determinação de ponto de resistência, o qual é estabelecido em diferentes regiões para cada norma, conferindo valores de respostas muito diferentes mesmo para um mesmo conjunto de dados.

A comparação, para cada norma, entre valores analíticos e experimentais para a resistência ao embutimento mostrou que os métodos analíticos não estimaram com precisão a resistência para as diversas situações analisadas (tratamentos), e que, além disso, existiu uma tendência perigosa a superestimar estes valores, em detrimento à segurança, ultrapassando em muito a resistência mesurada diretamente por meio de ensaios. Apesar de a norma europeia ter aproximado os valores analíticos dos experimentais, pela variação muito extensa destes últimos e pelo fato de ambos os valores serem muito pouco conservadores em relação às demais normas, pode-se considerar o método da norma europeia como sendo mais arriscado (muito perto ou além do limite de resistência natural da madeira) tanto experimental quanto analiticamente para dimensionar ligações e garantir a sua resistência.

A norma europeia determinou os valores de resistência no final do regime totalmente plástico, a norma brasileira situou os valores de resistência no início da transição do regime elástico para o plástico, e a norma americana no meio da transição entre regimes. O método proposto delimitou o valor de resistência no início da região de transição, com uma precisão apurada. Os métodos de regressão estatística *bent-cable* e *broken-stick* situaram os valores de resistência na transição entre os dois regimes, com valores ligeiramente divergentes, estes dois métodos levam em consideração o comportamento do regime elástico tanto quanto do plástico, diferentemente das normas estudadas que se baseia somente em um ou outro regime.

Comparar as normas e os métodos de regressão nesta pesquisa mostrou que não existe um consenso no que se refere à determinação de um ponto natural de resistência da madeira ao embutimento. Portanto, mediante as normativas estudadas não é possível a padronização da resistência do material.

Concluiu-se também que é possível definir com segurança, mediante os métodos de regressão, uma faixa de transição entre os regimes de comportamento (elástico e plástico). O atual estado normativo refere-se sempre a um único ponto de resistência, não a uma região ou faixa de transição. O estabelecimento de uma padronização neste sentido poderia ser proposta

para ser adotada devido à segurança que ela oferece em se ter uma faixa de tolerância ao invés de um único valor.

Toda a metodologia apresentada nesta pesquisa tem como base, para a determinação do ponto ideal de resistência, a curva de resposta mecânica do deslocamento resultante da aplicação de uma carga controlada. Alternativas como o estudo de integrais definidas, ponto a ponto, derivadas ou ainda outras transformações desta curva de resposta força x deformação podem tomar o lugar para embasar futuros estudos sobre a capacidade de resistência do material. Abordagens neste sentido não são incomuns no estudo de comportamentos mecânicos na engenharia de materiais.

A análise entre as modalidades de resistência ( $f_e$ ,  $f_{e,12}$  e  $f_{e,\rho}$ ) para todos os tratamentos mostrou que a correção da resistência pela densidade de cada corpo de prova poderia ser um parâmetro interessante para a padronização de valores, já que apresenta resultados que aumentam o coeficiente de determinação e diminuem a dispersão. Gerando valores com maior confiabilidade do que o as resistências  $f_e$ ,  $f_{e,12}$ .

As simulações numéricas de elementos finitos mostraram que os corpos de prova da norma americana foram bem dimensionados e que acomodam bem as tensões internas resultantes dos ensaios de embutimento, enquanto que a norma europeia subdimensiona os corpos de prova em questões de volume resistivo (entre o pino e o aplicador de carga) e superdimensiona outras dimensões sem benefício prático (como a largura ( $b$ ) no corpo de prova do ensaio na direção normal as fibras), e que a norma brasileira superdimensiona o volume resistivo também sem benefício prático.

A avaliação das curvas de resposta de comportamento do material, por todos os seis métodos, envolvendo tratamentos com corpos de prova da norma americana mostrou que por não possuir ciclos de acomodação a região de comportamento elástico mostrou-se menos definida. Este efeito compromete a precisão dos métodos normativos e de regressão que precisam definir uma reta delineando a região de comportamento elástico. Porém, através do método *broken-stick* as respostas foram satisfatórias, reforçando a necessidade de reformular o estudo do comportamento mecânico da madeira considerando o comportamento dos regimes elástico e plástico em conjunto. Ciclos de carga são onerosos em tempo e geram problemas como trepidações de máquina e instabilidades nos mecanismo de deslocamento controlado causados pela dificuldade do controle eletrônico em manter a força de maneira constante em ciclos com períodos de estanqueidade (rampas e patamares).



## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O comportamento mecânico da madeira, pela sua complexidade, poderia ser estudo para uma reformulação na sua interpretação, não somente através da curva de resposta força por deformação, mas por transformadas desta.

O método de regressão segmentada *broken-stick* mostrou que é capaz de modelar com melhor precisão o comportamento dos dados de resposta, pois considera tanto o comportamento do regime elástico quanto do plástico. Neste estudo limitou-se a implementar o método com somente dois regimes de comportamento, mas ele possibilita a trabalhar com ‘n’ regimes. Pesquisas futuras poderiam analisar e otimizar a quantidade de regimes utilizados no método para se atingirem respostas de resistência que modelem o material de melhor maneira.

Poderia ser utilizando o método proposto, que se mostrou possuir alta sensibilidade, como ferramenta para delimitar com precisão os pontos do começo de desvio do regime linear, tanto para detectar o fim do regime elástico quanto de maneira análoga e invertida para denotar o começo do regime plástico.

Métodos estatísticos podem ser implementados em combinação uns com os outros, de maneira a aproveitar os potenciais característicos de cada um e ainda cobrir mutuamente fraquezas ou ineficiências próprias deles ou de outros métodos.

## REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, 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, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira.** São Paulo, 1987. 174p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CHIU, G.; LOCKHART, R.; ROUTLEDGE, R. **Bent-Cable Regression Theory and Applications.** Journal of the American Statistical Association, Volume 101, No. 474 (June 2006), pp. 542-553. DOI: 10.1198/016214505000001177.

FERREIRA, Iuri Emmanuel de Paula. **Modelos de regressão e curvas de produção vegetal: aplicações nas áreas de nutrição mineral de plantas e adubação.** Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

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

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

MOLINA, JULIO C.; **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes.** Tese (Doutorado – Programa de pós-graduação e Área de concentração em Engenharia de Estruturas) ) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

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

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

SEBER G. A. F.; WILD, C. J. **Nonlinear regression**. New York: John Wiley. 1989. 768p. (January 2005). DOI: 10.1002/0471725315

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

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

### NORMATIVAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97** - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, ABNT. 1997.

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

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

## APENDICE A

### Rotina do programa R para determinação dos pontos de resistência para cada norma

```
# Leitura de dados #

cp<-read.table("curva de resposta de ensaio.txt",h=TRUE)

#----- Norma brasileira -----#
#Plotagem de curva força "F" por tempo "T" para visualizar ciclos de acomodação#
plot(cp$T,cp$F)

#Definição de valores de truncamento de dados#
Tmin=225 #Valores típicos para ensaio 225 ou 185 segundo direção das fibras#
cp<-cp[cp$T>Tmin,] #truncamento de dados para eliminar ciclos de acomodação#
cp<-cp[cp$D<5.0001,] #truncamento de dados para limite de deslocamento de 5mm#

#Plotagem de curva força "F" por deslocamento "D" para visualizar curva de resposta#
plot(cp$D,cp$F)

#Limpeza de variáveis#
pos=NULL
mf=NULL
md=NULL
i=NULL
dife=NULL
diferences=NULL
mod=NULL
mod2=NULL

#Plotagem de gráfico com legendas#
plot(cp$D,cp$F, ylab= "Força de embutimento [N]", xlab= "Deslocamento [mm]",
cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)

#Ajuste de reta de segmento linear da curva de resposta#
mod=lm(F~D, data=cp[cp$F>500&cp$F<1000&cp$D<3,]) #Valores 500 e 1000 são
correspondentes à  $f_{71}$  e  $f_{85}$  respectivamente. Vide seção 2.1.1#
summary(mod)
abline(c(coef(mod)[1],coef(mod)[2]),col=2) #plotagem de reta de parte linear da
curva#

#Reta paralela ao segmento linear#
reta<-function(d){
  coef(mod)[1]+coef(mod)[2]*(d-.182) } #o valor de deslocamento da reta de
0,182 corresponde ao 2‰ sobre a dimensão pino do corpo de prova (parte
resistiva, acima do pino) de 14.d (com d=6,5 neste estudo)#
curve(reta,seq(0.,2,by=0.01),add=T,col=2) #plotagem de reta paralela#

#suavização de curva, ajuste por modelo linear#
mod2<-lowess(cp$F~cp$D,f=0.01)
lines(mod2, col=4) #plotagem curva suavizada#
mod2

#determinação de ponto de cruzamento entre curva suavizada e reta paralela#
diferences<-1000
```

```

pos<-NULL
for(i in 1:length(cp$D)){
  dife<-reta(cp$D[i]) - cp$F[i]
  if(abs(dife)<abs(diferences)){diferences<-dife; pos<-cp$D[i]} }
diferences
abline(h=reta(pos),col=3) #Plotagem de reta com coordenada horizontal da resposta#
abline(v=pos, col=3)      #Plotagem de reta com coordenada vertical da resposta#

#Obtenção de Resposta#
reta(pos) #valor de força de embutimento#
pos       #valor de deslocamento correspondente#

#----- Norma americana -----#
#Estabelecimento de parametros para determinação de trecho linear da curva #
Fmin=500 #estabelecer segundo método visual, vide seção 2.1.3]#
Fmax=900
Dmin=0
Dmax=3
Tmax=1000

#Plotagem de gráfico com legendas#
plot(cp$D,cp$F, ylab= "Força de embutimento [N]", xlab= "Deslocamento [mm]",
cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)

#Ajuste de reta de segmento linear da curva de resposta#
mod=NULL
mod=lm(F~D, data=cp[cp$F>Fmin&cp$F<Fmax & cp$D>Dmin&cp$D<Dmax &
cp$T<Tmax, ])
summary(mod)
abline(c(coef(mod)[1],coef(mod)[2]),col=2) #plotagem de reta de parte linear da
curva#

#Reta paralela ao segmento linear#
reta<-function(d){
  coef(mod)[1]+coef(mod)[2]*(d-.325) } #o valor de deslocamento da reta de
0,352 corresponde ao 5% do diâmetro do pino (com d=6,5 neste estudo)#
curve(reta,seq(0.,2,by=0.01),add=T,col=2) ) #plotagem de reta paralela#

#suavização de curva, ajuste por modelo linear#
mod2<-lowess(cp$F~cp$D,f=0.01)
lines(mod2, col=4)
mod2

#determinação de ponto de cruzamento entre curva suavizada e reta paralela#
diferences<-1000
pos<-NULL
for(i in 1:length(cp$D)){
  dife<-reta(cp$D[i]) - cp$F[i]
  if(abs(dife)<abs(diferences)){diferences<-dife; pos<-cp$D[i]} }
diferences
abline(h=reta(pos),col=3) #Plotagem de reta com coordenada horizontal da resposta#
abline(v=pos, col=3)      #Plotagem de reta com coordenada vertical da resposta#

#Obtenção de Resposta#
reta(pos) #valor de força de embutimento#
pos       #valor de deslocamento correspondente#

```

```
#----- Norma europeia -----#

#Plotagem de gráfico com legendas#
plot(cp$D,cp$F, ylab= "Força de embutimento [N]", xlab= "Deslocamento [mm]",
cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)

#Limpeza de variáveis#
maiorf<-0
maiord<-0

#Obtenção de ponto de máximo dentro do conjunto de dados de força de embutimento#
for(i in 1:length(cp$F)){
  mf<- cp$F[i]
  md<- cp$D[i]
  if(mf>maiorf){maiorf<-mf; maiord<-md}  }

abline(h=maiorf,col=3) #Plotagem de reta com coordenada horizontal da resposta#
abline(v=maiord,col=3) #Plotagem de reta com coordenada vertical da resposta#

#Obtenção de Resposta#
maiorf #valor de força de embutimento#
maiord #valor de deslocamento correspondente#
```

## APENDICE B

### Rotina do método *bent-cable* no programa R.

```
# BENT CABLE#
#=====
# Obtenção dos valores críticos por bent-cable regression#

# limpeza de variáveis#
rm(list=ls())

# suavização #lowess#
plot(lowess(cp1$F,cp1$D, f = 1/16),type='l',lwd=1,col=2)

#Carregar biblioteca de funções#
library(SiZer)

#implementação do método#
mod<-bent.cable(cp1$F,cp1$D,50)
x.grid <- seq(min(cp1$F), max(cp1$F), length=300)

#visualização gráfico força x deformação com resposta do método#
plot(x.grid, predict(mod, x.grid), col='red',lwd=2,type='l', xlab= "Força de embutimento
[N]", ylab= "Deslocamento [mm]", cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)
points(cp1$F,cp1$D)
mod
abline(v=mod$alpha, col=3)
abline(v=mod$alpha-mod$gamma, col=2)
abline(v=mod$alpha+mod$gamma, col=2)

#Resultados
mod$alpha #Força de embutimento
```

## APENDICE C

### Rotina do método *broken-stick* no programa R.

```
# BROKEN STICK
#=====

# Ajuste de modelo
#=====
x=NULL
y=NULL
x<-cp1$F
y<-cp1$D

# Algoritmo para regressão segmentada contínua#

vi<-function(x,y){
  N <- length(x) # number of sampled points#
  K <- 1 # number of knots

  piece.formula <- function(var.name, knots) {
    formula.sign <- rep(" - ", length(knots))
    formula.sign[knots < 0] <- " + "
    paste(var.name, "+",
          paste("I(pmax(", var.name, formula.sign, abs(knots), ", 0))",
                collapse = " + ", sep=""))
  }

  # Variando os pontos de mudança #
  niveis<-as.numeric(levels(as.factor(x)))
  results<-NULL
  for(j in 2:(length(niveis)-2)){
    knots <- c(niveis[j])
    model <- lm(formula(paste("y ~", piece.formula("x", knots))))
    results<-rbind(results,cbind(j,knots[1],summary(model)[[6]]))
  }
  results

  results<-results[order(results[,3]),1:3]
  head(results)

  # Chutes iniciais para os knots
  (knots<-results[1,2])
  model <- lm(formula(paste("y ~", piece.formula("x", knots))))
  summary(model)
  coe<-as.numeric(coef(model))

  # obtendo os coeficientes
  (alpha1<-coe[1])
  (beta1<-coe[2])
  (beta2<-coe[2] + coe[3])
  (alpha2<-alpha1 + beta1*knots[1] - beta2*knots[1])
  return(c(alpha1,beta1,alpha2,beta2,knots[1],summary(model)[[6]]))
}
```



```
# Implementação do modelo#
#=====

# atribuição variável #
vec=NULL
(vec<-vi(cp1$F,cp1$D))

# visualização de força de embutimento x deslocamento mais resposta do método#
plot(cp1$F,cp1$D, xlab= "Força de embutimento [N]", ylab= "Deslocamento [mm]",
cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)
abline(vec[1],vec[2],col=2,lwd=2)
abline(vec[3],vec[4],col=2,lwd=2)
abline(v=vec[5], col=3)
deslocamento=NULL
deslocamento<- (vec[5]*vec[2]+vec[1])
abline(h=deslocamento, col=3)

#Resultados #
vec[5] #Força de embutimento
deslocamento #deslocamento correspondente
```

## APENDICE D

### Rotina do método proposto no programa R.

```

# Método Proposto
#=====
x=NULL
y=NULL
x<-cp1$F
y<-cp1$D

#definição função#
max.inf<-function(ini,x,y){
  res<-NULL
  for(i in ini:length(x)){
    # Critério da Máxima Informação
    mod<-lm(y[1:i]~x[1:i])
    det.mat<-det(solve(vcov(mod)))
    res<-rbind(res,c(x[1+i],det.mat))
  }
  return(res)
}

x=NULL
y=NULL
x<-cp1$F
y<-cp1$D
res.cp1<-max.inf(ini=5,x,y)
par(mfrow=c(1,2))

#Gráfico do Coeficiente de determinação#
plot(res.cp1, xlab= "Número de pontos de resposta", ylab= "Coeficiente de
determinação R2", cex.axis=1.3, cex.lab= 1.5)
#suavização de curva
lines(lowess(res.cp1[,1],res.cp1[,2], f = 1/16, delta=1),type='l',lwd=1,col=2)

abline(v=max,col=3) #linha de ponto de máximo#

(approx.cp1<-approxfun(res.cp1[,1],res.cp1[,2]))
t<-seq(1300,2000,0.01)
lines(t,approx.cp1(t))
max<-c(0,0)
for(j in t){
  if(max[2]<approx.cp1(j)){max<-c(j,approx.cp1(j))}
}
max
res.cp1

#Gráfico de Força de embutimento x deslocamento com resposta do método#
plot(x,y, xlab= "Força de embutimento [N]", ylab= "Deslocamento [mm]", cex.axis=1.3,
cex.lab= 1.5)
abline(v=max[1],col=3)

#Resultados #
max[1] #Força de embutimento

```