



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

CRISTOFER BERNARDI SCREMIM CÓDIGO: 969702

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VOLUME 1 DE 1

CURITIBA

2º SEMESTRE DE 2012

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

CRISTOFER BERNARDI SCREMIM

**AVALIAÇÃO SOBRE A DIFERENÇA DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO CERNE E DO ALBURNO DE MESMAS ESPÉCIES
DE MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

CRISTOFER BERNARDI SCREMIM

**AVALIAÇÃO SOBRE A DIFERENÇA DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO CERNE E DO ALBURNO DE UMA MESMA
ESPÉCIE DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção Civil, do
Departamento de Construção Civil /
DACOC, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Elisabeth Penner
Co-orientadora: Eng^a. Esp^a. Jacqueline
Colucci Stella

CURITIBA

2013

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO SOBRE A DIFERENÇA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CERNE E DO ALBURNO DE UMA MESMA ESPÉCIE DE MADEIRA

Por

CRISTOFER SCREMIM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 12 de abril de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

Profa. Orientadora – Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profa. Jacqueline Colucci Stella, Esp.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse realizado. A todos vocês o meu sincero muito obrigado.

À UTFPR por tornar possível a realização desse trabalho.

Ao empenho e colaboração do chefe do laboratório de materiais, Gustavo Macioski bem como a gentileza do Prof.Dr. José Alberto Cerri responsável pelo NPT - Núcleo de Pesquisas Tecnológicas, desta universidade por ceder as instalações dos laboratórios para complementação dos ensaios.

A minha co-orientadora Eng^a. Esp^a. Jacqueline Collucci Stella pela atenção e colaboração.

E finalmente a minha orientadora Prof^a. Dr^a Elisabeth Penner pelo excelente embasamento teórico repassado em sua disciplina, pela motivação, paciência e dedicação durante toda essa empreitada.

RESUMO

SCREMIM, Cristofer Bernadi. **Avaliação sobre a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de mesmas espécies de madeira.** 2013. 95f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Para esse estudo, foram utilizadas três espécies de madeira, sendo duas delas dicotiledôneas e uma conífera. O objetivo principal foi avaliar a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de cada espécie de madeira. Na parte experimental, foram executados os ensaios de compressão paralela às fibras conforme a NBR 7190/97, já os ensaios de compressão normal e flexão simples necessitaram de algumas adaptações. Como resultado, pode-se destacar que a diferença de resistência mecânica entre o cerne e o alburno de uma mesma espécie de madeira não é significativa a ponto de classificá-la como madeira de primeira categoria sem adotar a metodologia convencional pela NBR 7190/97.

Palavras-chave: Cerne e alburno; Propriedades mecânicas da madeira; Estruturas de madeira.

ABSTRACT

SCREMIM, Cristofer Bernardi. **Evaluation of the difference in mechanical properties of heartwood and sapwood of the same species of wood.** 2013. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2013.

In this research were used three kinds of wood: two hardwoods and one softwood. The main purpose was evaluating the difference between heartwood and sapwood mechanical properties in each kind of wood. In the experiments were performed tests of parallel compression to fibers, according NBR 7190/97; in the normal compression test and the simple bending tests were necessary some adaptations. As result, it can be noted that the difference between mechanical resistances of heartwood and sapwood in a same species is not relevant to classify it as first class wood, without adopt the methodology established by Brazilian Standard NBR 7190/97.

Keywords: Heartwood and Sapwood; Wood Mechanical Properties; Timber Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Estrutura Celular: Coníferas.....	20
Figura 2- Estrutura celular: Dicotiledôneas.....	20
Figura 3-Seção transversal do tronco de uma árvore	21
Figura 4–Alburno e Cerne.	22
Figura 5-Planos fundamentais da madeira.....	23
Figura 6-Principais eixos da madeira	26
Figura 7-Influencia da retração em cada direção da madeira.	29
Figura 8-Diagramas de retração ou inchamento de três espécies vegetais, em função do grau da umidade linear. (a) Perspectiva da madeira; (b) Diagrama de retração ou inchamento linear (1) Carvalho brasileiro; (2) Eucalipto; (3) Araucária.	30
Figura 9- Idealização dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e KAR marginal.	33
Figura 10-Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão.....	46
Figura 11-Ensaio de determinação da resistência à compressão normal às fibras.	47
Figura 12-Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.	48
Figura 13-Esquema do ensaio para a determinação da resistência à flexão	49
Figura 14-Esquema de carregamento e considerações para obtenção da equação da linha elástica em uma viga em balanço.....	50
Figura 15-Corpo de prova compressão paralela e normal às fibras.....	54
Figura 16-Corpo de prova flexão simples.....	54
Figura 17-Ensaio Flexão Simples Reta	56
Figura 18– Convenção adotada para definir as dimensões do corpo de prova e equação do momento de inércia da viga.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Ações variáveis	35
Tabela 2-Classes de Carregamento.....	36
Tabela 3-Classes de umidade.....	38
Tabela 4-Coníferas - Valores de Referência U=12%	38
Tabela 5-Dicotiledôneas - Valores de Referência U=12%	38
Tabela 6-Valores do coeficiente de modificação k_{mod1}	40
Tabela 7-Valores do coeficiente de modificação $k_{mod,2}$	41
Tabela 8-Parâmetros para execução do ensaio de compressão paralela às fibras.	45
Tabela 9- Parâmetros para execução do ensaio de compressão normal às fibras.	48
Tabela 10- Parâmetros para execução do ensaio de flexão simples.	49
Tabela 11-Nome comercial, nome científico, classe de resistência e origem	53
Tabela 12-Obtenção do Momento de Inércia Cambará alburno.....	57
Tabela 13-Resultados ensaio de flexão simples - Cambará alburno	57
Tabela 14-Obtenção do Momento de Inércia Cambará cerne.....	58
Tabela 15-Resultados ensaio de flexão simples - Cambará cerne	58
Tabela 16-Obtenção do Momento de Inércia <i>Eucalyptus Dunnii</i> alburno.....	58
Tabela 17-Resultados ensaio de flexão simples - <i>Eucalyptus Dunnii</i> alburno	59
Tabela 18-Obtenção do Momento de Inércia <i>Eucalyptus Dunnii</i> cerne.....	59
Tabela 19-Resultados ensaio de flexão simples - <i>Eucalyptus Dunnii</i> cerne	59
Tabela 20-Obtenção do Momento de Inércia Araucária alburno	60
Tabela 21-Resultados ensaio de flexão simples - Araucária alburno.....	60
Tabela 22-Obtenção do Momento de Inércia Araucária cerne.....	60
Tabela 23-Resultados ensaio de flexão simples - Araucária cerne.....	60
Tabela 24-Resultados ensaio de flexão simples reta -Resumo Geral.....	61
Tabela 25-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará	62
Tabela 26-Resumo dos resultados ensaio de compressão paralela às fibras – Cambará.....	63
Tabela 27-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras - <i>Eucalyptus Dunnii</i> Saturado.....	64
Tabela 28-Resumo dos resultados ensaio de compressão paralela às fibras – <i>Eucalyptus Dunnii</i>	65
Tabela 29--Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária ...	66
Tabela 30-Resumo dos resultados ensaio de paralela normal às fibras – Araucária	67
Tabela 31-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras - Cambará	68
Tabela 32-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras – Cambará.....	69
Tabela 33-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – <i>Eucalyptus Dunnii</i>	70
Tabela 34-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras - <i>Eucalyptus Dunnii</i>	71
Tabela 35-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará.....	72

Tabela 36-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras – Cambará.....	73
Tabela 37-Relação Cerne x Alburno à Umidade Ambiente	74
Tabela 38-Relação Cerne x Alburno Totalmente Saturado	75
Tabela 39-Comparativo Cerne x Alburno Módulo de Elasticidade	75
Tabela 40-Comparativo dos resultados dos ensaios com os valores fornecidos pela NBR7190/97	76
Tabela 41-Análises Ensaio de Flexão Simples Reta.....	77
Tabela 42-Resumo Ensaio de Flexão Simples Reta - Análise $k_{mod,2}$	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará	61
Gráfico 2-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará Saturado.....	62
Gráfico 3-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – <i>Eucalyptus Dunnii</i>	63
Gráfico 4-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – <i>Eucalyptus Dunnii</i> Saturado.....	64
Gráfico 5-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária	65
Gráfico 6-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária Saturado.....	66
Gráfico 7-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará	67
Gráfico 8- Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará Saturado.....	68
Gráfico 9-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – <i>Eucalytus Dunnii</i>	69
Gráfico 10-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – <i>Eucalytus Dunnii</i> -Saturado	70
Gráfico 11-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras - Araucária	71
Gráfico 12-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Araucária Saturado.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COPANT	Comissão Pan-americana de Normas Técnicas
CP	Corpo de Prova
EMIC	Marca da Prensa
NBR	Norma Brasileira
NP	Norma Portuguesa
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de Elasticidade do Material
σ	Tensão de compressão
ρ	Densidade
S_d	Solicitações de projeto
R_d	Resistência do material
$f_{U(\%)}$	Resistência na condição de Umidade U (%)
$E_{U(\%)}$	Módulo de elasticidade longitudinal na condição de umidade U (%)
$f_{c0,k}$	Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras
$f_{v0,k}$	Valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$E_{c0,m}$	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
$k_{mod,i}$	Coefficientes de modificação
γ_w	Coefficiente de minoração das propriedades da madeira
$f_{t,0}$	Resistência à tração paralela às fibras

SUMÁRIO

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.....	4
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 ANATOMIA DA MADEIRA.....	18
2.1.1 Estrutura da madeira.....	18
2.1.2 Classificação das madeiras	19
2.1.3 Estrutura Macroscópica.....	21
2.1.4 Componentes do lenho.....	21
2.1.5 Anatomia do tecido lenhoso.....	23
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS QUE AFETAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	24
2.2.1 Massa específica	24
2.2.2 Durabilidade natural	25
2.2.3 Anisotropia da madeira.....	25
2.2.4 Higroscopia	26
2.2.5 Teor de umidade.....	26
2.2.6 Tipos de água existente na madeira.....	28
2.2.7 Contração e inchamento da madeira	29
2.2.8 Defeitos naturais	30
2.2.8.1 Grã.....	31
2.2.8.2 Nós.....	31
2.2.8.3 Rachaduras	33
2.2.8.4 Colapso	34
2.2.8.5 Defeitos de desdobro.....	34
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	34
2.3.1 Critérios de norma para a determinação da resistência de cálculo da madeira.....	34
2.3.2 Condições de referência.....	37
2.3.3 Classes de resistência	38
2.3.4 Valores de cálculo	39
2.3.4.1 Valores de γ_w	39
2.3.4.2 Valores de $k_{mod,i}$	40
2.3.4.3 Valores de $k_{mod,1}$	40
2.3.4.4 Valores de $k_{mod,2}$	41
2.3.4.4 Valores de $k_{mod,3}$	41

2.3.5	Espécies conhecidas.....	41
2.3.6	Estimativas para os valores característicos das resistências segundo a NBR 7190:1997	42
2.3.7	Estimativa dos parâmetros de rigidez	42
2.3.8	Caracterização das madeiras	42
2.3.8.1	Caracterização completa da resistência da madeira.....	43
2.3.8.2	Caracterização simplificada da resistência da madeira	43
2.3.8.3	Caracterização da rigidez da madeira	43
2.4	ENSAIOS PROPOSTOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL FÍSICA	44
2.4.1	Ensaio estático de compressão paralela às fibras	44
2.4.2	Ensaio estático de compressão normal às fibras	46
2.4.3	Ensaio estático de flexão simples	49
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	52
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1.1	Espécies de madeira.....	52
3.1.2	Confecção dos corpos de prova.....	53
3.1.3	Classificação dos corpos de prova	54
3.1.4	Procedimento de secagem e saturação dos corpos de prova	54
3.2	ENSAIOS ESTÁTICOS REALIZADOS.....	55
3.2.1	Compressão paralela às fibras da madeira.....	55
3.2.2	Compressão normal às fibras da madeira.....	55
3.2.3	Flexão simples reta	55
4	RESULTADOS.....	57
4.1	FLEXÃO SIMPLES RETA	57
4.1.1	Cambará.....	57
4.1.2	<i>Eucalyptus Dunnii</i>	58
4.1.3	Araucária	60
4.1.4	Resumo resultados flexão simples reta	61
4.2	COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	61
4.2.1	Cambará.....	61
4.2.2	<i>Eucalyptus Dunnii</i>	63
4.2.3	Araucária	65
4.3	COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS.....	67
4.3.1	Cambará.....	67
4.3.2	<i>Eucalyptus Dunnii</i>	69
4.3.3	Araucária	71
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
5.1	Comparativo Cerne x Alburno.....	74
5.2	Resistência e Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela às Fibras	76
5.3	Resistência na Compressão Normal às Fibras	76
5.4	Ensaio de Flexão Simples Reto	77

5.5	Relação Madeira Totalmente Saturada.....	79
5.5.1	Para os ensaios de Compressão Paralela e Normal às Fibras da Madeira.....	79
5.5.2	Para os ensaios de Flexão Simples	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
6.1	CONCLUSÕES.....	80
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
	APÊNDICE A.....	85
	APÊNDICE B.....	86
	APÊNDICE C	87
	APÊNDICE D	88
	APÊNDICE E.....	89
	APÊNDICE F.....	90
	APÊNDICE G	91
	APÊNDICE H	92
	APÊNDICE I.....	93
	APÊNDICE J	94
	APÊNDICE K.....	95
	APÊNDICE L.....	96

1 INTRODUÇÃO

Como citado por KROETZ, *et al.* (2012), quando se aborda o tema desempenho estrutural, seja de qualquer material, é inevitável a ligação com o tema confiabilidade, pondo em questão critérios necessários para garantir segurança aos usuários de uma determinada estrutura, bem como ainda atender a requisitos mínimos de viabilidade econômica e estética.

Alcançar um desempenho satisfatório dos elementos de madeira depende basicamente da escolha de uma resistência mecânica adequada e uma durabilidade suficiente, natural ou alcançada através de um tratamento levando em consideração as condições de serviço e de risco, na qual os elementos ficarão expostos. Embora a resistência mecânica e durabilidade sejam as características mais notáveis, os critérios de definição da qualidade do material não se restringem a esses fatores. A escolha do tipo de madeira deve considerar a variabilidade das propriedades físico-mecânicas, levando em conta a espécie, de forma a garantir um nível de desempenho adequado para a utilização almejada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é o de avaliar, por meio de investigações experimentais físicas, a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de uma mesma espécie de madeira.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a validade dos resultados dos ensaios estáticos de flexão simples reta com corpos de prova de dimensões reduzidas para a determinação do Módulo de Elasticidade (E);

- Comparar os resultados dos ensaios de compressão normal às fibras utilizando o método sugerido pela norma COPANT 30:1-011 e comparar com os resultados sugeridos pela NBR 7190/97.
- Verificar a compatibilidade da relação sugerida pela NBR 7190/97 no que se refere à resistência do elemento estrutural quando totalmente saturado para o caso específico deste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

A NBR 7190/97 propõe para o dimensionamento, coeficientes de modificação, que são responsáveis por ajustar os valores da resistência de cálculo em função de alguns parâmetros não englobados pelo coeficiente de segurança. Tais coeficientes abrangem fatores como classe de carregamento, de umidade e qualidade do material utilizado. No que arremete à qualidade da madeira, há uma redução severa de resistência de cálculo quando avaliada como de segunda categoria. Esses critérios obrigam ao projetista a adotar elementos mais robustos, o que acaba em grande parte a inviabilizar a utilização da madeira como base, ou pelo menos a deixando menos atraente frente a outros materiais como aço ou concreto armado.

Para os ensaios de flexão simples reta, a NBR 7190/97 sugere a execução do ensaio utilizando corpos de prova com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento, na direção paralela às fibras, de 115 cm. Esse fator de certa forma dificulta a execução dos ensaios por necessitar de grande quantidade de material e de uma estrutura mais completa de marcenaria. Já os ensaios de compressão normal às fibras seguindo a norma COPANT 30:1-011 tem o diferencial de sugerir a execução do procedimento com corpos de prova idênticos aos utilizados para compressão paralela, segundo a NBR 7190/97.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será feita uma abordagem sobre a estrutura anatômica da madeira. Por conseguinte, será dado um enfoque especial às propriedades mecânicas que deverão ser investigadas, também serão abordadas as propriedades físicas que afetam as propriedades mecânicas da madeira e por fim a descrição dos ensaios realizados na investigação experimental.

As propriedades mecânicas abordadas assim como as considerações utilizadas para a execução dos experimentos terão como principal referência a NBR 7190/97.

2.1 ANATOMIA DA MADEIRA

2.1.1 Estrutura da madeira

A madeira é um material heterogêneo natural que possui diferentes tipos de células, adaptadas a desempenhar funções específicas. Essas células dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal, ligadas entre si pela lignina, formam o tecido lenhoso. As variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira são grandes entre as espécies, ocorrendo variações também dentro de uma mesma espécie, principalmente em função da idade, de fatores genéticos e ambientais. Há também diferenças entre o cerne e alburno, madeira de início e fim de estação de crescimento e, em escala microscópica, entre células individuais (COSTA,2001).

BESSA (2009) destaca que para a aplicação deste material se viabilizar, há uma necessidade de que suas propriedades atinjam determinados valores de referência, sendo que estas propriedades estão intimamente ligadas à sua composição e estrutura interna.

O comportamento mecânico da madeira está intimamente associado a sua estrutura celular. A anatomia da madeira é ramo o da ciência botânica que procura conhecer o arranjo estrutural dos diversos elementos constituintes do lenho. A madeira é um produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, localizado em geral no tronco e galhos das árvores, com células especializadas na sustentação e

condução de seiva. O xilema é um tecido estruturalmente complexo composto por um conjunto de células com forma e função diferenciadas e é o principal tecido condutor de água nas plantas vasculares. Possui ainda as propriedades de ser condutor de sais minerais, armazenar substâncias e sustentar o vegetal (COSTA, 2001).

2.1.2 Classificação das madeiras

De acordo com COSTA (2001), botanicamente, estão contidas na Divisão das Fanerógamas. Estas, por sua vez, se subdividem em Gimnospermas e Angiospermas.

Nas Gimnospermas, a classe mais importante é a das Coníferas, também designadas na literatura internacional como *softwoods*, ou seja, madeiras moles. Nas árvores classificadas como Coníferas, as folhas em geral são perenes, têm formato de escamas ou agulhas. São árvores típicas dos climas temperados e frios, embora existam algumas espécies tropicais, de acordo com registros de Hellmeister (1983). Nas coníferas, em geral, as folhas são perenes e têm formato de escamas ou agulhas. Em particular no hemisfério norte, com grandes áreas de florestas, as resinosas fornecem madeira para múltiplos usos, seja na construção civil, seja na indústria dos mais diferentes segmentos. Os estudos de Harlow e Harrar (1958) apontam mais de quinhentas espécies de coníferas já classificadas.

De acordo com FIGUEROA (2012), a organização das células das coníferas é bastante simples. É composta principalmente por células denominadas traqueídeos longitudinais, orientadas no sentido do eixo da árvore. Alguns dos seus principais elementos são: células na direção longitudinal e transversal, células epiteliais, canal resinífero e raio unisseriado. Esses elementos são apresentados na Figura 1.



Figura 1-Estrutura Celular: Coníferas

Fonte: Adaptado KOLMANN; COTÉ (1968) *apud* (FIGUEIROA, 2012)

Nas Angiospermas, os mais organizados vegetais, distinguem-se as dicotiledôneas, usualmente designadas na literatura internacional como hardwoods, ou seja, madeiras duras (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). O pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*) é o principal representante dessa classe no Brasil, já as dicotiledôneas são muito consagradas no mercado madeireiro brasileiro, pode-se destacar: Aroeira do Sertão (*Astronium urundeuva*), Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Ipê (*Tabebuia serratifolia*), Mogno (*Swietenia macrophylla*), Cedro (*Cedrella fissilis*), Imbuia (*Ocotea porosa*), Cambará (*Erisma* sp), etc (COSTA, 2001).



Figura 2- Estrutura celular: Dicotiledôneas

Fonte: Adaptado KOLMANN; COTÉ (1968) *apud* (FIGUEIROA, 2012)

2.1.3 Estrutura Macroscópica

Na árvore, a madeira desempenha três funções: suprimento da planta em seiva bruta ascendente, estocagem de reserva e sustentação. A árvore cresce inicialmente no sentido vertical. Em cada ano há um novo crescimento vertical e a formação de camadas sucessivas vai se sobrepondo ao redor das camadas mais antigas. Num corte transversal do tronco, essas camadas aparecem como anéis de crescimento. A madeira formada no período de primavera-verão tem coloração mais clara, com células de paredes mais finas, devido ao intenso crescimento nessa fase. A madeira formada no período de outono-inverno é mais escura, apresenta células pequenas e crescimento lento (COSTA, 2001).

A Figura 03 apresenta a seção transversal do tronco. Nela podem ser observados, do centro para a periferia, o cerne, o albúrnio e a casca. Entre a casca e o albúrnio, encontra-se uma região denominada câmbio, visível somente por meio de microscópio.

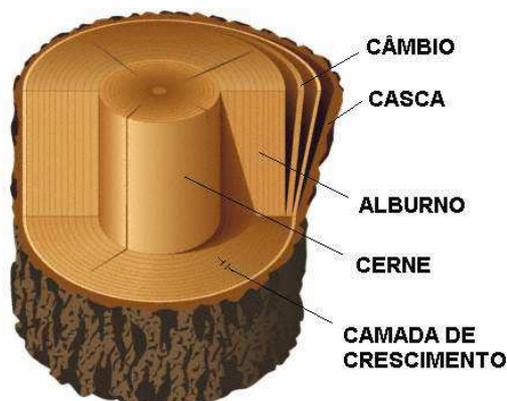


Figura 3-Seção transversal do tronco de uma árvore
Fonte: (COSTA, 2001).

2.1.4 Componentes do lenho

Tanto em coníferas quanto em dicotiledôneas, o lenho é dividido em dois componentes, cada uma com sua respectiva função. A porção em que as células que compõem o lenho ainda estão vivas e metabolicamente ativas é denominado albúrnio. Uma definição amplamente utilizado é que o albúrnio é a

região do lenho que possui cor mais clara e está mais próxima à casca (COSTA, 2001). Já o cerne é a porção mais escura de madeira centralizada, como mostrado na Figura 4.

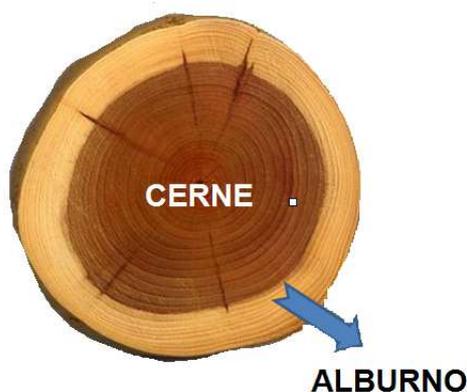


Figura 4—Alburno e Cerne.

Fonte: Adaptado de: Seção de um tronco de árvore; disponível em<http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2009-1/casa_madeira/cortes.htm>; [18 de dezembro de 2012].

O alburno é responsável não só pela condução de seiva, mas também para o armazenamento e síntese de compostos bioquímicos. Células vivas do alburno são também os agentes de formação de cerne. A transição de alburno para cerne é contínua ao longo da vida da árvore, bem como a quantidade de alburno próxima a casca também aumenta. As células vivas na fronteira entre cerne e alburno são responsáveis pela formação e deposição de produtos químicos de cerne (FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010). Os extrativos, resultado da deposição de materiais no cerne, são formados por células do parênquima na fronteira do cerne-alburno, através de exsudação em cavidades de células adjacentes. Também são responsáveis por conferir melhores características para a madeira. Tendo como exemplo, uma maior durabilidade natural e resistência a agentes xilófagos. Resumidamente, existem três formas de apresentação da composição da madeira, sendo elas árvores de alburno sem a formação do cerne; árvores com alburno e cerne indistintos pela cor e, finalmente, árvores com o cerne sempre mais escuro (COSTA, 2001).

2.1.5 Anatomia do tecido lenhoso

A principal diferença entre as dicotiledôneas e as coníferas reside em sua estrutura celular. Para cada caso, existe uma maneira distinta do cambio formar a madeira. Tanto na horizontal, quanto na vertical, existem sistemas de tecidos que percorrem a árvore. Para visualizar melhor esses sistemas, é necessário subdividir em três tipos de cortes: transversal, radial e tangencial. Como indicado na Figura 5.

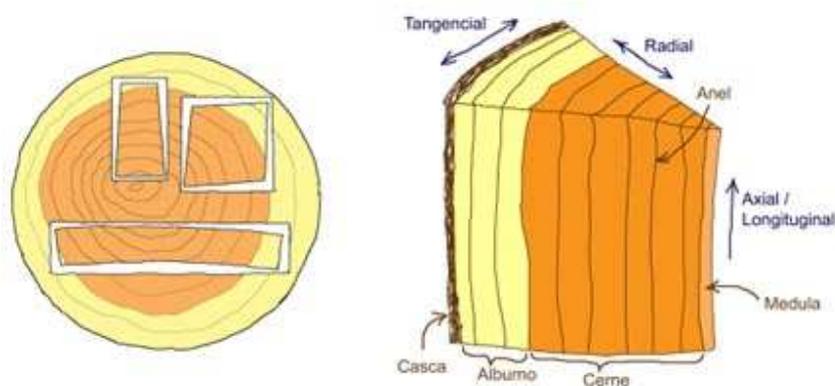


Figura 5-Planos fundamentais da madeira.

Fonte: Planos Fundamentais da Madeira [imagem online]. Disponível em: <http://www.madeiras.cc/secagemda%20madeira.html> [Acessado 18 dez 2012].

Segundo Mallan (1995), as variações no sentido radial são a fonte de variação mais importante, sendo determinadas pela proporção de madeira juvenil e suas propriedades físico-mecânicas ao longo do tronco.

Os raios vasculares aparecem muito diferentes nessas três vistas. O sistema vertical compreende os elementos traqueais, fibras e parênquima axial do xilema. No lenho das gimnospermas não estão presentes os vasos e o lenho consiste de traqueídeos, fibras e parênquima, sendo de estrutura bastante uniforme (BURGER & RICHTER, 1991).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS QUE AFETAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.2.1 Massa específica

A massa específica está relacionada diretamente ao volume de vazios do material. Sendo assim, ao aumentar a massa específica, tem-se um ganho de resistência mecânica. Existe uma flutuação desses valores, podendo ser causada por diferença entre espécies, dentro de uma mesma espécie ou até mesmo dentro de uma árvore. Devido a esta variação, a resistência mecânica de uma árvore jovem é bem inferior a de uma árvore adulta. Diferentes níveis de variação da densidade da madeira ocorrem da mesma forma, no tronco, em espécies de folhosas e coníferas (BODIG; JAYNE, 1993).

A NBR 7190/97 apresenta duas definições de densidade a serem utilizadas em estruturas de madeira: a densidade básica e a densidade aparente. A densidade básica da madeira é definida como a massa específica, obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado. A densidade aparente é determinada para uma umidade padrão de referência de 12%, pode ser utilizada para classificação da madeira e nos cálculos de estruturas e está apresentada na equação 01.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

ρ é a densidade aparente

m é a massa seca e

V é o volume da madeira a 12% de umidade.

A densidade da madeira, assim, como a rigidez, é sensivelmente afetada pelo teor de umidade. Todavia, o efeito da umidade na rigidez é muito mais expressivo do que na densidade (PFEIL, 2003).

2.2.2 Durabilidade natural

A durabilidade da madeira, com relação à biodeterioração, depende da espécie e das características anatômicas. É influenciada de acordo com a região da tora da qual a peça de madeira foi extraída, pois, o cerne e o alburno apresentam características diferentes, com o alburno sendo muito mais suscetível ao ataque biológico. A baixa durabilidade natural de algumas espécies pode ser compensada por um tratamento preservativo adequado às peças, chegando a resultados próximos dos apresentados pelas espécies naturalmente resistentes. (PFEIL, 2003).

2.2.3 Anisotropia da madeira

Em uma mesma espécie de madeira, em virtude de fatores genéticos e ambientais que influenciam no crescimento das árvores, há variabilidade das características mecânicas à medida que o tecido lenhoso varia tanto na sua posição em relação ao eixo do tronco, quanto na sua localização em relação ao solo, na altura do tronco. As propriedades mecânicas da madeira variam segundo a direção ou plano onde são aplicados os esforços mecânicos. Para utilização como elemento estrutural, a madeira pode ser considerada ortotrópica, ou seja, com 3 direções preferenciais de elasticidade. A resistência na direção tangencial é tomada como irrelevante, restando dessa forma, a direção longitudinal, com solicitações paralelas e normais as fibras e a radial que corta os anéis de crescimento, quando se considera a seção transversal submetida à flexão (MADY, 2000).

Segundo PFEIL (2003) a diferença entre as direções tangencial e radial raramente tem importância prática, sendo necessário diferenciar as propriedades na direção das fibras principais longitudinalmente à peça e na perpendicular às mesmas. A Figura 6 ilustra o modelo em um segmento de tronco de madeira.

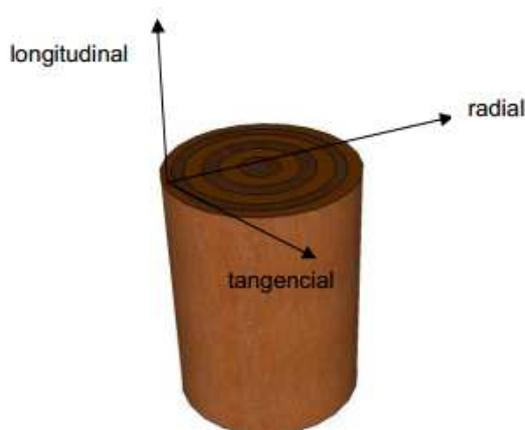


Figura 6-Principais eixos da madeira
Fonte: Autoria Própria

2.2.4 Higroscopia

A madeira tem a capacidade de perder e absorver umidade com facilidade, o que a caracteriza como um material higroscópico. A queda na resistência com a saturação do tecido lenhoso é explicada pelo comportamento dos principais constituintes da madeira quando absorvem água. As propriedades físicas também são afetadas pela umidade e por ela ser um sólido ortotrópico do ponto de vista elástico. Sendo um material higroscópico e estar sujeita a alterações no teor de umidade em função das variáveis do meio ambiente, ela está quase sempre perdendo ou ganhando umidade para atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera. A umidade de equilíbrio atingida pela madeira depende, principalmente, da umidade relativa do ar e de sua temperatura (COSTA, 2001).

2.2.5 Teor de umidade

A madeira é um material altamente higroscópico, retraindo-se e inchando-se com a variação da umidade ambiente. Essa variação no teor de umidade afeta a geometria das peças em serviço e as características de resistência mecânica dos elementos estruturais (FIGUEROA, 2012).

A determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e

utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, caracterizados por empenamentos e fendilhamentos. De acordo com Simpson e Tenwolde consultados por Figueiroa (2012), o teor de umidade da madeira na árvore pode variar de 31% a 249% no cerne e de 40% a 213% no alburno.

Segundo COSTA (2001), quando a árvore é cortada, ela tende a perder rapidamente a água livre existente em seu interior para aí então iniciar o lento processo de remoção da água de impregnação. A umidade na madeira tende a um equilíbrio em função da umidade e temperatura do ambiente em que se encontra, sendo denominada madeira seca ao ar. O teor de umidade correspondente ao mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação é denominado de ponto de saturação das fibras.

Devido à higroscopicidade da madeira, o grau de uma peça estrutural em serviço pode variar continuamente, ficando dependente dos fatores como a umidade ambiente e a estação do ano. A perda de água na madeira até o ponto de saturação das fibras por si só não prejudica o elemento estrutural de madeira. Entretanto, ao se atingir valores acima desse ponto, a perda de umidade é acompanhada pela retração e aumento da resistência, que podem ser benéficas ou prejudiciais ao material, variando com as condições a qual foram realizados (PFEIL, 2003).

De acordo com PFEIL (2003) o grau de umidade é o peso de água contido na madeira, que é expresso como uma porcentagem do peso da madeira seca em estufa P_s . A umidade da madeira é determinada pela expressão:

$$U(\%) = \frac{P_i - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Eq.02})$$

Onde:

P_i é a massa úmida;

P_s é a massa seca e;

U é a umidade (%).

O teor de umidade na madeira, contudo, tem forte influência na sua resistência mecânica, pois quase todas as suas propriedades mecânicas são alteradas com a saturação progressiva do tecido lenhoso (MADY, 2000).

A NBR 7190/1997 apresenta em seu anexo B, um roteiro detalhado para a determinação da umidade de amostras de madeira. .

Para fins de aplicação estrutural da madeira e para classificação de espécies, a NBR 7190/1997 especifica, a umidade de 12% como de referência para a realização de ensaios e valores de resistência nos cálculos.

2.2.6 Tipos de água existente na madeira

De acordo com Skaar *apud* por Figueroa (1972) existem dois tipos de água na madeira: a água livre ou capilar, localizada nos espaços intercelulares, retida por forças capilares, e a água de impregnação ou higroscópica, ligada por forças físico-químicas. Na secagem da madeira, a água livre é a primeira a ser removida. As forças que mantêm ligada a água livre são menores do que as forças que mantêm a água de impregnação existente na parede celular.

Segundo Kollmann (1959) *apud* Figueroa (2012) a perda da água capilar gera uma redução de peso na madeira, fato que pode ser explicado pelo teor de umidade superior ao ponto de saturação das fibras. O ponto de saturação das fibras varia, normalmente, entre 25% e 35% de umidade em relação ao peso seco do material. As variações dimensionais da madeira manifestam-se apenas abaixo desse valor. A água de impregnação dentro do intervalo de 6% a 28% é adsorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças eletrostáticas.

Abaixo deste teor de umidade (0%–6%), encontra-se a água de adsorção físico-química, aderida às interfaces entre as moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias Van der Waals e pontes de hidrogênio (BODIG; JAYNE, 1993).

2.2.7 Contração e inchamento da madeira

Esses fenômenos são referentes às alterações na quantidade de água de impregnação na madeira. A contração ocorre abaixo do ponto de saturação das fibras e o inchamento ocorre acima do ponto de saturação das fibras. Durante o processo de secagem da madeira, a maior alteração dimensional da madeira se manifesta no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pela dimensão radial, sendo praticamente desprezível no sentido longitudinal PANSHIN; DE ZEEUW, (1980) *apud* LOBÃO *et al.* (2004). A Figura 7 mostra o efeito descrito.

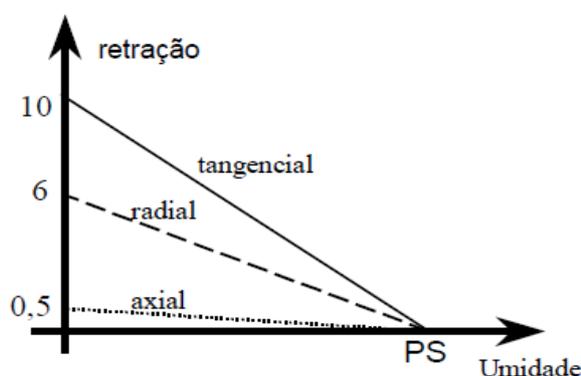


Figura 7-Influência da retração em cada direção da madeira.
Fonte: GESUALDO (2003).

Essa variação dimensional é aproximadamente linear, sendo um fenômeno mais importante na direção tangencial. Para redução da umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retração na direção radial é cerca da metade da direção tangencial. Na direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,3% da dimensão verde, para secagem de 30% a 0%. A retração volumétrica é aproximadamente igual à soma das três retrações lineares ortogonais (PFEIL, 2003). Como mostrado na figura 08.

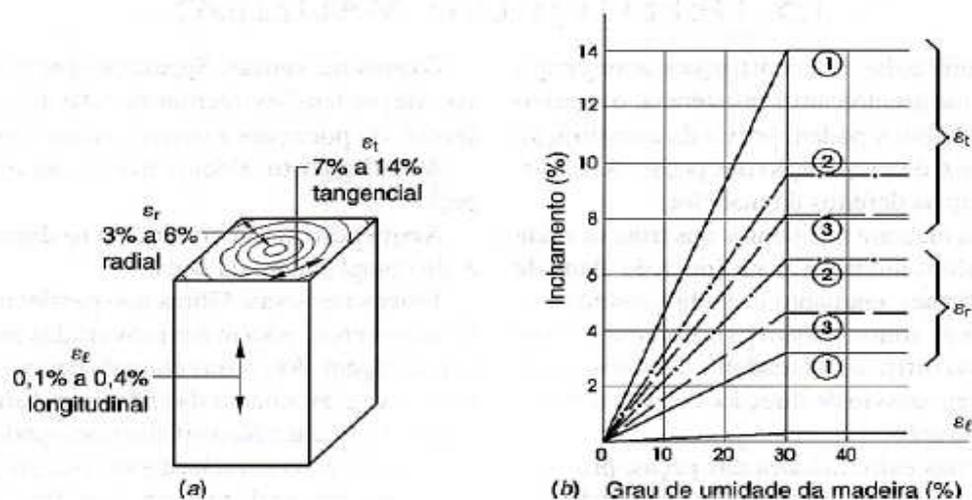


Figura 8-Diagramas de retração ou inchamento de três espécies vegetais, em função do grau da umidade linear. (a) Perspectiva da madeira; (b) Diagrama de retração ou inchamento linear (1) Carvalho brasileiro; (2) Eucalipto; (3) Araucária. Fonte: PFEIL, 2003.

Segundo Durlo e Marchiori (1992), a contração e o inchamento limitam a sua utilização para diversas finalidades, ainda, exigindo técnicas específicas de utilização.

De acordo com Kollman e Côté (1968) *apud* Figueiroa (2012) a diferença entre a retração tangencial e a radial pode ser explicada pela influência dos raios na direção radial e também pelo arranjo helicoidal diferente das microfibrilas nas paredes tangenciais e radiais.

Segundo Masseran e Mariaux (1985) *apud* Silva e Oliveira (2003), em grande parte das dicotiledôneas, as diferenças de retração tangencial em relação à radial são atribuídas às características anatômicas. O volume dos raios, a dimensão radial das fibras e as diferenças de composição química entre as paredes radiais e tangenciais são responsáveis pela anisotropia da madeira.

2.2.8 Defeitos naturais

Os defeitos naturais podem sua origem na formação do tronco sendo comum a ocorrência de anomalias tais como tortuosidade, bifurcação ou aforquilhamento, conicidade acentuada e sulcos. Também podem ocorrer

variações na estrutura anatômica da madeira como largura irregular dos anéis de crescimento, crescimento excêntrico, lenho de reação, lenho de compressão, lenho de tração, nós e tecidos de cicatrização e por fim defeitos causados por esforços mecânicos rachaduras e defeitos causados por agentes bióticos e climáticos que podem ser alterações da cor, apodrecimento e perfurações e presença de substâncias especiais (COSTA, 2001). Para esse trabalho se mostrou necessário abordar com mais profundidade os temas defeitos na grã da madeira, presença de nós, rachaduras e o colapso.

2.2.8.1 Grã

De acordo com COSTA (2001) o termo grã refere-se à orientação dos elementos verticais constituintes do lenho, em relação ao eixo da árvore. Esta orientação é decorrente do seu processo de crescimento, gerando variação natural no arranjo e na direção dos tecidos axiais, o principal defeito é a formação de Grã espiralada. A ocorrência desse defeito pode comprometer a estabilidade das peças serradas e a sua resistência mecânica; a diminuição das propriedades de resistência é devida ao corte dos tecidos oblíquos quando se faz o desdobro paralelo ao tronco. Juntamente com esse efeito, uma predisposição para o surgimento de deformações na madeira, como ondulações e rachaduras.

A ação dos ventos e o desenvolvimento de copa podem ser citados como principais fatores que desencadeiam a formação da grã espiralada. Já existe um consenso que tal característica pode ser controlada geneticamente, podendo ser possível obter uma madeira perfeitamente alinhada (FERNANDES, 1982).

2.2.8.2 Nós

Segundo COSTA (2001) o nó pode ser definido como a base de um galho que está encaixado no tronco de uma árvore. O nó tem início na medula e cresce do centro para a periferia. Os nós vivos são aqueles que apresentam continuidade dos tecidos lenhosos e cujos galhos estavam vivos quando era formada a madeira ao seu redor; os nós mortos ou soltos são aqueles que não apresentam continuidade estrutural, soltando-se do restante do material. Estes podem

constituir-se numa porta de agentes externos tais como entrada de fungos, insetos e organismos nocivos à madeira.

As florestas mal formadas e manejadas induzem à formação de madeira com nós, sendo que o tamanho e a quantidade de nós dependem de fatores genéticos, do espaçamento e do manejo da floresta. As florestas destinadas à produção de madeira serrada ou laminada devem ser submetidas a programas complementares de manejo, como podas sucessivas, a partir do momento em que os galhos inferiores começam a morrer até a altura desejada (FERNANDES, 1982).

A maioria das propriedades mecânicas são mais baixas em seções que apresentam nós em sua composição, do que em madeira isenta de defeitos, devido à distorção das fibras em torno do nó, a descontinuidade de fibra de madeira provoca concentrações de tensão na secagem. No caso de madeira roliça, como postes e estacas os nós são menos novios ao desempenho estrutural em comparação a madeira serrada (FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010).

De acordo com Cruz e Nunes (2007) a influência dos nós na resistência mecânica deriva do fato das fibras estarem perpendiculares a direção geral das fibras da peça. Sendo assim é coerente desprezar a área de contribuição na seção transversal estudada. Segundo a NP 4305 (1995) para utilizações estruturais, os limites são estabelecidos em termos da porcentagem da seção transversal da peça que os nós ocupam designada por KAR (*Knot Area Ratio*) demonstrado na Figura 9.

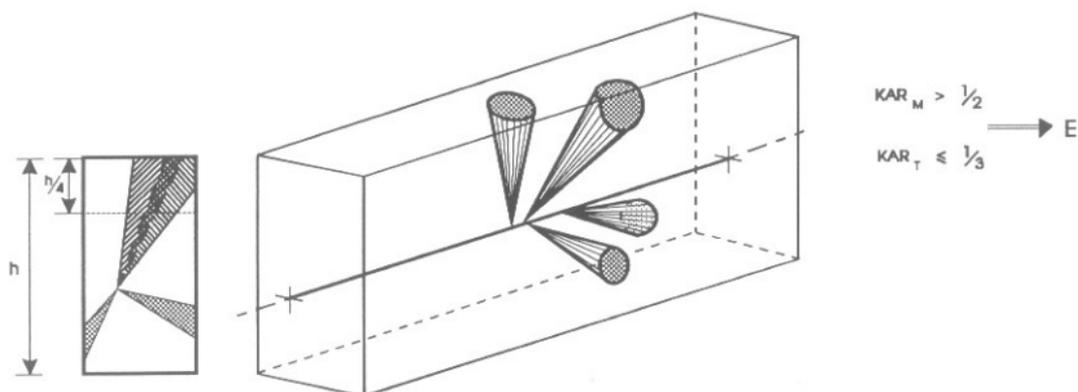


Figura 9- Idealização dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e KAR marginal.
Fonte: LNEC (1997).

A NBR 7190:1997 adota para todas as coníferas um coeficiente de modificação que pondera o efeito da presença de nós no material usado para fins estruturais.

2.2.8.3 Rachaduras

Segundo Cruz e Nunes (2007), as rachaduras induzem a formação de zonas descontínuas no material e seus efeitos dependem do esforço considerado, de sua localização na peça, do comprimento e profundidade bem como da associação de outros defeitos como variações na grã e presença de nós.

As rachaduras normalmente são formadas por acentuados gradientes de umidade em uma mesma peça, ou seja, ocorre secagem mais rápida da parte externa da peça de madeira comparada à parte interna. O surgimento da rachadura, em prática, ocorre quando o esforço de tensão na superfície supera a resistência à tração perpendicular do material. As rachaduras ocorrem devido às tensões de crescimento ou ao processo de secagem seja ao ar livre ou em estufa. As rachaduras decorrentes das tensões de crescimento se manifestam logo após a derrubada da árvore ou durante o processo de desdobro (ABINCI, 2004). O aparecimento de fendas pode ser evitado mediante a secagem lenta e uniforme da madeira (PFEIL, 2003).

2.2.8.4 Colapso

O colapso é provocado pela de movimentação da água no interior da madeira, resultando em uma variação entre o plano radial e o plano tangencial das peças. Ocorre quando o ponto de saturação das fibras é ultrapassado, esse efeito é mais frequente nas espécies de Eucalipto, chegando a ser considerado o principal defeito presente no processo de secagem (ABIMCI, 2004).

2.2.8.5 Defeitos de desdobro

De acordo com a NBR 12297/91, os defeitos de desdobro são alterações nas medições das peças de madeira fora dos padrões permitidos, resultado de uma operação de serragem malfeita. Os principais defeitos de serragem são: sobremedida, desbitolamento e o esmoado. Sendo o excesso nas três dimensões: espessura, largura ou comprimento. O desbitolamento é a variação na espessura ou largura da mesma peça, tendo como causa principal a serragem mal feita. O esmoado é a ausência de madeira, originada por qualquer motivo na quina da peça de madeira.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

2.3.1 Critérios de norma para a determinação da resistência de cálculo da madeira

A norma NBR 7190:1997 baseia-se no método de estados de limite de utilização. O método de estados limite é um método semiprobabilístico que estabelece as condições que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas de madeira (FIGUEROA, 2012).

Sendo assim, é necessário estabelecer valores para as solicitações de projeto (S_d), bem como a resistência do material (R_d), seguindo a equação geral da segurança de estruturas dada pela expressão 3, mostrada a seguir.

$$S_d \leq R_d \quad (\text{Eq.03})$$

As resistências de cálculo (R_d) são determinadas pela expressão 4, cujos parâmetros serão expostos na sequência deste capítulo.

$$R_d = k_{\text{mod},i} \cdot \frac{R_k}{\gamma_w} \quad (\text{Eq.04})$$

São definidos como estados limites, aqueles que podem ser: o estado limite último e o estado limite de serviço ou de utilização. Os estados limites últimos são caracterizados como: perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido; ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; transformação da estrutura, no todo ou em parte, em um sistema isostático; instabilidade por deformação; instabilidade dinâmica. Os estados limites de serviços no período de vida da estrutura são caracterizados como: danos ligeiros ou localizados que comprometam o aspecto estético da construção ou a durabilidade da estrutura; deformações excessivas que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético; vibrações excessivas ou desconfortáveis.

Na NBR 7190:1997 as classes de resistência são definidas de forma a possibilitar o emprego de madeiras com propriedades padronizadas. Na norma estabelece-se que o projeto das estruturas de madeiras deva ser feito considerando o teor de umidade de equilíbrio da madeira do local onde será implantada a obra. Para tais efeitos, foram definidas as classes de umidade, que está representada pela Tabela 3. Na norma são considerados os efeitos da duração do carregamento que está descrito na Tabela 2

Tabela 1-Ações variáveis

Combinações	Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis	Efeitos da temperatura
Normais	$\gamma_Q = 1,4$	$\gamma_\epsilon = 1,2$
Especiais ou de construção	$\gamma_Q = 1,2$	$\gamma_\epsilon = 1,0$
Excepcionais	$\gamma_Q = 1,0$	$\gamma_\epsilon = 0$

Fonte: NBR 7190:1997.

Tabela 2-Classes de Carregamento

Classe de Carregamento	Duração Acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
Permanente	Permanente	Vida útil da Construção
Longa Duração	Longa Duração	Mais de seis meses
Média Duração	Média Duração	Uma semana a seis meses
Curta Duração	Curta Duração	Menos de uma semana
Duração Instantânea	Duração Instantânea	Muito Curta

Fonte: NBR 7190:1997.

Durante o período de uso de uma estrutura, existe a probabilidade de ocorrência simultânea de vários tipos de carregamento, dependendo das diferentes formas de combinação dessas ações. Segundo a NBR 7190:1997 pode ocorrer carregamento: normal, especial e excepcional. Para esses carregamentos podem ser classificados como de longa duração ou transitórios, conforme seu tempo de duração. Para o dimensionamento da estrutura, são adotados os casos mais desfavoráveis, que são denominados carregamento de projeto.

Ainda abordando os critérios da NBR 7190:1997, para o dimensionamento de qualquer elemento estrutural, é necessário que a sua resistência seja maior do que esforços solicitantes atuantes durante toda sua vida útil. No entanto, durante as análises, surgem incertezas ligadas à resistência do material ou ao carregamento em que ele está sujeito. Assim, associa-se uma probabilidade de ruína a um elemento ou à estrutura como um todo. Desse modo, a confiabilidade de uma estrutura ou elemento pode ser avaliada quanto à probabilidade de falha ou quanto à probabilidade de sobrevivência. Para minimizar o risco de falha, são adotados coeficientes de segurança. O valor da resistência de cálculo para o projeto é obtida através da multiplicação do valor característico pelos coeficientes de segurança.

Como os valores são determinados com base na estatística, os coeficientes de segurança dependem de sua natureza, sendo pequenos para carga de pouca

dispersão, e grandes, para cargas de muita dispersão. Esse procedimento de dimensionamento básico é denominado “estados limites últimos” (FUSCO *et al.*, 1996).

2.3.2 Condições de referência

Os valores das propriedades de resistência e de rigidez a serem utilizados na elaboração de projetos estruturais são os correspondentes à umidade de 12%, escolhida como referência. Como, na realização dos ensaios previstos no Anexo B da NBR 7190/1997, nem sempre se consegue condicionar os corpos-de-prova exatamente na umidade de 12%, são usadas as expressões 5 e 6, dadas a seguir, para corrigir os valores das propriedades de resistência e de rigidez quando sua determinação experimental.

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (\text{Eq.05})$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (\text{Eq.06})$$

Em que:

f_{12} = Resistência na condição de 12% de umidade;

$f_{U\%}$ = resistência à na condição de umidade $12 \leq U\% \leq 20$;

E_{12} = Módulo de elasticidade longitudinal a 12% de umidade;

$E_{U\%}$ =Módulo de elasticidade longitudinal na condição de umidade $12 \leq U\% \leq 20$.

Entretanto, as condições ambientais no local onde as estruturas são construídas podem levar a porcentagens de umidade de equilíbrio ao ar, diferentes de 12%. Assim, são adotadas quatro classes de umidade, das quais uma é escolhida como a que escreve as condições adequadas ao projeto em elaboração, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3-Classes de umidade

Classes de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} >$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190:1997.

2.3.3 Classes de resistência

As classes de resistência tem o objetivo de incentivar o emprego de madeiras com propriedades padronizadas, orientando a escolha das espécies a indicar para a elaboração dos projetos estruturais.

Tabela 4-Coníferas - Valores de Referência U=12%

Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,d}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bás}$ (kg/m ³)	ρ_{12} (kg/m ³)
C20	20	4	3.500	400	500
C25	25	5	8.500	450	550
C30	30	6	14.500	500	600

Fonte: NBR 7190:1997.

Tabela 5-Dicotiledôneas - Valores de Referência U=12%

Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,d}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bás}$ (kg/m ³)	ρ_{12} (kg/m ³)
C20	20	4	9.500	500	650
C30	30	5	14.500	650	800
C40	40	6	19.500	750	950
C60	60	8	24.500	800	1000

Fonte: Adaptado NBR 7190:1997.

Nestas tabelas, tem-se:

- $f_{c0,k}$: valor característico da resistência à compressão paralela às fibras
- $f_{v0,k}$: valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
- $E_{c0,m}$: valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
- $\rho_{bás}$: densidade básica
- ρ_{12} : densidade aparente à umidade de referência de 12%

O enquadramento de espécies ou de lotes de madeira nas classes de resistência especificadas na Tabela 4 e Tabela 5 é feito com base nos valores característicos da resistência à compressão paralela às fibras.

2.3.4 Valores de cálculo

O valor de cálculo ou de projeto de uma propriedade da madeira é obtido pela expressão já apresentada anteriormente:

$$R_d = k_{mod,i} \cdot \frac{R_k}{\gamma_w} \quad (\text{Eq.07})$$

Onde:

γ_w = Coeficiente de minoração das propriedades da madeira

$k_{mod,i}$ = Coeficientes de modificação, considerando influências não cobertas por γ_w .

2.3.4.1 Valores de γ_w

Para o Estado limite último, o coeficiente de minoração de resistências (ou ponderação) no caso de compressão paralela às fibras tem o valor $\gamma_w = 1,4$. No caso de tração paralela às fibras, $\gamma_w = 1,8$. No caso de cisalhamento paralelo às

fibras, $\gamma_w = 1,8$. Já para o estado limite de utilização, o coeficiente de minoração de resistência assume o valor $\gamma_w = 1,0$.

2.3.4.2 Valores de $k_{mod,i}$

Os coeficientes de modificação afetam os valores de cálculo das propriedades da madeira em função de alguns parâmetros não abrangidos pelo coeficiente de minoração (ou ponderação). A NBR 7190/1997 adota três coeficientes de modificação para levar em conta a classe de carregamento da estrutura, a classe de umidade admitida e o eventual emprego de madeira não classificada como isenta de defeitos. Desta forma, tem-se:

$$k_{mod,i} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (\text{Eq.08})$$

2.3.4.3 Valores de $k_{mod,1}$

O coeficiente de modificação $k_{mod,1}$ leva em consideração a classe de carregamento das ações e o tipo de material empregado na construção da estrutura. Seus valores estão apresentados na Tabela 06.

Tabela 6-Valores do coeficiente de modificação $k_{mod,1}$

Classe de carregamento	Madeira serrada, laminada colada e compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,6	0,3
Longa duração	0,7	0,45
Média duração	0,8	0,65
Curta duração	0,9	0,9
Instantânea	1,1	1,1

Fonte: NBR 7190/1997.

2.3.4.4 Valores de $k_{mod,2}$

O coeficiente de modificação $k_{mod,2}$ leva em consideração a classe de umidade e o tipo de material empregado na construção da estrutura. Seus valores estão apresentados a seguir na Tabela 7.

Tabela 7-Valores do coeficiente de modificação $k_{mod,2}$

Classe de umidade	Madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: NBR 7190/1997.

2.3.4.4 Valores de $k_{mod,3}$

O coeficiente de modificação $k_{mod,3}$ leva em conta se a madeira é de primeira ou de segunda categoria.

No caso das dicotiledôneas, se as peças tiverem sido classificadas como de primeira categoria, $k_{mod,3} = 1,0$; se de segunda categoria, $k_{mod,3} = 0,8$. A condição de madeira de primeira categoria somente pode ser admitida se todas as peças estruturais de um determinado lote forem classificadas como isentas de defeitos, por intermédio de método visual normalizado e submetidas a uma classificação mecânica que garanta a homogeneidade da rigidez das peças. Não é permitido classificar como de primeira categoria as peças de madeira submetidas apenas pelo método visual de classificação.

No caso das coníferas, em quaisquer casos, $k_{mod,3} = 0,8$. Isto se deve ao fato de que é altamente significativo o risco da presença de nós no interior das peças estruturais, não detectáveis apenas pela inspeção visual.

2.3.5 Espécies conhecidas

Para as espécies já investigadas por laboratórios idôneos, das quais tenham sido apresentados os valores médios das resistências e dos módulos de

elasticidade, os mesmos devem ser corrigidos para a unidade de referência de 12%. Nestas circunstâncias, para os cálculos de projeto, admite-se a seguinte relação entre as resistências característica ($f_{k,12}$) e média ($f_{m,12}$):

$$f_{k,12} = 0,7 \cdot f_{m,12} \quad (\text{Eq.09})$$

2.3.6 Estimativas para os valores característicos das resistências segundo a NBR 7190:1997

Não dispondo de informações experimentais, permite-se adotar as seguintes relações para os valores característicos das resistências:

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad \frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad \frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \quad \frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (\text{Eq.10})$$

$$\text{Coníferas: } \frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,15; \text{ Dicotiledôneas: } \frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,12 \quad (\text{Eq.11})$$

2.3.7 Estimativa dos parâmetros de rigidez

Nas verificações dos estados limites últimos ou de utilização que dependem dos parâmetros de rigidez da madeira, o módulo de elasticidade longitudinal deve ser tomado com o valor efetivo, expresso por:

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} \quad (\text{Eq.12})$$

O módulo de elasticidade transversal pode ser estimado por:

$$G_{ef} = \frac{E_{c0,ef}}{20} \quad (\text{Eq.13})$$

2.3.8 Caracterização das madeiras

A NBR 7190/1997 estabelece três alternativas para se proceder à caracterização da resistência e da rigidez das espécies de madeira a serem empregadas na construção de estruturas: caracterização completa (para espécies desconhecidas), caracterização mínima (para espécies pouco conhecidas) e caracterização simplificada (para espécies bem conhecidas).

2.3.8.1 Caracterização completa da resistência da madeira

A caracterização completa da resistência da madeira a ser empregada no projeto e na construção de estruturas será feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190/1997, para as seguintes propriedades sempre referidas à umidade de 12%:

- Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$)
- Resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$)
- Resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$)
- Resistência à tração normal às fibras ($f_{t,90}$)
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$)
- Resistência ao embutimento paralelo às fibras ($f_{e,0}$)
- Resistência ao embutimento normal às fibras ($f_{e,90}$)
- Densidade básica ($\rho_{bás}$)
- Densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{12})

2.3.8.2 Caracterização simplificada da resistência da madeira

A caracterização simplificada da resistência da madeira deverá ser feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190/1997, considerando-se apenas a resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) à umidade de 12%.

2.3.8.3 Caracterização da rigidez da madeira

A caracterização da rigidez da madeira será feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190/1997. A caracterização completa da rigidez é feita por meio da determinação dos seguintes valores, referidos à umidade de 12%:

- Valor médio do módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$), determinado a partir dos valores de pelo menos dois ensaios
- Valor médio do módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão normal às fibras ($E_{c90,m}$), determinado a partir dos valores de pelo menos dois ensaios

Consideram-se equivalentes os valores médios do módulo de elasticidade longitudinal obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras e de tração paralela às fibras ($E_{t0,m}$).

A caracterização simplificada da rigidez da madeira é feita apenas com base no ensaio de compressão paralela às fibras, admitindo-se a relação entre o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras (E_0) e o módulo de elasticidade na direção normal às fibras (E_{90}):

$$E_{90} = \frac{E_0}{20} \quad (\text{Eq.14})$$

2.4 ENSAIOS PROPOSTOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL FÍSICA

2.4.1 Ensaio estático de compressão paralela às fibras

Elementos de madeira, quando utilizados como pilares ou estacas, por exemplo, estão sujeitos prioritariamente a esforços de compressão paralela às fibras. Cada espécie é classificada segundo a NBR 7190:1997 por classes de resistência obtidas a partir desse ensaio. Através do diagrama tensão é possível ainda extrair o valor do módulo de elasticidade E_{c0} , utilizando os critérios especificados na equação 15:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (\text{Eq.15})$$

Onde:

$\sigma_{50\%}$ - tensão de compressão correspondente a 50% da resistência a compressão paralela às fibras;

$\sigma_{10\%}$ - tensão de compressão correspondente a 10% da resistência a compressão paralela às fibras;

$\epsilon_{50\%}$ - deformação específica medida no corpo de prova, correspondente à tensão de $\sigma_{50\%}$;

$\epsilon_{10\%}$ - deformação específica medida no corpo de prova, correspondente à tensão de $\sigma_{10\%}$;

Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), utilizamos a equação 16:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (16)$$

Onde:

$f_{c0,máx}$ - máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio (N);

A - área inicial da seção transversal comprimida;

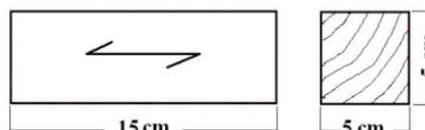
Determinadas os carregamentos a 10% ($\sigma_{10\%}$) e a 50% ($\sigma_{50\%}$) e suas respectivas deformações $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$, determinamos a rigidez do material.

Abaixo, segue a tabela resumo com as principais orientações para execução do ensaio.

Tabela 8-Parâmetros para execução do ensaio de compressão paralela às fibras.

Parâmetros	NBR 7190:1997
Dimensão do Corpo de Prova	5cm x 5cm x 15 cm
Determinação da resistência à compressão	$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova
Taxa de Carregamento	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min

Corpos de Prova



Fonte: Adaptado NBR 7190:1997.

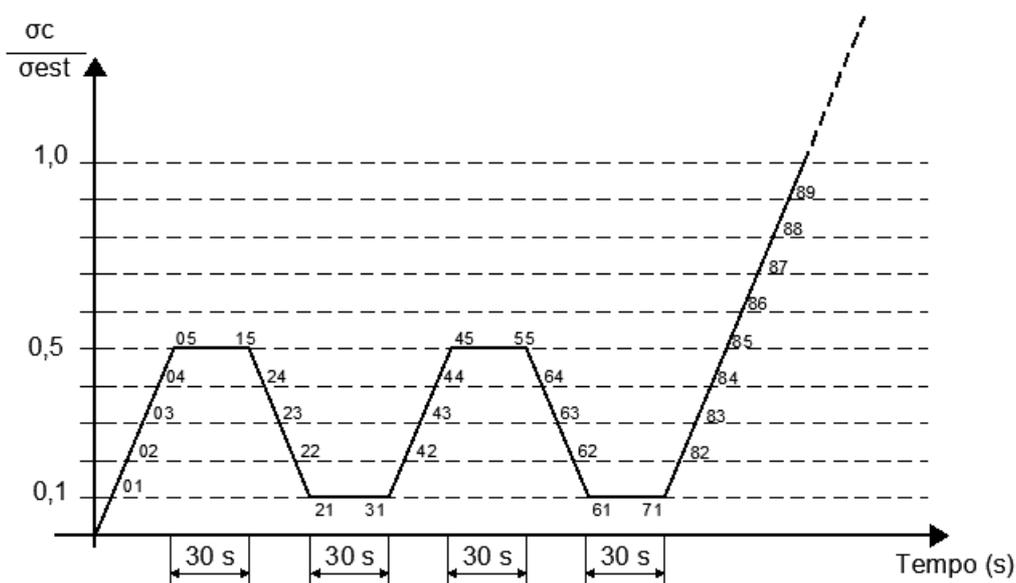


Figura 10-Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão.

Fonte: Adaptado NBR 7190:1997.

2.4.2 Ensaios estáticos de compressão normal às fibras

No caso de solicitação normal às fibras, a madeira apresenta valores de resistência menores que na compressão paralela às fibras, principalmente por ser aplicada na direção normal ao comprimento das fibras, provocando seu esmagamento. Os valores de resistência à compressão normal às fibras são da ordem de 25% do valor obtido no teste de compressão axial. Valor adotado pela NBR 7190/97 para fim de dimensionamento.

De acordo com a NBR 7190:1997, os esforços são determinados com a hipótese de comportamento elasto-plástico da madeira, portanto, devendo ser levada em conta a extensão do carregamento, medida paralelamente à direção das fibras.

A Figura 11, logo abaixo, representa esquematicamente o modo de execução do ensaio. Aplica-se pressão sobre a peça metálica, a qual comprime a madeira que repousa sobre uma base com resistência superior à da madeira ensaiada. Desta forma, a madeira tende a amassar, o que ocorre quando se ultrapassar o limite de elasticidade.

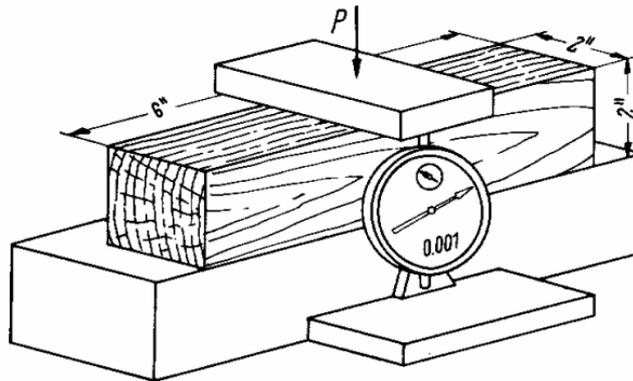


Figura 11-Ensaio de determinação da resistência à compressão normal às fibras.
Fonte: Norma COPANT 30:1-011.

Como o ensaio para a determinação desta resistência só é efetuado até a carga correspondente ao limite de elasticidade da madeira, a resistência à compressão perpendicular às fibras é calculada segundo a equação 17.

$$\sigma_{LP} = \frac{PLP}{A} \quad (\text{Eq.17})$$

Onde:

σ_{LP} = Resistência da madeira à compressão perpendicular às fibras, expressa em MPa, no limite proporcional;

PLP = Carga no limite proporcional, expressa em N e;

A = Área sujeita ao esforço.

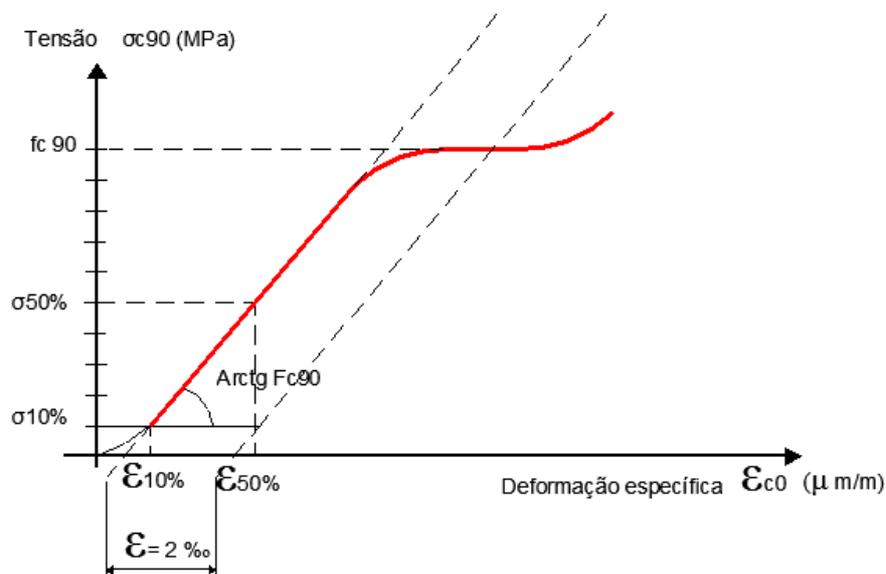


Figura 12-Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.
Fonte: Adaptado NBR 7190:1997.

Para este ensaio, foi utilizado corpos de prova com dimensões diferentes da NBR 7190. Abaixo, segue a tabela resumo com as principais orientações para execução do ensaio.

Tabela 9- Parâmetros para execução do ensaio de compressão normal às fibras.

Parâmetros	
Dimensão do Corpo de Prova	5cm x 5cm x 15 cm
Determinação da resistência à compressão	$\sigma_{LP} = \frac{PLP}{A}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova
Taxa de Carregamento	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min
Corpos de Prova	

Fonte: Adaptado NBR 7190:1997.

2.4.3 Ensaios estáticos de flexão simples

Quando solicitada por uma carga externa, o elemento, geralmente confeccionado em forma de viga, deforma-se em forma de arco. Dessa forma, surgem dois efeitos preponderantes: um encurtamento da parte superior bem como um alongamento da parte inferior do elemento. O ponto em que ocorre a inversão dos esforços é chamado de linha neutra (BEER *et al.* 1995)

A Tabela 10, apresenta as dimensões dos corpos de prova, o critério para a determinação da resistência, o tamanho das amostras, a taxa de carregamento e os desenhos dos corpos de prova para os ensaios de flexão estática, sugeridos pelas diferentes normas técnicas.

Tabela 10- Parâmetros para execução do ensaio de flexão simples.

Parâmetros	NBR 7190:1997	AFNOR B 51 - 016 (1987)	ASTM D143-09
Dimensão do Corpo de Prova	5cm x 5cm x 115 cm	20mm x 20mm x 360mm	50mm x 50mm x 760mm
Determinação da resistência à compressão	$f_M = \frac{M_{máx}}{W_e}$	$\sigma_{FH} = \frac{3P(l-a)}{2bh^2}$	$\sigma_{pl} = \frac{3P_{pl}}{2bh^2}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não especifica	Não especifica
Taxa de Carregamento	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza um deslocamento de 6,0 mm/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza um deslocamento de 2,5 mm/min

Fonte: NBR 7190:1997, AFNOR B 51 - 016 (1987) e ASTM D143-09.

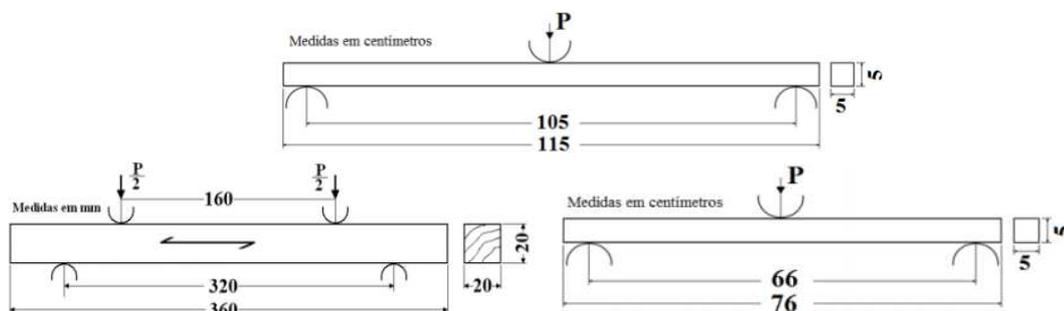


Figura 13-Esquema do ensaio para a determinação da resistência à flexão
 Fonte: NBR 7190:1997, AFNOR B 51 - 016 (1987) e ASTM D143-09.

Observa-se que existem duas formas de realização de ensaios à flexão estática: ensaio a 3 pontos e ensaio a 4 pontos. Na primeira forma, a carga concentrada é aplicada no meio do vão do corpo de prova, e, na segunda, a carga é aplicada em dois pontos equidistantes dos apoios. No ensaio a 4 pontos, a região do corpo de prova situada entre os pontos de aplicação da carga está submetida somente à flexão simples. Observa-se que existem diferenças quanto às dimensões dos corpos de prova apresentados pelas normas. A NBR 7190:1997 e a ASTM D143-09 recomendam o uso de corpos de prova com grandes dimensões que se aproximam das condições reais dos elementos estruturais e apresentam as heterogeneidades e os defeitos não visíveis da madeira. Já a AFNOR B 51-016 (1987) propõe o uso de corpos de prova menores, facilitando assim, a execução dos corpos de prova.

Segundo Calil, *et.al* citado por MESCAU (2010), a ruptura em peças de madeira solicitadas à flexão ocorre principalmente pela formação de falhas de compressão, gerando assim, um aumento da área comprimida e conseqüente redução da área tracionada, dessa forma gerando o rompimento do material à tração.

Cabe aqui, complementar o referencial teórico, já que os procedimentos do ensaio realizado foram diferentes dos sugeridos pelas normas acima citadas. Sendo assim, na Figura 14 é apresentado o Esquema de carregamento e considerações para obtenção da equação da linha elástica em uma viga em balanço.

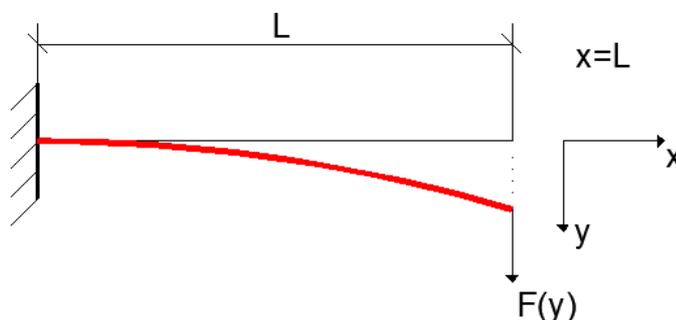


Figura 14-Esquema de carregamento e considerações para obtenção da equação da linha elástica em uma viga em balanço
 Fonte: Adaptado BEER *et al.* (1995)

Para considerar apenas o deslocamento da força aplicada na extremidade, considera-se $x = L$ na equação geral, sendo assim, obtém-se a equação:

$$y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (18)$$

Onde:

y é o deslocamento vertical;

P é o carregamento aplicado;

L é o comprimento da viga;

E é o Módulo de Elasticidade do material;

I é a Inércia da peça.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos, seguindo a sequência cronológica dos fatos:

- ✓ Realização de uma revisão bibliográfica da estrutura anatômica das madeiras em geral, das propriedades mecânicas e físicas que as afetam diretamente;
- ✓ Confeção dos Corpos de Prova com as espécies de madeira escolhidas;
- ✓ Preparação dos Corpos de Prova para os ensaios;
- ✓ Calibração dos equipamentos de leitura;
- ✓ Realização dos ensaios em modelos reduzidos;
- ✓ Análise dos resultados obtidos;
- ✓ Redação da Monografia;

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados para a comparação entre os resultados provenientes do carregamento aplicado nos quesitos de compressão normal e paralela às fibras, bem como os ensaios de flexão simples. Sendo que foram utilizados os equipamentos e instalações da UTFPR para realização de todos os experimentos.

3.1.1 Espécies de madeira

Foram utilizados lotes de três espécies de madeira, tendo como principais critérios a sua importância e representatividade no comércio local, sendo duas espécies de dicotiledôneas e uma conífera.

Tabela 11-Nome comercial, nome científico, classe de resistência e origem

Nome Comercial	Nome Científico	Classe de Resistência (MPa)	Origem
Cambará	<i>Erismia sp</i>	C40	Porto Velho (RO)
Eucalipto Dunni	<i>Eucalyptus Dunnii</i>	C30	Bocaiúva do Sul (PR)
Pinheiro do Paraná	<i>Araucaria Augustifolia</i>	C30	Bocaiúva do Sul (PR)

Fonte: Adaptado NBR7190/97.

A madeira de Cambará em forma de tora foi proveniente de doação da Madeireira Marcol Industria e Comercio LTDA com sede em Porto Velho, Rondônia em parceria com a Carrocerias Taverna de Colombo, Paraná. As espécies de *Eucalyptus Dunnii* e Araucária foram cedidas pelo senhor Tadeu Coradin de Bocaiúva do Sul no Paraná. Todas as toras foram extraídas com as seguindo o mesmo padrão, com aproximadamente 50 cm de altura e diâmetro.

3.1.2 Confeção dos corpos de prova

Após a obtenção de todo o material necessário, foram confeccionados 6 (seis) corpos de prova prismáticos e conforme previsto nos anexo B e C da NBR 7190/97 para os ensaios de compressão paralela as fibras estão mostrados na Figura 15. Os CPs utilizados nos ensaios de compressão normal às fibras possuem as mesmas dimensões, diferindo do que é proposto pela NBR 7190/97 que indica a utilização de CPs de (5x5x10cm). Para os ensaios de flexão simples foram adotadas dimensões mostradas na Figura 16. Todos eles levando em conta a posição no lenho, separando no beneficiamento CPs que tivessem em sua maioria cerne e também o mesmo procedimento para o alburno.

O método visual dói o critério adotado para diferenciação entre cerne e alburno. Para tanto, delimitou-se o centro da tora e desse centro foram retirados 4 corpos de prova de cada tora tendo o cuidado de manter o eixo de simetria do elemento tendo como base a medula da árvore.

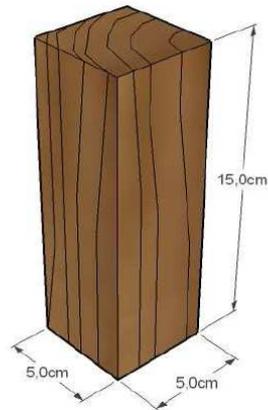


Figura 15-Corpo de prova compressão paralela e normal às fibras

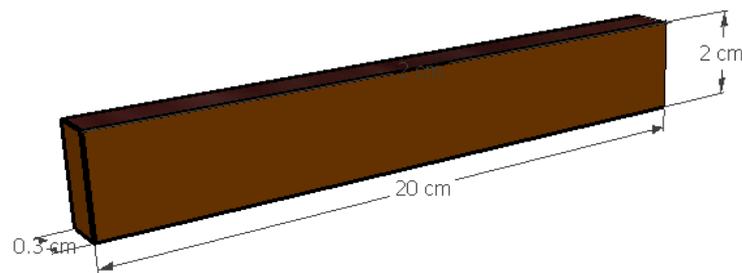


Figura 16-Corpo de prova flexão simples

3.1.3 Classificação dos corpos de prova

Cada CP foi classificado seguindo a seguinte regra: Primeiro sua espécie, depois sua composição e por fim seu número. As espécies são três Cambará, Araucária e Eucalipto Dunnii, a composição: cerne ou alburno e a numeração de 01 a 06, sendo que os CPs de 01 a 03 são secos à umidade ambiente e os CPs de 04 a 06 são totalmente saturados.

3.1.4 Procedimento de secagem e saturação dos corpos de prova

Como descrito no item anterior, os CPs com numeração variando de 04 a 06 foram totalmente imersos em água por dez dias, até atingir o teor de umidade

acima do ponto de saturação das fibras. O restante dos CPs foi deixado à umidade ambiente para que secasse ao ar.

3.2 ENSAIOS ESTÁTICOS REALIZADOS

3.2.1 Compressão paralela às fibras da madeira

O método de ensaio à compressão paralela às fibras, utilizados neste trabalho, são os descritos no item B.8 da NBR 7190:1997. Foram utilizados para o ensaio de compressão paralela às fibras, um paquímetro digital e uma máquina universal do modelo EMIC. DL 5000/10000. O paquímetro digital, utilizado para avaliar as dimensões dos CPs, tinha sensibilidade de centésimos de milímetro. A máquina universal de ensaios, tinha capacidade de carga de 100 kN com transdutores de medição de força utilizando célula de carga de *strain gages* que permitia o controle da velocidade de carregamento prevista no ensaio, de 10 MPa/min. Deste ensaio obtém-se a resistência e o módulo de elasticidade à compressão paralela.

Diagramas tensão normal e de deformação específica para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras e estimativa do módulo de elasticidade longitudinal com base no diagrama fornecido pela prensa.

3.2.2 Compressão normal às fibras da madeira

Para os ensaios de compressão normal, foi adotado o corpo de prova e procedimento conforme a Norma COPANT 30:1-011. Assim foi possível a obtenção de diagramas tensão e de deformação específica para a determinação da resistência à compressão perpendicular às fibras, a fim de comparar com o valor fornecido pela NBR 7190/97.

3.2.3 Flexão simples reta

O referencial teórico específico a este ensaio apresentado no desenvolvimento deste trabalho teve o intuito de demonstrar que o procedimento adotado não tem relação com ensaios normatizados. O procedimento adotado resume-se ao seguinte: Dado o CP anteriormente caracterizado é engastado em uma de suas extremidades. Na outra extremidade é posicionado um medidor de

deformação onde se aplica um carregamento sobre a viga, conforme mostrado na figura a seguir:



Figura 17-Ensaio Flexão Simples Reta
Fonte: Autoria Própria.

Neste ensaio foi utilizado o relógio comparador Mitutoyo analógico com curso de 12,5mm, suporte magnético Mitutoyo para aferir a deformação da viga.

A convenção adotada bem como a equação para o cálculo do momento de inércia da viga é mostrada na Figura 18. Sendo obtidos os seguintes resultados:

$$\begin{array}{c} \square \\ \text{b} \end{array} \text{h} \quad I_x' = \frac{bh^3}{12}$$

Figura 18- Convenção adotada para definir as dimensões do corpo de prova e equação do momento de inércia da viga
Fonte: Adaptado BEER,1995.

4 RESULTADOS

4.1 FLEXÃO SIMPLES RETA

Para os ensaios de flexão simples, foram obtidos os seguintes resultados:

4.1.1 Cambará

Tabela 12-Obtenção do Momento de Inércia Cambará alburno

CAMBARÁ-ALBURNO					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	Iz(m ⁴)
1	4,17	20,83	0,00417	0,02083	1,26E-10
2	3,53	20,55	0,00353	0,02055	7,53E-11
3	3,67	20,31	0,00367	0,02031	8,37E-11
4	3,52	20,86	0,00352	0,02086	7,58E-11
5	3,66	20,27	0,00366	0,02027	8,28E-11
6	3,73	20,39	0,00373	0,02039	8,82E-11

Em que:

a e b são as dimensões dos corpos de prova;

Iz é o Momento de Inércia do material;

Tabela 13-Resultados ensaio de flexão simples - Cambará alburno

CAMBARÁ-ALBURNO							
Condição	CP	Iz(m ⁴)	y(mm)	L _{eng} (m)	P(N)	E (GPa)	Média (GPa)
AMBIENTE	1	1,25868E-10	2,91	0,18	1,960038	10,40	13,32
	2	7,53277E-11	4,16	0,18	1,960038	12,16	
	3	8,36617E-11	2,62	0,18	1,960038	17,38	
SATURADO	4	7,5816E-11	4,98	0,18	1,960038	10,09	11,35
	5	8,28163E-11	4,35	0,18	1,960038	10,58	
	6	8,81785E-11	3,23	0,18	1,960038	13,38	

Onde:

L_{eng} é o comprimento da peça descontando o trecho engastado;

P é o carregamento aplicado na extremidade da viga;

E é o Módulo de Elasticidade do material.

Tabela 14-Obtenção do Momento de Inércia Cambará cerne

CAMBARÁ-CERNE					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	Iz(m ⁴)
1	3,94	19,59	0,00394	0,01959	9,98E-11
2	4,25	19,68	0,00425	0,01968	1,26E-10
3	4	19,68	0,004	0,01968	1,05E-10
4	4,08	19,55	0,00408	0,01955	1,11E-10
5	4,21	19,65	0,00421	0,01965	1,22E-10
6	3,98	19,67	0,00398	0,01967	1,03E-10

Em que:

a e b são as dimensões dos corpos de prova;

Iz é o Momento de Inércia do material;

Tabela 15-Resultados ensaio de flexão simples - Cambará cerne

CAMBARÁ-CERNE							
Condição	CP	Iz(m ⁴)	y(mm)	Leng(m)	P(N)	E (GPa)	Média(GPa)
AMBIENTE	1	9,98E-11	2,34	0,18	1,960038	16,31	14,75
	2	1,26E-10	2,01	0,18	1,960038	15,06	
	3	1,05E-10	2,82	0,18	1,960038	12,87	
SATURADO	4	1,11E-10	2,96	0,18	1,960038	11,63	12,35
	5	1,22E-10	1,91	0,18	1,960038	16,33	
	6	1,03E-10	4,05	0,18	1,960038	9,10	

Onde:

Leng é o comprimento da peça descontando o trecho engastado;

P é o carregamento aplicado na extremidade da viga;

E é o Módulo de Elasticidade do material.

4.1.2 *Eucalyptus Dunnii*

Tabela 16-Obtenção do Momento de Inércia *Eucalyptus Dunnii* alburno

EUCALIPTO-ALBURNO					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	Iz(m ⁴)
1	3,85	20,92	0,00385	0,02092	9,95E-11
2	3,78	20,64	0,00378	0,02064	9,29E-11
3	3,48	20,58	0,00348	0,02058	7,23E-11
4	3,66	20,94	0,00366	0,02094	8,56E-11
5	3,62	21,42	0,00362	0,02142	8,47E-11
6	3,61	20,64	0,00361	0,02064	8,09E-11

Tabela 17-Resultados ensaio de flexão simples - *Eucalyptus Dunnii* alburno

EUCALIPTO-ALBURNO							
Condição	CP	$I_z(m^4)$	$y(mm)$	Leng(m)	P(N)	E (GPa)	Média(GPa)
AMBIENTE	1	9,94861E-11	4,61	0,18	1,960038	8,31	9,86
	2	9,28975E-11	5,42	0,18	1,960038	7,57	
	3	7,22773E-11	3,85	0,18	1,960038	13,69	
SATURADO	4	8,55537E-11	5,98	0,18	1,960038	7,45	7,75
	5	8,46767E-11	5,39	0,18	1,960038	8,35	
	6	8,09189E-11	6,31	0,18	1,960038	7,46	

Tabela 18-Obtenção do Momento de Inércia *Eucalyptus Dunnii* cerne

EUCALIPTO-CERNE					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	$I_z(m^4)$
1	4,1	19,46	0,0041	0,01946	1,12E-10
2	4,41	17,84	0,00441	0,01784	1,28E-10
3	4,1	17,93	0,0041	0,01793	1,03E-10
4	3,85	17,44	0,00385	0,01744	8,29E-11
5	4,11	18,84	0,00411	0,01884	1,09E-10
6	4,18	17,84	0,00418	0,01784	1,09E-10

Tabela 19-Resultados ensaio de flexão simples - *Eucalyptus Dunnii* cerne

EUCALIPTO-CERNE							
Condição	CP	$I_z(m^4)$	$y(mm)$	Leng(m)	P(N)	E (GPa)	Média(GPa)
AMBIENTE	1	1,12E-10	2,34	0,175	1,960038	13,39	11,07
	2	1,28E-10	4,85	0,175	1,960038	5,66	
	3	1,03E-10	2,4	0,175	1,960038	14,17	
SATURADO	4	8,29E-11	5,5	0,175	1,960038	7,68	8,31
	5	1,09E-10	3,32	0,175	1,960038	9,68	
	6	1,09E-10	4,25	0,175	1,960038	7,59	

4.1.3 Araucária

Tabela 20-Obtenção do Momento de Inércia Araucária alburno

ARAUCÁRIA-ALBURNO					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	Iz(m ⁴)
1	3,77	20,67	0,00377	0,02067	9,23E-11
2	4,02	23,14	0,00402	0,02314	1,25E-10
3	4,19	23,25	0,00419	0,02325	1,43E-10
4	4,13	23,18	0,00413	0,02318	1,36E-10
5	4,16	23,19	0,00416	0,02319	1,39E-10
6	4,07	20,42	0,00407	0,02042	1,15E-10

Tabela 21-Resultados ensaio de flexão simples - Araucária alburno

ARAUCÁRIA-ALBURNO							
Condição	CP	Iz(m ⁴)	y(mm)	Leng(m)	P(N)	E (GPa)	Média(GPa)
AMBIENTE	1	9,230E-11	2,833	0,175	1,960	13,39	12,11
	2	1,253E-10	2,051	0,175	1,960	13,63	
	3	1,425E-10	2,641	0,175	1,960	9,30	
SATURADO	4	1,361E-10	2,08	0,175	1,960	12,37	9,56
	5	1,391E-10	4,15	0,175	1,960	6,06	
	6	1,147E-10	2,98	0,175	1,960	10,24	

Tabela 22-Obtenção do Momento de Inércia Araucária cerne

ARAUCÁRIA-CERNE					
CP	a(mm)	b(mm)	a(m)	b(m)	Iz(m ⁴)
1	4,00	20,96	0,004	0,02096	1,12E-10
2	4,07	20,97	0,00407	0,02097	1,18E-10
3	3,97	20,75	0,00397	0,02075	1,08E-10
4	3,93	20,76	0,00393	0,02076	1,05E-10
5	3,91	20,91	0,00391	0,02091	1,04E-10
6	3,92	20,89	0,00392	0,02089	1,05E-10

Tabela 23-Resultados ensaio de flexão simples - Araucária cerne

ARAUCÁRIA-CERNE							
Condição	CP	Iz(m ⁴)	y(mm)	Leng(m)	P(N)	E (GPa)	Média(GPa)
AMBIENTE	1	1,118E-10	2,223	0,175	1,960038	14,09	15,79
	2	1,178E-10	2,069	0,175	1,960038	14,36	
	3	1,082E-10	1,711	0,175	1,960038	18,91	
SATURADO	4	1,050E-10	2,39	0,175	1,960038	13,95	12,96
	5	1,042E-10	2,23	0,175	1,960038	15,07	
	6	1,049E-10	3,39	0,175	1,960038	9,85	

4.1.4 Resumo resultados flexão simples reta

Tabela 24-Resultados ensaio de flexão simples reta -Resumo Geral

ARAUCÁRIA					
Tipo	E(GPa) Média			Cerne/Alburno (Amb.)	Cerne/Alburno (Sat)
	Ambiente	Saturado	Sat/Amb		
Alburno	12,11	9,56	0,79	1,30	1,36
Cerne	15,79	12,96	0,82		
EUCALIPTO					
Tipo	E(GPa) Média			Cerne/Alburno (Amb.)	Cerne/Alburno (Sat)
	Ambiente	Saturado	Sat/Amb		
Alburno	9,86	7,75	0,79	1,12	1,07
Cerne	11,07	8,31	0,75		
CAMBARÁ					
Tipo	E(GPa) Média			Cerne/Alburno (Amb.)	Cerne/Alburno (Sat)
	Ambiente	Saturado	Sat/Amb		
Alburno	13,32	11,35	0,85	1,11	1,09
Cerne	14,75	12,35	0,84		

4.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Para os ensaios de compressão paralela às fibras, é apresentado logo abaixo, os gráficos e tabelas resumo. Os demais gráficos e tabelas referentes a esse ensaio estão nos apêndices deste trabalho.

4.2.1 Cambará

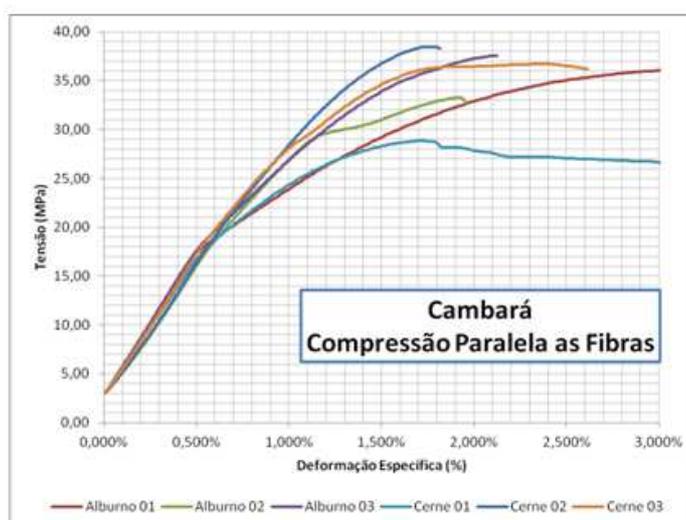


Gráfico 1-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará

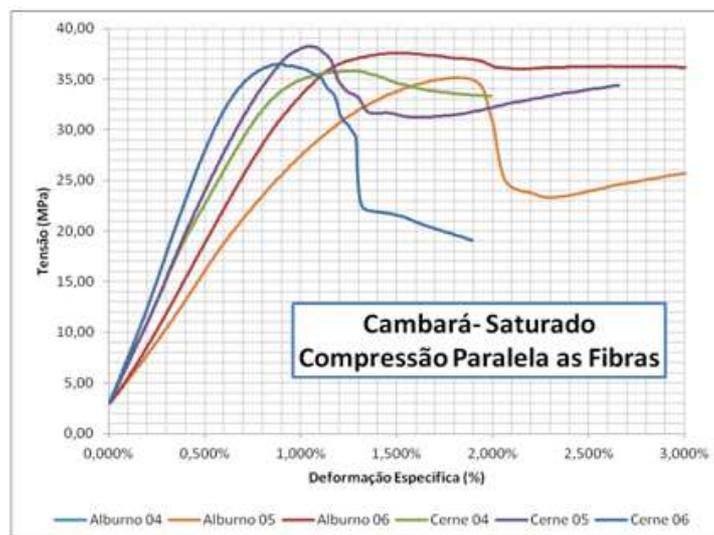


Gráfico 2-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará Saturado

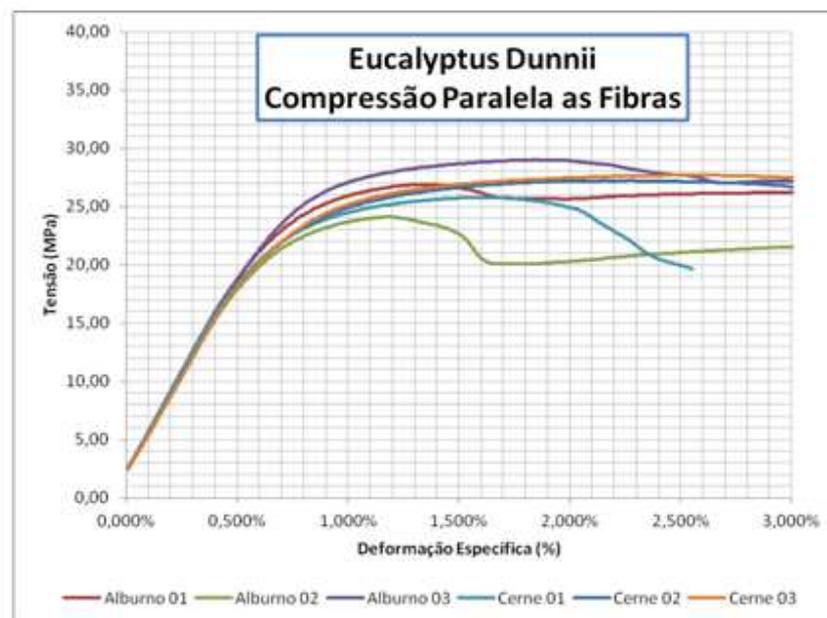
Tabela 25-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Cambará

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	36,37	2,78						
2	33,28	2,67	2,78	0,106	3,80%	35,75	2,220	6,21%
3	37,59	2,88						
Saturado								
4	29,85	2,62						
5	35,15	2,66	2,95	0,409	13,88%	36,37	1,725	4,74%
6	37,59	3,24						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	28,84	2,83						
2	38,47	2,73	2,81	0,111	3,96%	37,59	1,240	3,30%
3	36,72	2,89						
Saturado								
4	35,82	4,17						
5	38,26	4,28	4,22	0,077	1,83%	36,86	1,264	3,43%
6	36,50	4,99						

Tabela 26-Resumo dos resultados ensaio de compressão paralela às fibras – Cambará

Resumo : Alburno x Cerne					
Resistência (MPa)	Ambiente	35,75	x	37,59	5,16%
	Saturada	36,37	x	36,86	1,35%
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	2,78	x	2,81	1,10%
	Saturada	2,95	x	4,22	43,13%

4.2.2 *Eucalyptus Dunnii*

Gráfico 3-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – *Eucalyptus Dunnii*

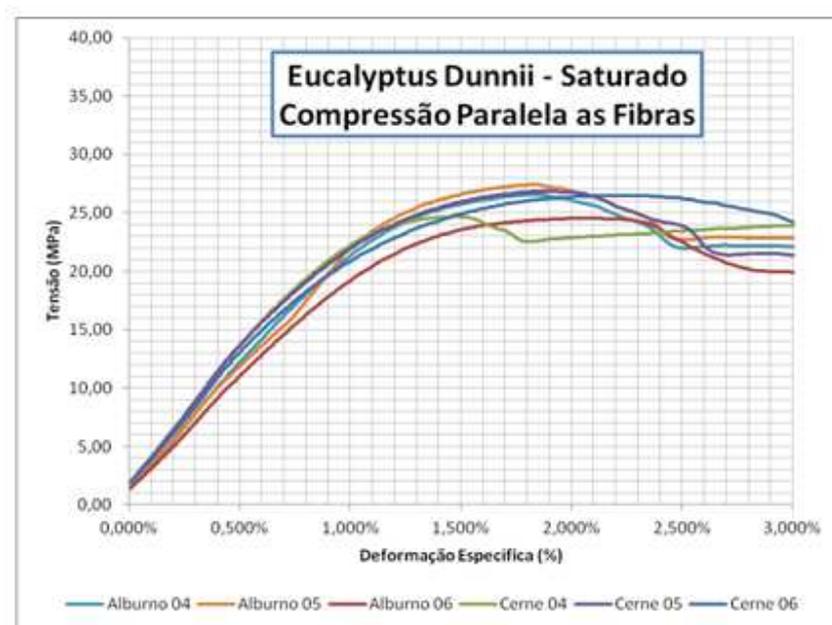


Gráfico 4-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – *Eucalyptus Dunnii* Saturado

Tabela 27-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras - *Eucalyptus Dunnii* Saturado

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	26,89	3,46						
2	24,09	3,31	3,38	0,074	2,18%	26,66	2,465	9,24%
3	29,01	3,37						
Saturado								
4	26,57	2,19						
5	27,41	2,05	2,06	0,117	5,69%	26,17	1,478	5,65%
6	24,54	1,95						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	25,78	3,39						
2	27,22	3,27	3,31	0,070	2,11%	26,89	0,990	3,68%
3	27,68	3,27						
Saturado								
4	24,68	2,38						
5	26,83	2,38	2,38	0,001	0,04%	26,00	1,160	4,46%
6	26,51	2,26						

Tabela 28-Resumo dos resultados ensaio de compressão paralela às fibras – *Eucalyptus Durni*

Resumo : Alburno x Cerne					
Resistência (MPa)	Ambiente	26,66	x	26,89	0,85%
	Saturada	26,17	x	26,00	-0,64%
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	3,38	x	3,31	-2,07%
	Saturada	2,06	x	2,38	15,50%

4.2.3 Araucária

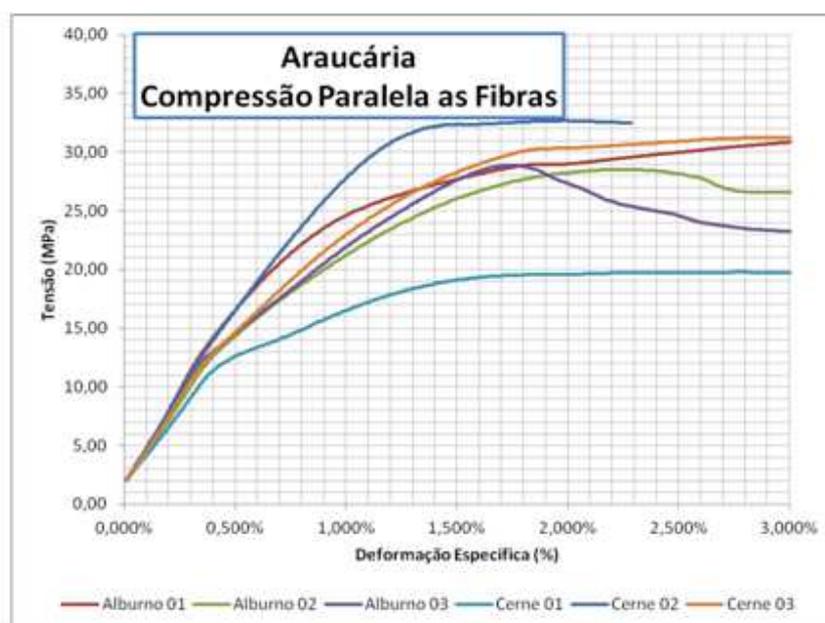


Gráfico 5-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária

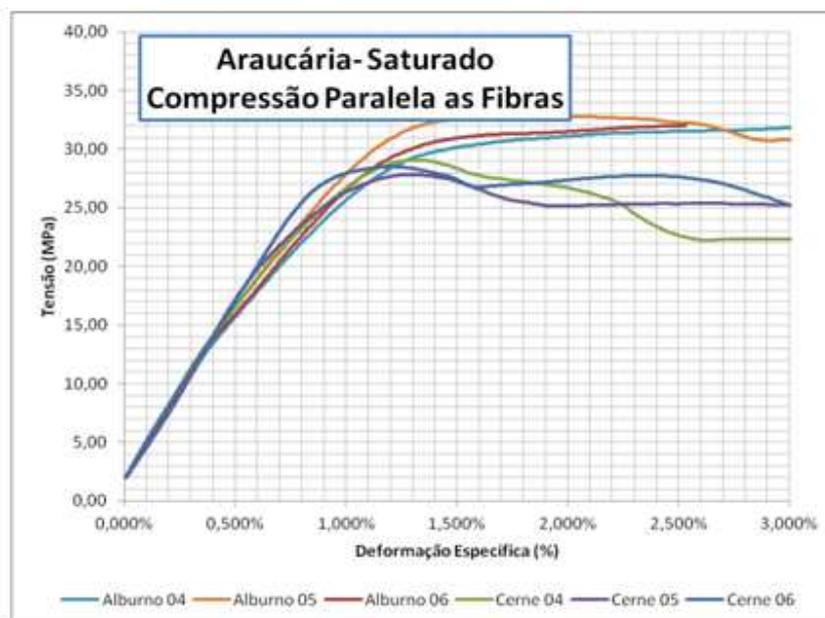


Gráfico 6-Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária Saturado

Tabela 29--Resultados ensaio de Compressão Paralela às Fibras – Araucária

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	19,77	2,44						
2	32,67	2,94	2,71	0,331	12,22%	32,10	0,810	2,52%
3	31,53	2,47						
Saturado								
4	29,08	3,04						
5	27,84	3,07	3,05	0,022	0,72%	28,47	0,621	2,18%
6	28,50	3,03						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	32,09	3,00						
2	28,53	2,50	2,68	0,277	10,32%	29,84	1,961	6,57%
3	28,90	2,55						
Saturado								
4	31,93	2,77						
5	32,80	2,95	2,86	0,122	4,27%	32,34	0,440	1,36%
6	32,30	2,78						

Tabela 30-Resumo dos resultados ensaio de paralela normal às fibras – Araucária

Resumo : Alburno x Cerne					
Resistência (MPa)	Ambiente	32,10	x	29,84	-7,05%
	Saturada	28,47	x	32,34	13,60%
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	2,71	x	2,68	-0,93%
	Saturada	3,05	x	2,86	-6,13%

4.3 COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Para os ensaios de compressão normal às fibras, é apresentado logo abaixo, os gráficos e tabelas resumo. Os demais gráficos e tabelas referentes a esse ensaio estão nos apêndices deste trabalho.

4.3.1 Cambará

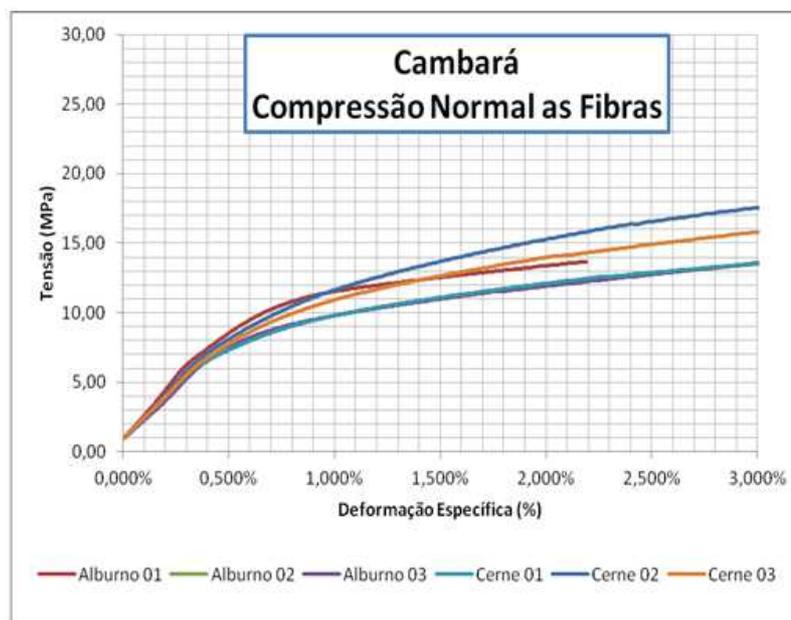


Gráfico 7-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará

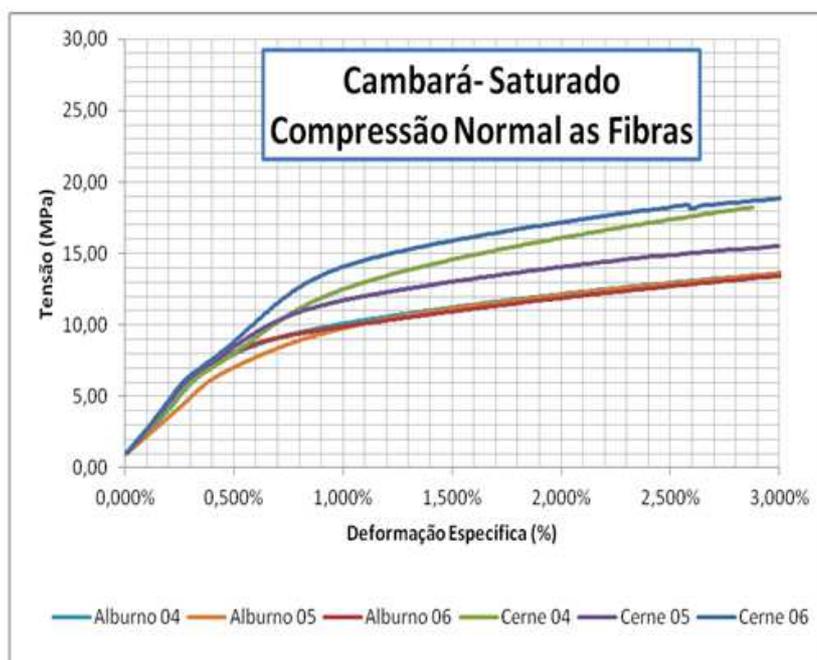


Gráfico 8- Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará Saturado

Tabela 31-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras - Cambará

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	13,39	1,74						
2	12,04	1,47	1,55	0,160	10,28%	12,45	0,816	6,56%
3	11,92	1,45						
Saturado								
4	12,17	1,66						
5	12,11	1,33	1,61	0,256	15,91%	12,05	0,153	1,27%
6	11,88	1,84						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	12,13	1,50						
2	15,29	1,49	1,48	0,037	2,50%	13,80	1,588	11,50%
3	13,98	1,44						
Saturado								
4	16,11	1,40						
5	14,05	1,69	1,54	0,205	13,29%	15,78	1,591	10,08%
6	17,18	1,57						

Tabela 32-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras – Cambará

Resumo : Alburno x Cerne					
Resistência (MPa)	Ambiente	12,45	x	15,78	
	Saturada	12,05	x	13,80	
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	1,55	x	1,48	
	Saturada	1,61	x	1,54	

4.3.2 *Eucalyptus Dunnii*

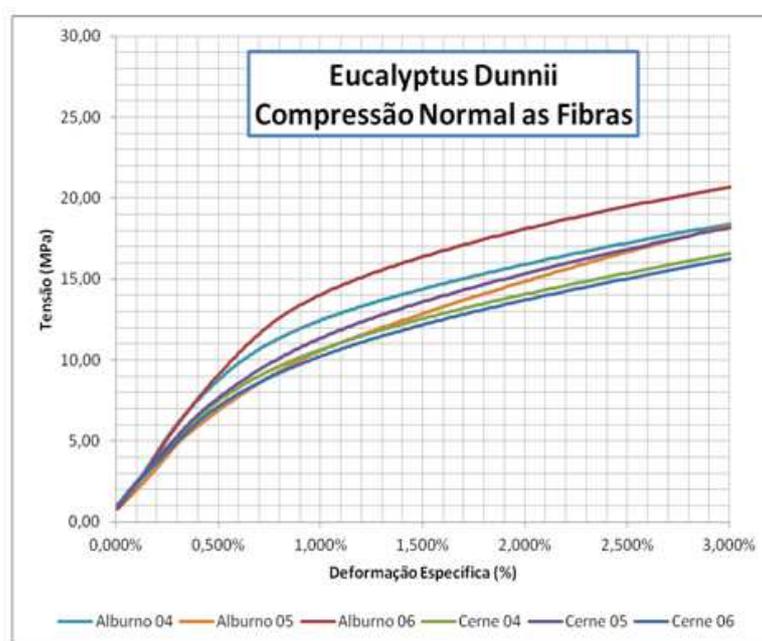


Gráfico 9-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Eucalyptus Dunnii

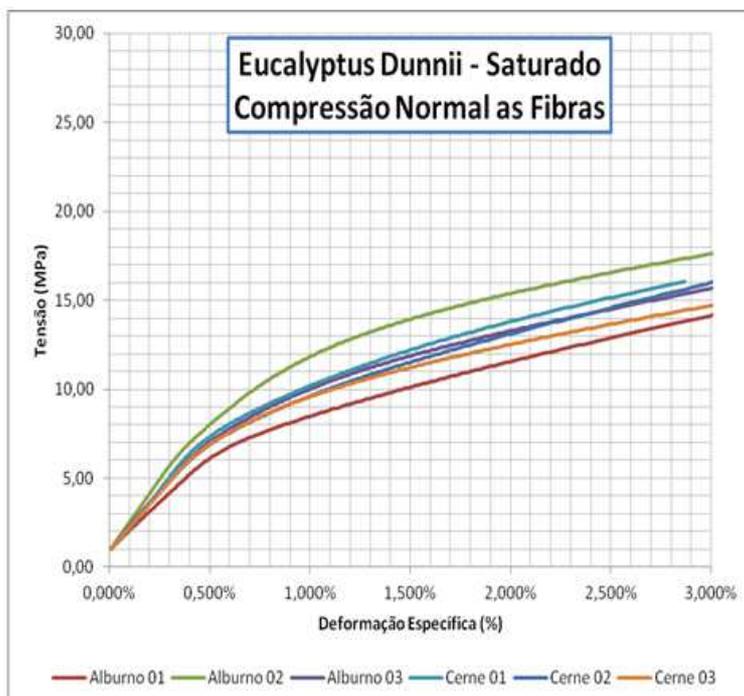


Gráfico 10-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Eucalyptus Dunnii-Saturado

Tabela 33-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Eucalyptus Dunnii

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	15,94	1,67						
2	14,92	1,19	1,52	0,285	18,69%	16,32	1,618	9,92%
3	18,09	1,70						
Saturado								
4	11,58	1,04						
5	15,41	1,43	1,24	0,195	15,67%	13,43	1,918	14,28%
6	13,31	1,25						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	14,08	1,34						
2	15,37	1,33	1,34	0,004	0,27%	14,41	0,841	5,84%
3	13,79	1,26						
Saturado								
4	13,82	1,33						
5	13,15	1,21	1,27	0,059	4,68%	13,17	0,640	4,86%
6	12,54	1,26						

Tabela 34-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras - *Eucalyptus Dunii*

Resumo : Alburno x Cerne					
RESISTÊNCIA (MPa)	Ambiente	13,43	x	13,17	
	Saturada	16,32	x	14,41	
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	1,24	x	1,27	
	Saturada	1,52	x	1,34	

4.3.3 Araucária

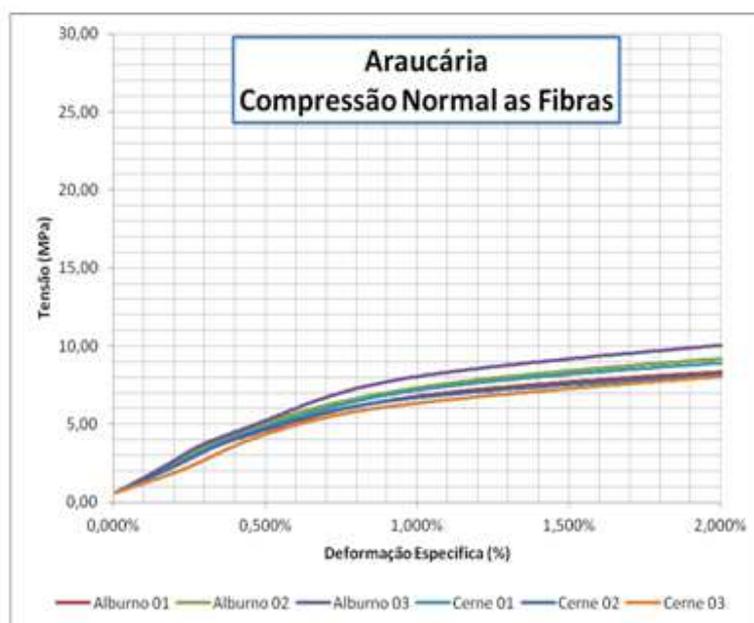


Gráfico 11-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras - Araucária

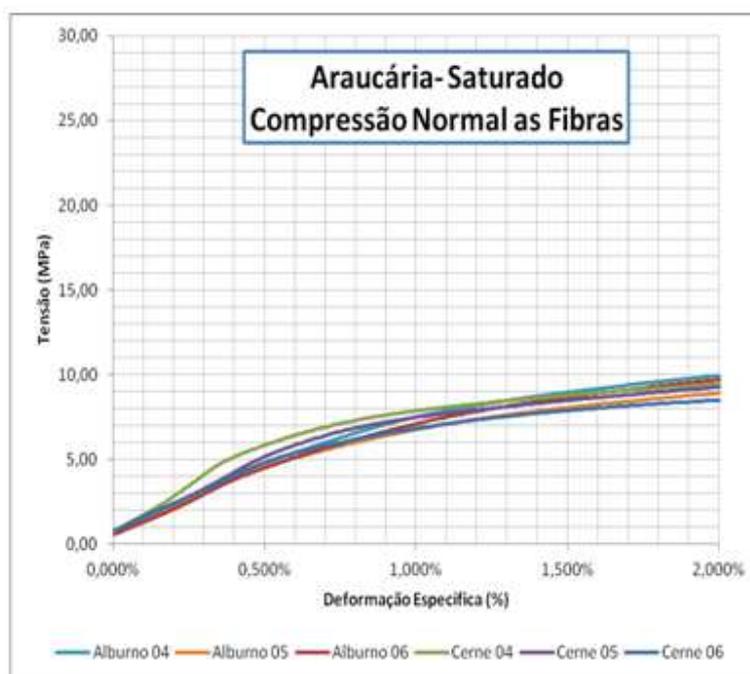


Gráfico 12-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Araucária Saturado

Tabela 35-Resultados ensaio de Compressão Normal às Fibras – Cambará

CP	Tensão Máxima (MPa)	E (GPa)	E Médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Alburno								
Seco ao Ar								
1	8,36	0,85						
2	9,20	0,95	0,91	0,058	6,30%	9,20	0,845	9,18%
3	10,05	0,94						
Saturado								
4	9,98	0,83						
5	8,92	0,84	0,82	0,033	4,09%	9,54	0,552	5,79%
6	9,72	0,78						
Cerne								
Seco ao Ar								
1	9,46	1,14						
2	9,29	0,89	1,01	0,180	17,76%	9,09	0,507	5,58%
3	8,51	0,83						
Saturado								
4	8,92	0,89						
5	8,18	0,88	0,85	0,062	7,27%	8,39	0,466	5,55%
6	8,06	0,78						

Tabela 36-Resumo dos resultados ensaio de compressão normal às fibras – Cambará

Resumo : Alburno x Cerne				
RESISTÊNCIA (MPa)	Ambiente	9,20	x	8,39
	Saturada	9,54	x	9,09
Módulo de Elasticidade (GPa)	Ambiente	0,91	x	0,85
	Saturada	0,82	x	1,01

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para organizar e facilitar as análises, esse capítulo foi dividido em itens, sendo eles: Comparativo Cerne x Alburno, Resistência na Compressão Normal e Paralela às Fibras, Relação Madeira Totalmente Saturada e por fim Considerações sobre o ensaio de Flexão Simples Reta.

Alguns resultados apresentaram conflitos com a literatura existente, essas variações nos resultados podem ser influenciadas principalmente por 3 motivos: a idade das árvores, sua posição no tronco bem como uma questão específica a qual é posta em discussão a eficácia do método visual para identificação do cerne em coníferas, pois não se há um consenso a respeito desse assunto pelos especialistas da área.

5.1 Comparativo Cerne x Alburno

Dos resultados dos ensaios de Compressão Normal às Fibras, foram obtidos:

Tabela 37-Relação Cerne x Alburno à Umidade Ambiente

EUCALIPTO	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	13,43	-2,00%
	Cerne	Ambiente	13,17	
ARAUCÁRIA	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	9,20	3,53%
	Cerne	Ambiente	9,54	
CAMBARÁ	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	12,45	21,10%
	Cerne	Ambiente	15,78	

Tabela 38-Relação Cerne x Alburno Totalmente Saturado

EUCALIPTO	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Saturado	16,32	-13,21%
	Cerne	Saturado	14,41	
ARAUCÁRIA	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Saturado	9,20	-9,65%
	Cerne	Saturado	8,39	
CAMBARÁ	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Saturado	12,05	12,68%
	Cerne	Saturado	13,80	

Dos resultados dos ensaios de Flexão Simples Reta, foram obtidos:

Tabela 39-Comparativo Cerne x Alburno Módulo de Elasticidade

ARAUCÁRIA	E(GPa) Média		Diferença Ambiente (%)	Diferença Saturado (%)
	Ambiente	Saturada		
Alburno	12,11	9,56	23,32%	26,23%
Cerne	15,79	12,96		
EUCALIPTO	E(GPa) Média		Diferença Ambiente (%)	Diferença Saturado (%)
	Ambiente	Saturada		
Alburno	9,86	7,75	10,99%	6,74%
Cerne	11,07	8,31		
CAMBARÁ	E(GPa) Média		Diferença Ambiente (%)	Diferença Saturado (%)
	Ambiente	Saturada		
Alburno	13,32	11,35	9,70%	8,14%
Cerne	14,75	12,35		

Segundo o artigo desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA, o parâmetro densidade básica não varia significativamente entre cerne e alburno de uma mesma espécie.

Considerando as informações acima, não é possível afirmar que o cerne é mais resistente que o alburno de uma mesma espécie de madeira. Devido a inúmeros fatores físicos já mencionados como posição no tronco, presença de defeitos naturais, etc. A variação média dos resultados é insuficiente a fim de sugerir uma nova classificação, abandonando a metodologia convencional.

Ao analisar os resultados dos ensaios de flexão simples reta, pode-se ressaltar um desempenho superior do cerne frente ao alburno.

Porém ainda assim não é possível classificar esse material de forma diferente da convencional, como de primeira categoria ignorando o efeito do coeficiente de minoração $k_{mod,3}$. Devido à diferença não significativa de resistência entre os elementos estudados.

5.2 Resistência e Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela às Fibras

Devido às dificuldades encontradas referentes à influência dos fatores citados no início deste capítulo, não serão discutidos os resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras.

5.3 Resistência na Compressão Normal às Fibras

Para os ensaios de compressão normal às fibras, foram comparados os resultados obtidos com a Tabela E.1 e E.2 do anexo E da NBR 7190/97.

Cabe aqui ressaltar o fato que os valores fornecidos pela norma não consideram a influência do cerne ou alburno na composição da madeira estudada. Sendo assim, a título de comparação, foi adotado o valor médio entre cerne e alburno. A seguir a Tabela 40-Comparativo dos resultados dos ensaios com os valores fornecidos pela NBR7190/97 mostra o resumo em que se baseou esse trecho da análise.

Tabela 40-Comparativo dos resultados dos ensaios com os valores fornecidos pela NBR7190/97

EUCALIPTO	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	$f_{c90,k}$ médio	$f_{c90,k}$ NBR 7190/97	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	13,43	13,30	14,00	-5,25%
	Cerne	Ambiente	13,17			
ARAUCÁRIA	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	$f_{c90,k}$ médio	$f_{c90,k}$ NBR 7190/97	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	9,20	9,37	10,23	-9,16%
	Cerne	Ambiente	9,54			
CAMBARÁ	Tipo	Condição	$f_{c90,k}$	$f_{c90,k}$ médio	$f_{c90,k}$ NBR 7190/97	Diferença (%)
RESISTÊNCIA (MPa)	Alburno	Ambiente	12,45	14,12	14,00	0,81%
	Cerne	Ambiente	15,78			

Fonte: Adaptado NBR 7190/97.

A tabela E.1 do anexo E, não possui especificamente a descrição das propriedades mecânicas da madeira de Cambará, sendo assim, para ser possível estabelecer uma base de comparação, adotou-se a uma espécie do mesmo gênero, *Vochysia spp*, a Casca Grossa.

Os valores sugeridos pela norma brasileira são baseados em ensaios com uma quantidade maior de corpos de prova, fator que aumenta a confiabilidade dos resultados. Para os fins propostos a este trabalho, os resultados se mostram consistentes e comprovam a compatibilidade do ensaio conforme a Norma COPANT 30:1-011.

5.4 Ensaio de Flexão Simples Reta

Esse tópico de análise leva em consideração os mesmos critérios adotados para a compressão normal às fibras, acrescido dos resultados fornecidos pelo IPT.

Tabela 41-Análises Ensaio de Flexão Simples Reta

ARAUCÁRIA	E(GPa) Média		NBR 7190/97	IPT	Var. NBR	Var. IPT
	Ambiente	Média				
Alburno	12,11	13,95	15,23	13,51	-9,15%	2,85%
Cerne	15,79					
EUCALIPTO	E(GPa) Média		NBR 7190/97	IPT	Var. NBR	Var. IPT
	Ambiente					
Alburno	9,86	10,46	18,03	-	-72,29%	-
Cerne	11,07					
CAMBARÁ	E(GPa) Média		NBR 7190/97	IPT	Var. NBR	Var. IPT
	Ambiente					
Alburno	13,32	14,03	16,22	11,02	-15,63%	18,54%
Cerne	14,75					

Fonte: Adaptado NBR 7190/97 e IPT-Madeira: Uso Sustentável na Construção Civil.

As análises referentes a esse tópico estão baseadas nos valores fornecidos pela norma brasileira, o livro: Madeira Uso Sustentável na Construção Civil, desenvolvidos por pesquisadores do IPT e também o artigo "OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MADEIRAS DE Patagonula americana E

Araucaria angustifolia POR MEIO DO MÉTODO ULTRA-SONORO” desenvolvido por um grupo de pesquisa de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria.

A NBR 7190/97 fornece valores do Módulo de Elasticidade para o ensaio de compressão normal às Fibras, já o trabalho do IPT citado, já considera os valores para o ensaio de flexão, o que caracteriza uma melhor base de comparação.

Como mostrado na tabela acima, os valores para a espécie Araucária foi o que mais se aproximou dos valores aos quais foi comparada. Os valores obtidos no artigo escrito por STANGERLIN *et al.*(2008) para o módulo de Elasticidade foram 10,897 e 14,367 em média para as situações de lenho juvenil e adulto para a espécie de Araucária. É evidente que são situações diferentes, mas foram colocadas neste tópico a fim de ilustrar a compatibilidade dos resultados obtidos neste trabalho.

Para a espécie de Eucalipto, o material desenvolvido pelo IPT não contém informações a respeito da espécie utilizada. Os resultados se mostraram completamente discrepantes ao sugeridos pela NBR 7190/97.

A espécie de Cambará como citado anteriormente, não possui dados na norma brasileira. Entretanto os resultados obtidos variaram muito frente ao referencial do IPT. Fato que poder ser explicado devido á grande influência das dimensões dos corpos de prova frente ao modelo teórico adotado.

Nessa abordagem teórica a inércia do material contribui significativamente no resultado final, o módulo de elasticidade. Sendo que a variação de 0,10 mm na altura da base do corpo de prova implica em uma variação de 1,00 GPa no Módulo de Elasticidade do material.

Esta abordagem possui o diferencial de utilizar menor quantidade de material, bem como não necessita de equipamentos de grande porte para beneficiá-los. Cabe aqui, questionar a validade dos resultados deste ensaio, haja vista a pequena quantidade de corpos de prova utilizados na experimentação, bem como a influência da variabilidade das dimensões nos resultados obtidos.

5.5 Relação Madeira Totalmente Saturada

5.5.1 Para os ensaios de Compressão Paralela e Normal às Fibras da Madeira

Os resultados desses ensaios em relação á saturação das peças foi totalmente discrepante por causas desconhecidas, portanto também não serão abordados nesse tópico.

5.5.2 Para os ensaios de Flexão Simples

Tabela 42-Resumo Ensaio de Flexão Simples Reto - Análise $k_{mod,2}$

ARAUCÁRIA	E(GPa) Média		Ambiente/Saturado
	Ambiente	Saturado	
Alburno	12,11	9,56	0,79
Cerne	15,79	12,96	0,82
EUCALIPTO	E(GPa) Média		Ambiente/Saturado
	Ambiente	Saturado	
Alburno	9,86	7,75	0,79
Cerne	11,07	8,31	0,75
CAMBARÁ	E(GPa) Média		Ambiente/Saturado
	Ambiente	Saturado	
Alburno	13,32	11,35	0,85
Cerne	14,75	12,35	0,84

Segundo a NBR 7190/97 o coeficiente responsável por ponderar o efeito da saturação da madeira é o $k_{mod,2}$. Para o caso específico de madeira serrada totalmente saturada é sugerida a relação: $K_{mod,2}=0,65$. Esse coeficiente é utilizado tanto na minoração de resistência quanto do módulo de Elasticidade do Material.

Como já estudado por LOSGDON e CALIL JUNIOR (2002), o valor fornecido pela NBR 7190/97 é uma aproximação, com certo conservadorismo podendo claro, ser melhorada. Uma forma de se abordar essa questão, seria adotar coeficientes individuais para cada espécie de madeira. Também é importante ressaltar a influência das dimensões dos corpos de prova nesses resultados

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões desta pesquisa são:

- Os ensaios de flexão simples com carregamento em uma viga em balanço com modelos reduzidos fornecem valores compatíveis com os sugeridos pela literatura;
- O ensaio de compressão normal às fibras segundo a norma COPANT 30:1-011 confirmou as relações sugeridas pela NBR 7190/97 no parâmetro resistência;
- O valor do coeficiente de minoração de resistência para madeira serrada totalmente saturada, fornecido pela NBR 7190/97 é uma aproximação, com certo conservadorismo dos valores obtidos experimentalmente;

Finalmente, conclui-se que a diferença de resistência mecânica entre cerne e alburno não é significativa a ponto de ser possível considerar o cerne madeira de primeira categoria, evitando assim a minoração de resistência de cálculo da estrutura.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de viabilizar a execução dos ensaios de flexão simples, utilizando um número maior de corpos de prova sem precisar beneficiar um grande volume de madeira. Sugere-se desenvolver um estudo avaliando a variação referente à utilização dos corpos de prova não padronizados a fim de encontrar um fator de conversão que confira aos resultados obtidos maior confiabilidade estatística, sendo possível também verificar a influência do comprimento do elemento estrutural no coeficiente $k_{mod,2}$,

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINCI, **Fluxograma de produção de laminas de madeira**, Artigo técnico Nº19, Maio, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 – 09: standard test methods for small clear specimens of timber**. West Conshohocken, 2009. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . **NBR 12297: madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral : medição e quantificação de defeitos**. Rio de Janeiro, 1991b. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190; **Projeto de Estruturas de Madeira**: Rio de Janeiro, 1997.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. 3. ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1995.

BESSA, F. M. S. **Criação de uma xiloteca electrónica (e-xiloteca) tropical e sua utilização para identificação e caracterização de madeiras com fins científicos e econômicos**. Universidade técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2009, 368 p.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing. ISBN 0-89464-777-6. Nova York, 1993. 712 p.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo. Livraria Nobel S.A. 154p. 1991.

COPANT - COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Maderas: método de determinación de la compresión perpendicular al grano**. 466. COPANT, 1972.

COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. 2001, 42 p.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade**. Santa Maria : CEPEF/FATEC, 1992. 33p.

FERNANDES, P.S. Variações de Densidade da Madeira e suas Relações com as Tensões de Crescimento em Progênies de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. 1982. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba

FIGUEROA, Manuel Jesús Manríquez. **Coeficientes de Modificação das Propriedades Mecânicas da Madeira devidos à Temperatura**. Tese de Doutorado. 2012. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - wood as an engineering material**. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1999. 463 p.

HELLMEISTER, J.C. (1982) **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. São Carlos. 119p. Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sistema de Informações de Madeiras Brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 291p.

KROETZ, Henrique Machado; MELO, Jonathan da Maia Santos de; TESSARI, Rodolfo Krul. **Desenvolvimento de software para determinação dos esforços internos, resistência e análise da confiabilidade de vigas de concreto armado**. 2012. 92f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

LNEC – **Pinho bravo para estruturas. Madeira para construção**. Ficha M2. (1997).

LOBAO, Moisés Silveira; DELLA LUCIA, Ricardo Marius; MOREIRA, Márcio Sampaio Sarmet and GOMES, Adriana. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades**. Rev. Árvore [online]. 2004, vol.28, n.6, pp. 889-894.

LOSGDON, Norman Barros; CALIL JUNIOR, Carlito. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 18, p. 77-107, 2002.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais.** Manaus: SEBRAE/AM/Programa de Desenvolvimento Empresarial e Tecnológico, 2000, 212 p.

MALAN, F. S. **Eucalyptus improvement for lumber production.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MESCAU, Renan. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas DA madeira de morus nigra e potenciais aptidões de uso.** 2010. Monografia de Especialização em Gestão da Indústria Madeireira. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NF B 51-016. Bois. **Essai de flexion statique. Détermination du module d'élasticité flexion statique de petites éprouvettes sans défaut.** AFNOR, 1987

NP 4305 (1995) Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas-Classificação Visual.IPQ

NUNES, Lina e CRUZ, Helena. **A madeira como material de construção.** 2007. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal 2007.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003 6a Edição.

SILVA, José de Castro and OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva. **Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de Eucalyptus saligna Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar.** Rev. Árvore [online]. 2003, vol.27, n.2, pp. 233-239.

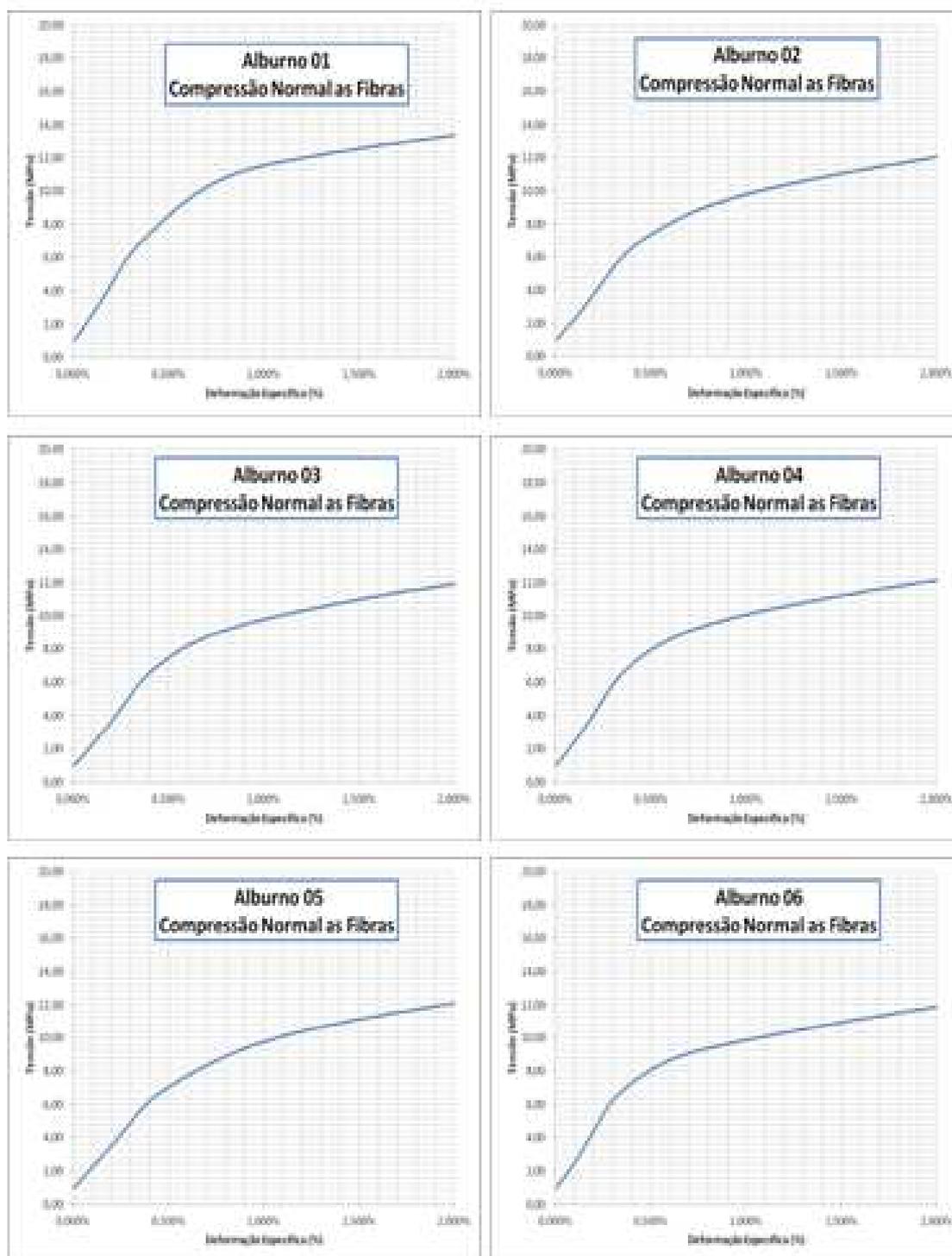
SINDUSCON-SP. Vários Autores. **Madeira: Uso Sustentável na Construção Civil.** São Paulo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Sinduscon SP. 2003

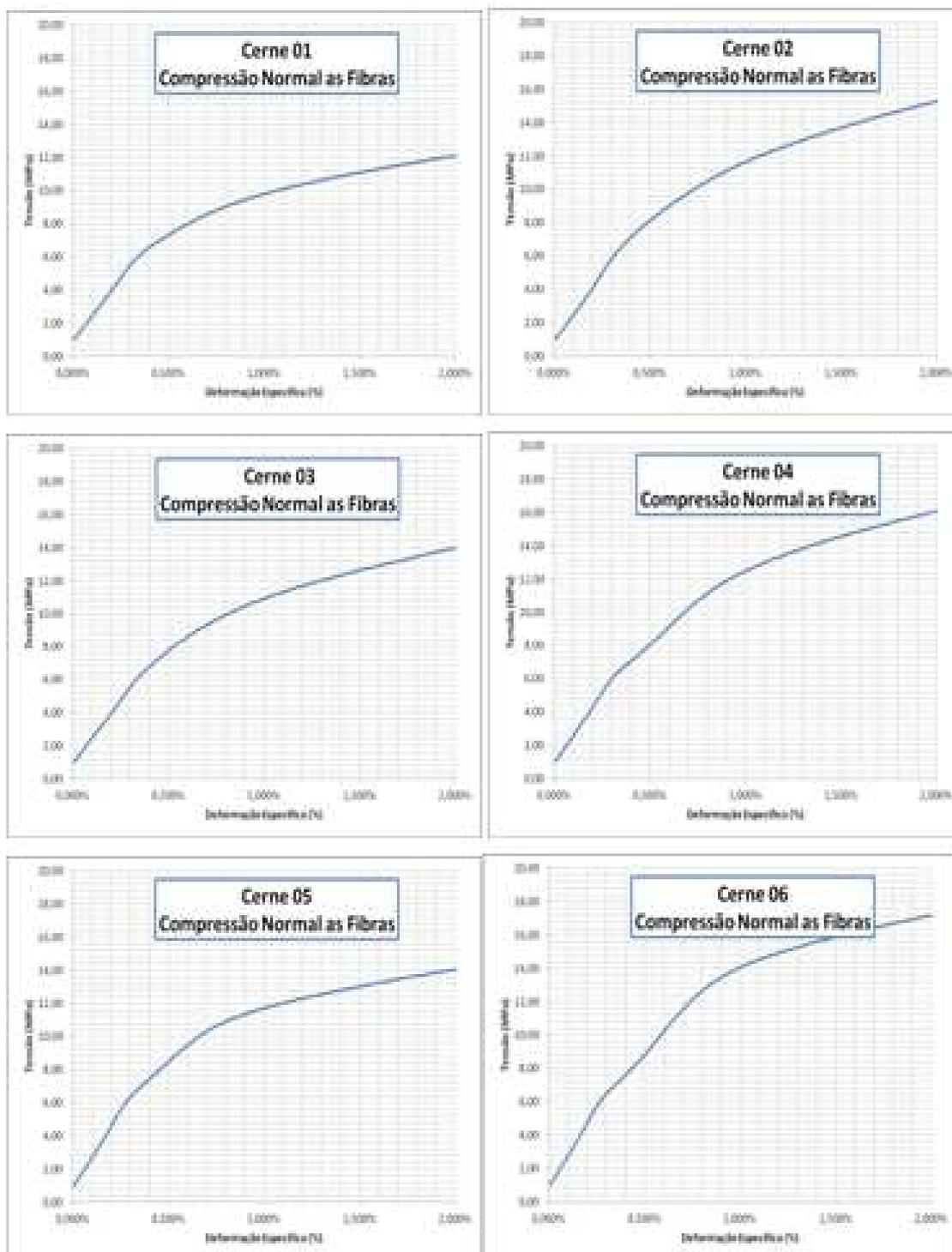
STANGERLIN, Diego Martins; DOMINGUES, João Manuel Xavier; SANTINI, Elio José; CALEGARI, Leandro ; MELO; Rafael Rodolfo de; GATTO; Darci Alberto; HASELEIN; Clovis Roberto. **Obtenção do módulo de elasticidade em madeiras de *Patagonula Americana* e *Araucaria Angustifolia* por meio do método ultrassônico** Revista científica eletrônica de engenharia florestal. Edição número 11. 2008

VITAL, Benedito Rocha; MACIEL, Antônio da Silva and DELLA LUCIA, Ricardo Marius. **Efeito de ciclos de umidade relativa e temperatura do ar na resistência de juntas coladas com lâminas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Smith e chapas de fibra de densidade média (MDF).** Rev. Árvore [online]. 2005, vol.29, n.5, pp. 801-807.

APÊNDICE A

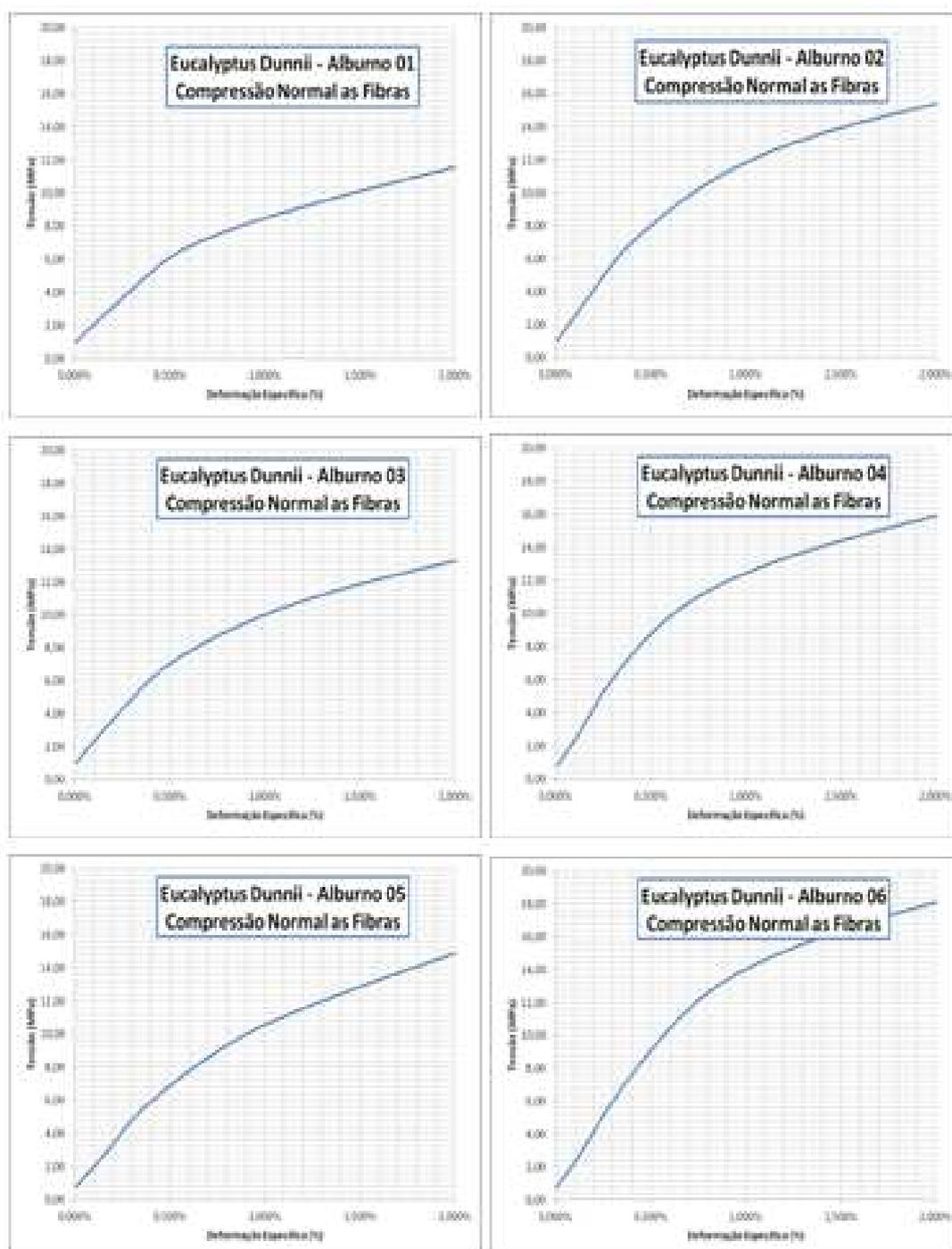
Compressão Normal às Fibras da Madeira- Cambará- Alburno



APÊNDICE B**Compressão Normal às Fibras da Madeira- Cambará- Cerne**

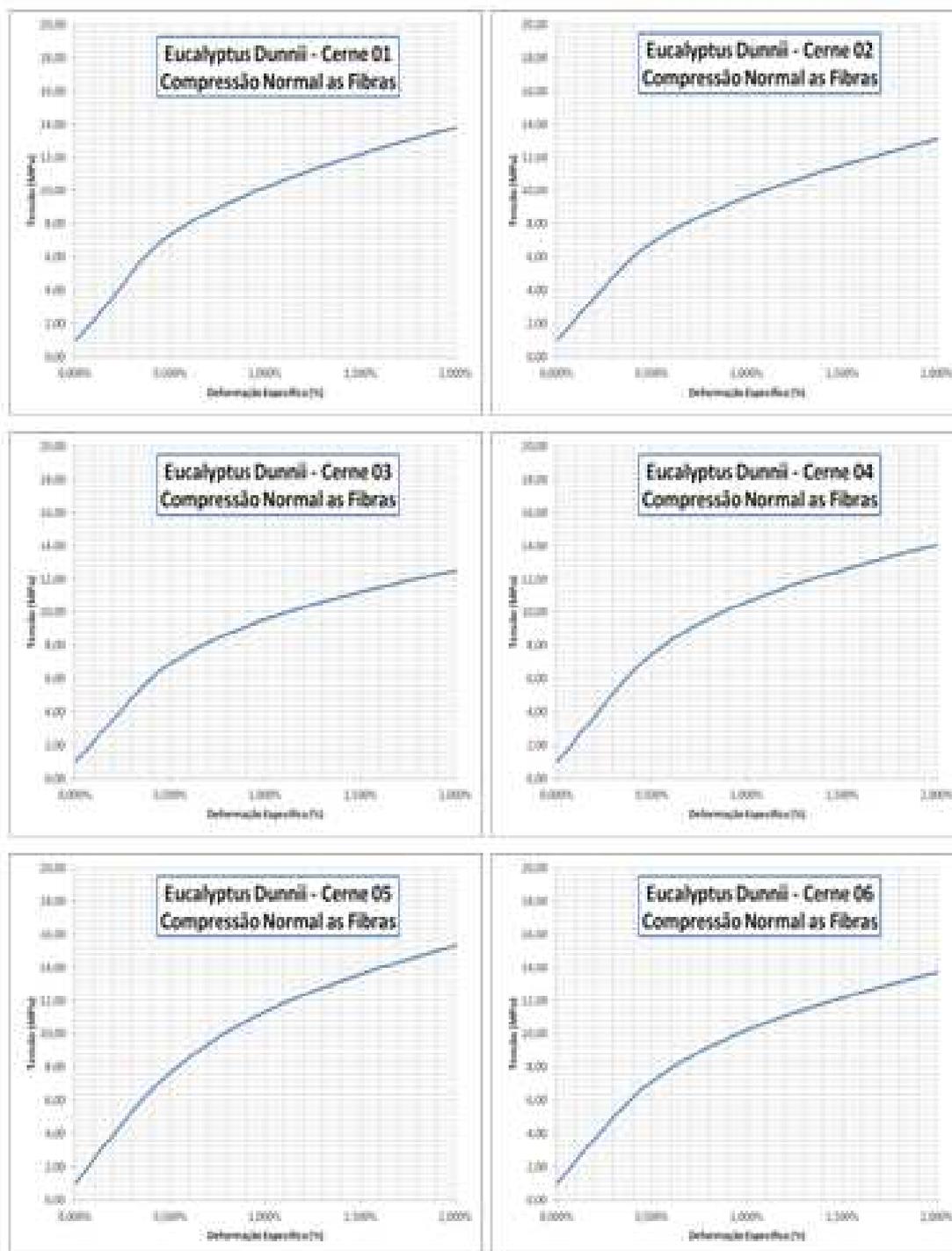
APÊNDICE C

Compressão Normal às Fibras da Madeira- Eucalyptus Durnii – Alburno



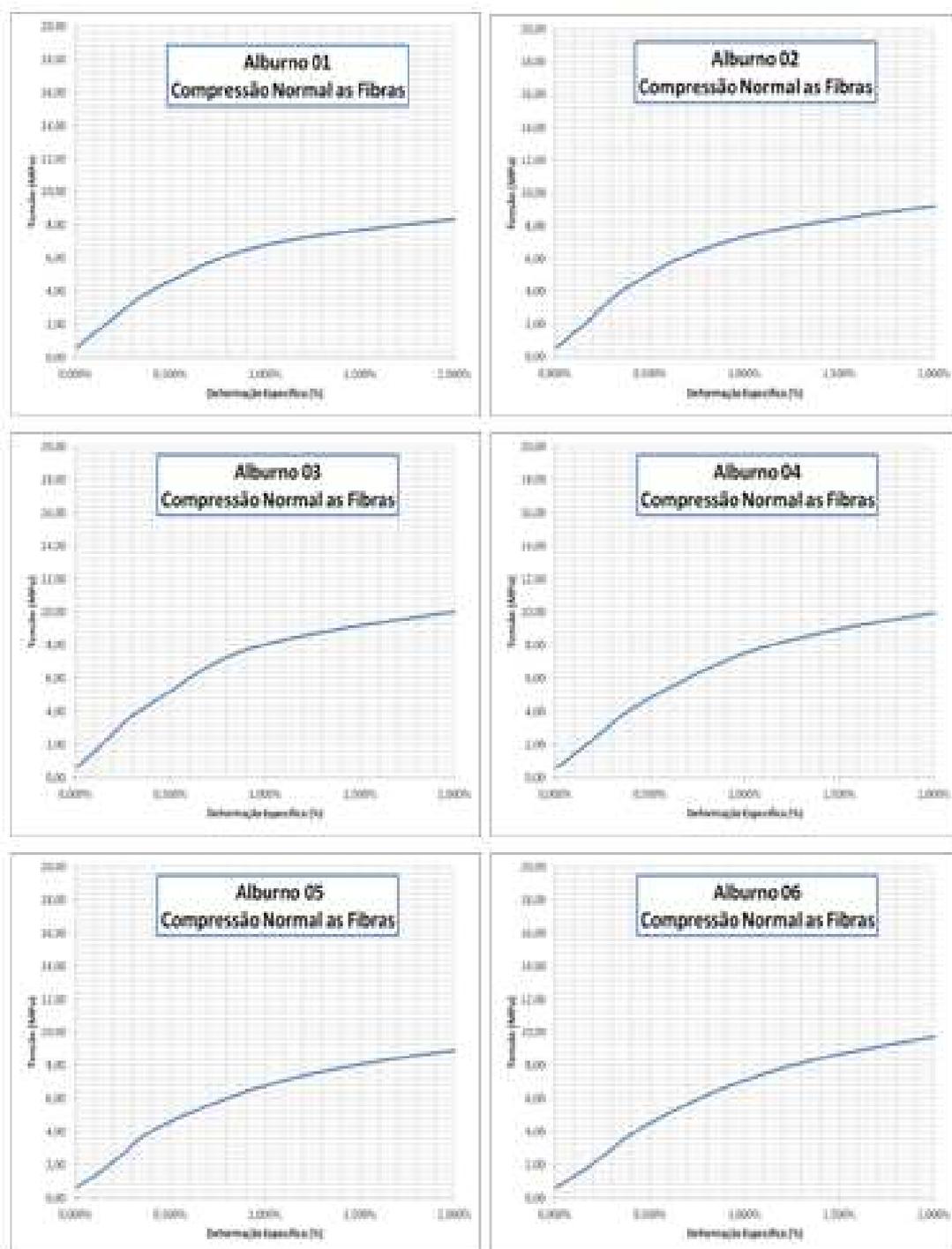
APÊNDICE D

Compressão Normal às Fibras da Madeira- Eucalyptus Durnii – Cerne



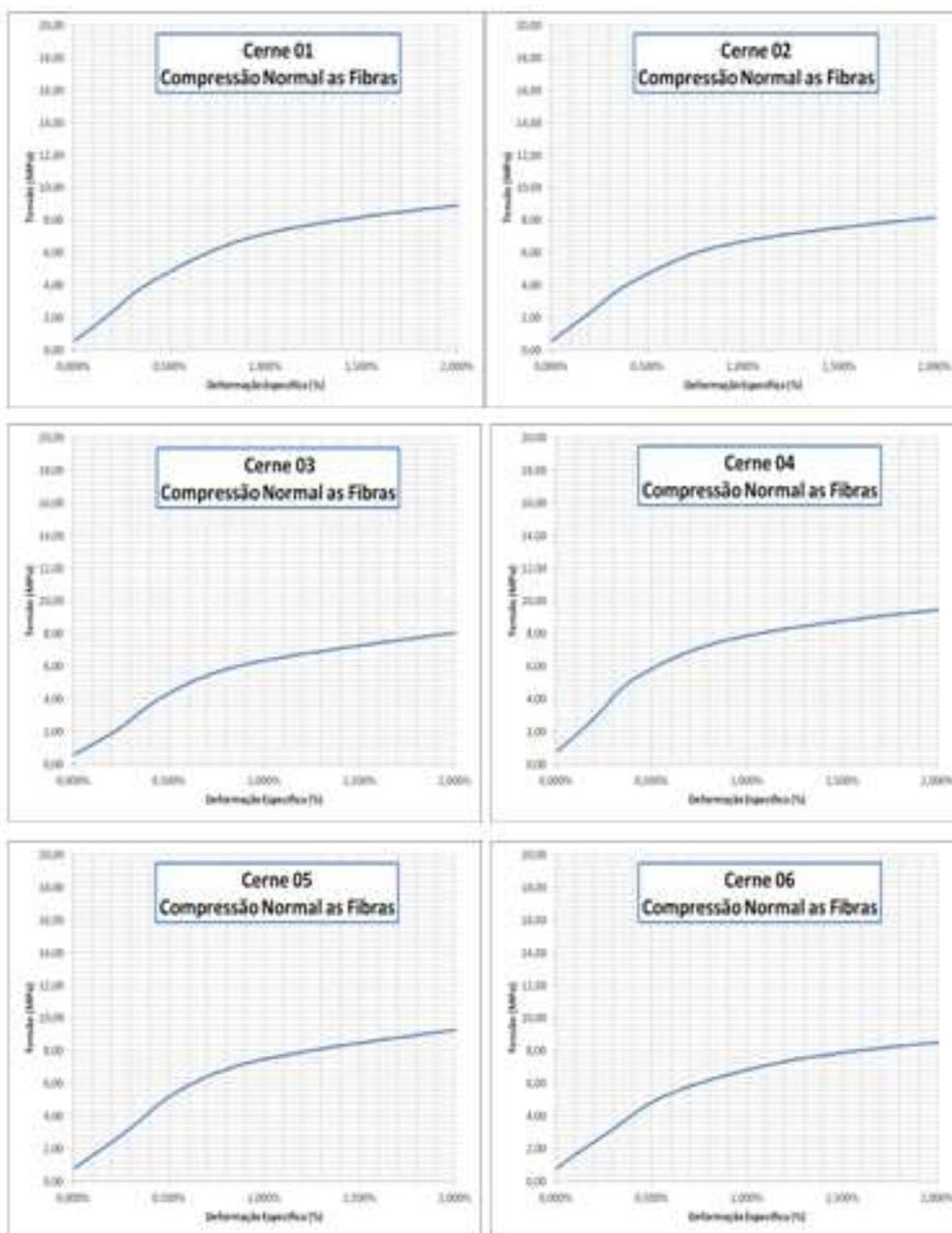
APÊNDICE E

Compressão Normal às Fibras da Madeira- Araucária – Alburno



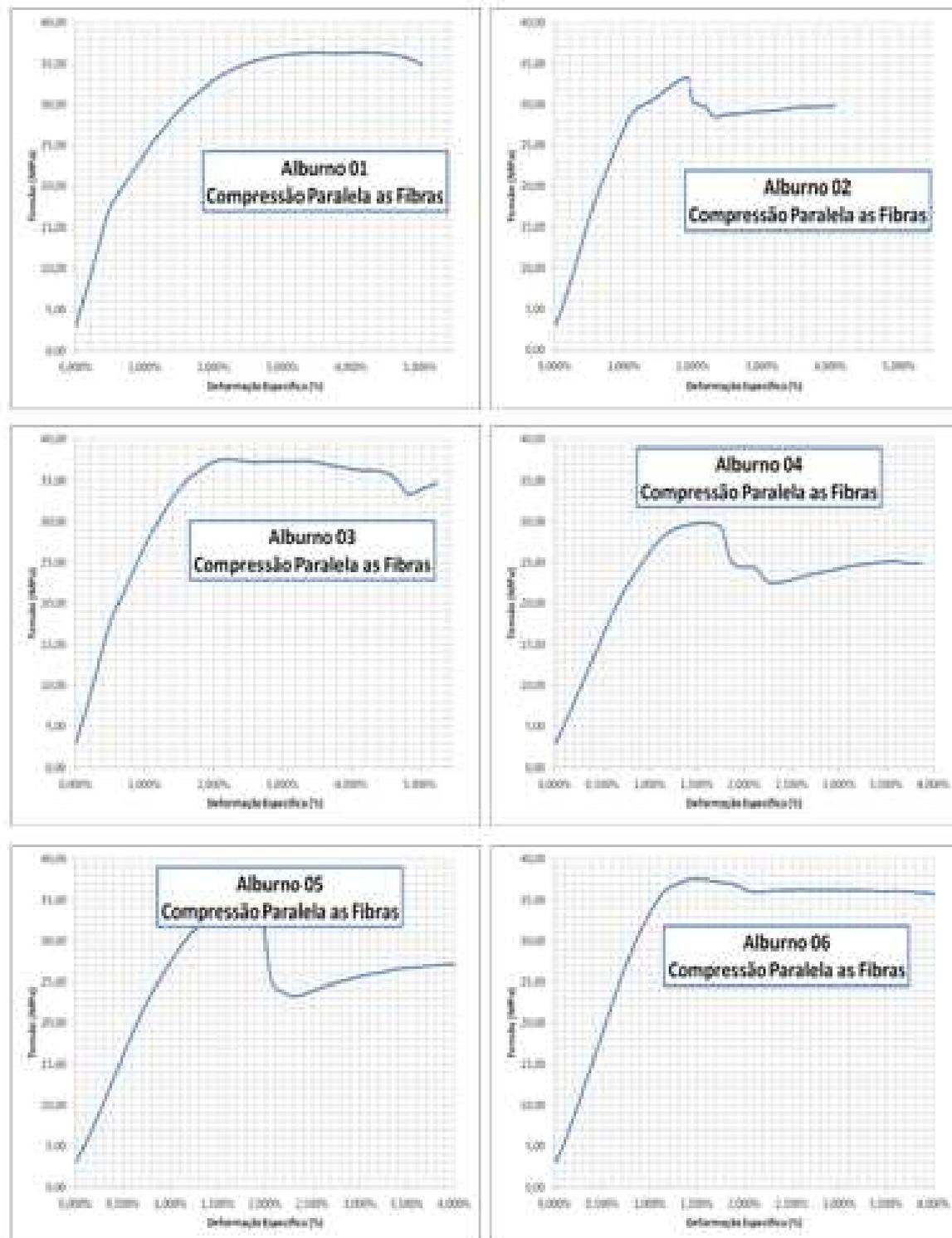
APÊNDICE F

Compressão Normal às Fibras da Madeira- Araucária – Cerne



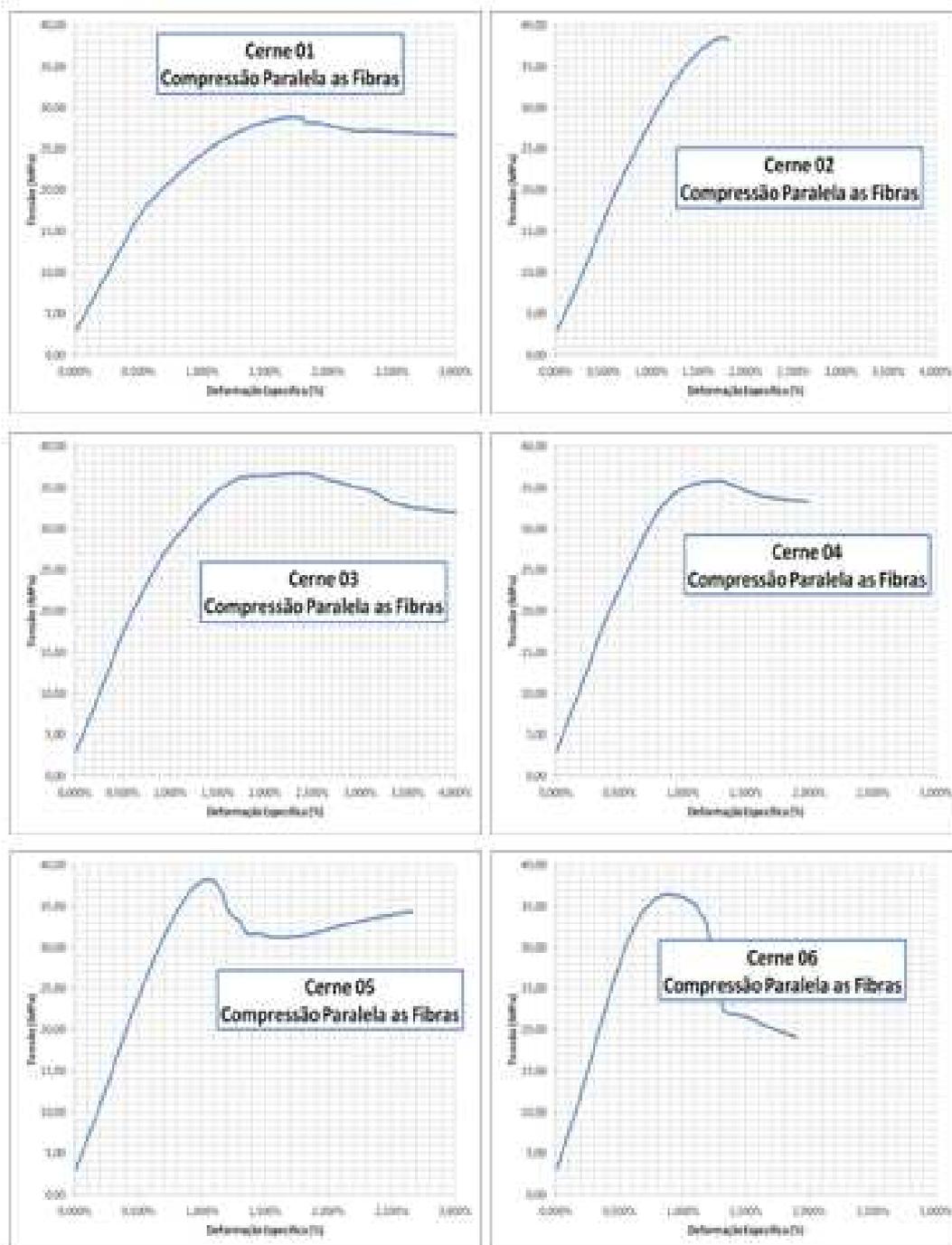
APENDICE G

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Cambará – Alburno



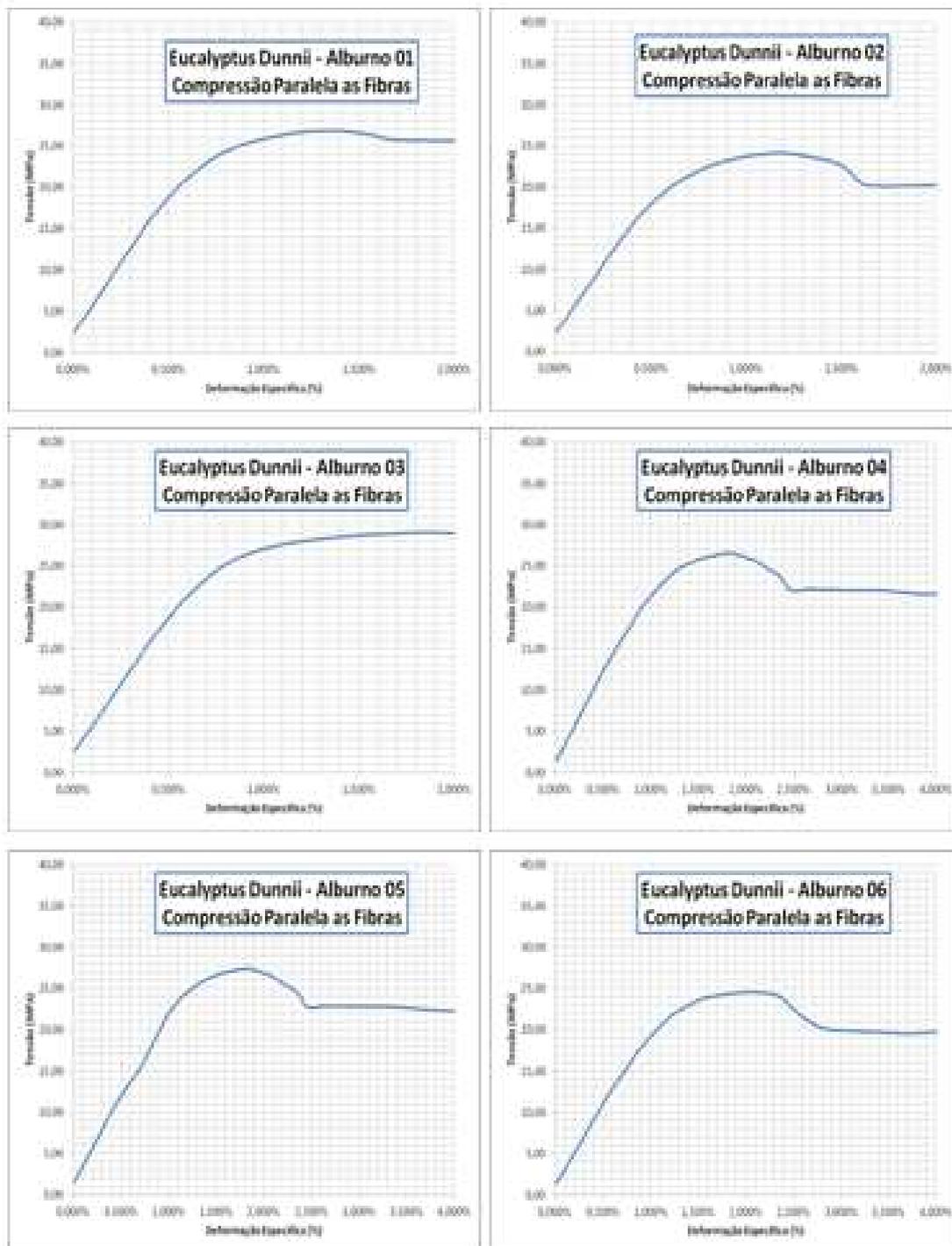
APENDICE H

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Cambará – Cerne



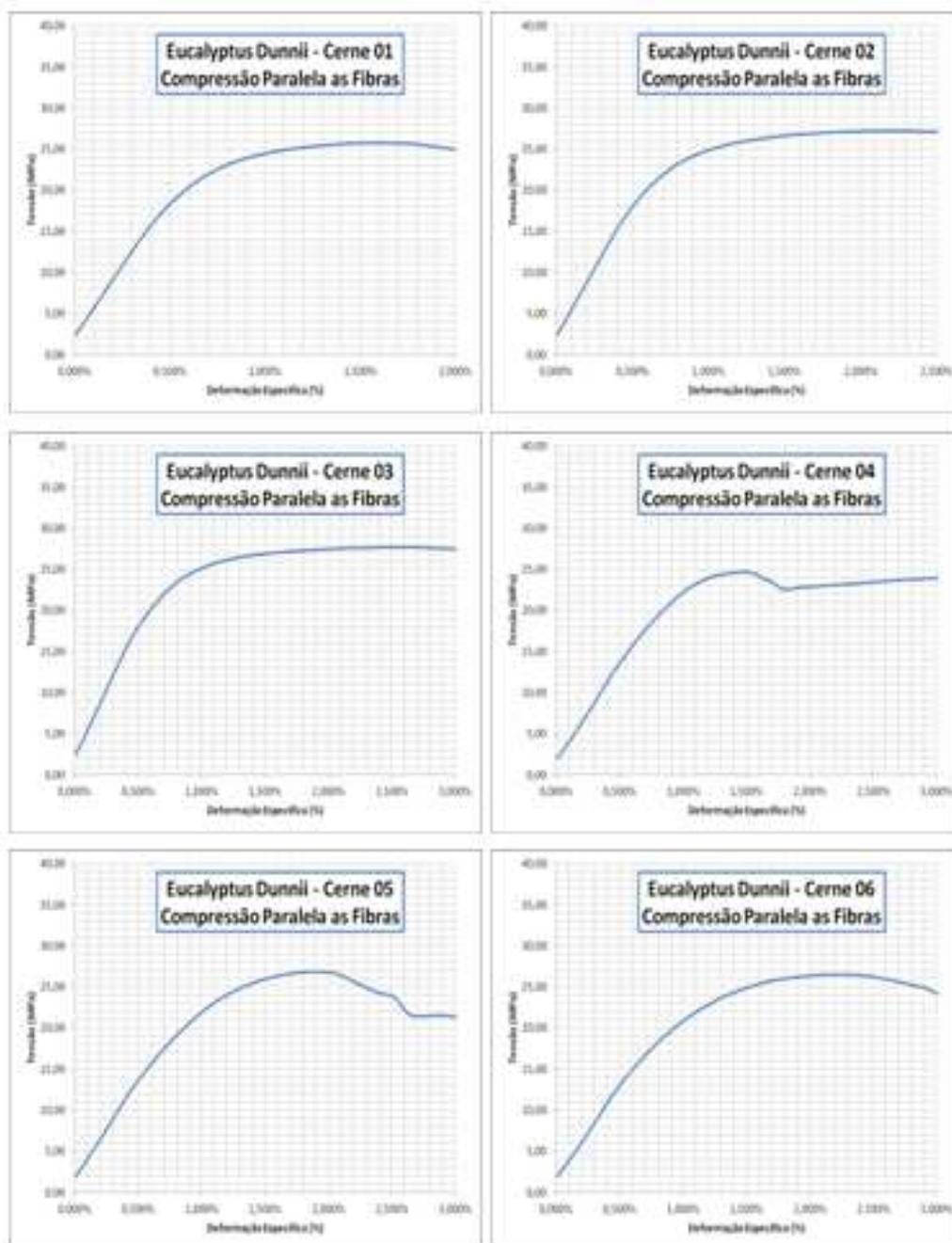
APENDICE I

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Eucalyptus Dunni – Alburno



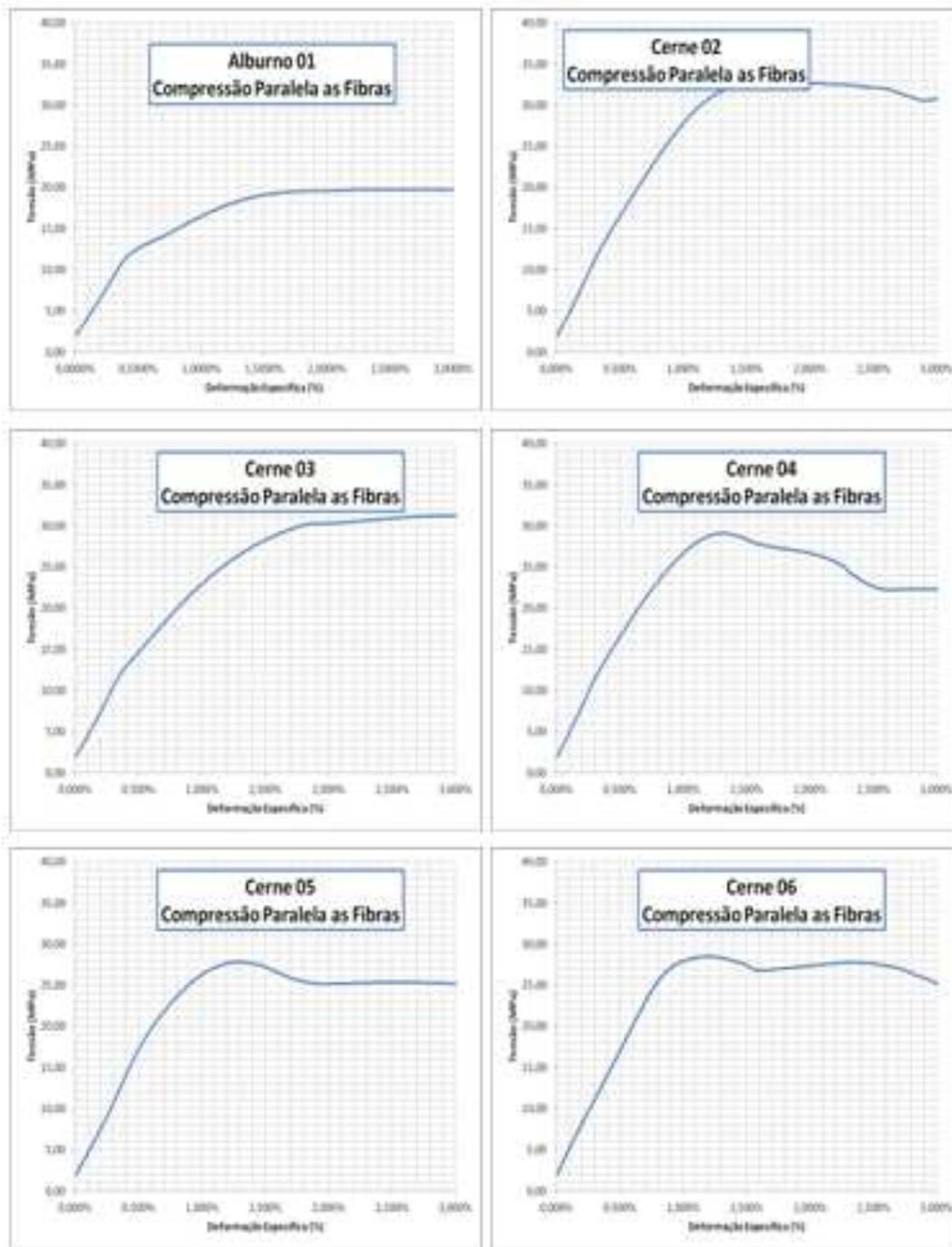
APENDICE J

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Eucalyptus Durnii – Cerne



APENDICE K

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Araucária – Alburno



APENDICE L

Compressão Paralela às Fibras da Madeira- Araucária – Cerne

