

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

LUCIANO ROSSI BILESKY

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA  
MADEIRA DE *Eucalyptus citriodora* AO CISALHAMENTO  
ATRAVÉS DO ENSAIO DE TRAÇÃO “*OFF-AXIS*”.

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista, para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ventrorm

Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio De Conti

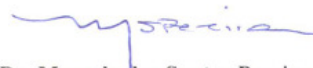
Guaratinguetá  
2010

**LUCIANO ROSSI BILESKY**

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira  
Coordenador


**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. CLÁUDIO DE CONTI  
Co-Orientador / Unesp-Itapeva



Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI  
Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO  
Unesp-Feg

Agosto de 2010

B595s

Bilesky, Luciano Rossi

Simulação numérica do comportamento da madeira de Eucalyptus citriodora ao cisalhamento através do ensaio de tração "Off-Axis" / Lucian Rossi Bilesky. – Guaratinguetá : [s.n.], 2010

120 f. : il.

Bibliografia: f. 115-118

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Venturin

Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio De Conti

1. Madeira 2. Cisalhamento 3. Métodos dos elementos finitos I. Título

CDU 674.02

## **DADOS CURRICULARES**

**LUCIANO ROSSI BILESKY**

NASCIMENTO	09.06.1983 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Luiz José Bilesky Maria Guilhermina Rossi
2001/2004	Curso de Graduação Licenciatura em Física – Faculdades Integradas da Região de Avaré

Dedico de modo especial, ao meu grande amor, Carolina Kasemodel, que foi a grande responsável para que eu continuasse no curso, incentivando, e exercitando bastante sua paciência com muito carinho nas minhas horas de crise.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade que me foi dada,  
ao meu orientador, *Prof. Dr. Cláudio de Conti* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,  
à minha família em especial, aos meus pais Luiz e Maria Guilhermina que sempre me incentivavam e nada deixaram faltar para que eu realizasse meus estudos.  
aos meus avós, *Conceição, José Bilesky, Lourdes e José Rossi*, que me propiciaram esta família maravilhosa,  
ao meu irmão Paulo pelo incentivo e disposição em auxiliar,  
aos meus grandes amigos *Vanessa Tavares e Renato Rezende* pelos seus ouvidos, incentivo e a alegria,  
à *Priscila Roel*, grande amiga incentivadora, pela dedicação e presteza,  
à família *Kasemodel*, por todo o apoio dado,  
aos amigos, alunos e direção da Escola Estadual Nicota Soares, Colégio Metodista de Itapeva e Colégio Athenas de Itararé, pelo incentivo dado,  
à empresa REKAPLAN, pela disponibilização de sua estrutura física e pessoal para a execução e principalmente impressão do trabalho,  
ao professor *Francisco José de Almeida* da UNIMEP, pelos esclarecimentos das dúvidas pertinentes ao ANSYS ®,  
aos professores *Marcos Tadeu, Ricardo Barreiros, José Cláudio Caraschi e Guilherme Stamato* do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da FEG, pela dedicação nas disciplinas ministradas,  
à *Andréia de Conti* pelo apoio e incentivo.



BILESKEY, L. R. Simulação numérica do comportamento da madeira de *Eucalyptus citriodora* ao cisalhamento através do ensaio de tração “off-axis”. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

## RESUMO

O ensaio de tração “*off-axis*” é um método utilizado para obter o comportamento de materiais ao cisalhamento. Neste ensaio o eixo de simetria do material faz um ângulo com os eixos do corpo de prova. Numa grande extensão do corpo de prova é produzido um estado de tensão uniaxial e homogêneo, diferente do que ocorre nos ensaios normatizados para o cisalhamento, com a sobreposição de tensões e deformações não lineares no corpo de prova. Neste trabalho foi realizado o estudo numérico da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” pelo método dos elementos finitos para a madeira de *Eucalyptus citriodora*. Para isto, foi realizado o estudo dos campos tensões presentes no corpo de prova do ensaio proposto pela NBR 7190 (1997), através de simulação numérica. O resultado da simulação numérica do ensaio proposto pela NBR 7190 (1997), para a madeira de *Eucalyptus citriodora*, demonstrou que não ocorre na região cisalhante um estado de tensão homogêneo como pretendido. Por outro lado, a simulação numérica do ensaio “*off-axis*” mostrou, numa região dos corpos de prova *LR* e *LT* uma distribuição de tensões homogêneas e deformações uniformes. Para o plano de ortotropia *RT* isto não ocorreu.

**PALAVRAS-CHAVE:** madeira, ensaio de cisalhamento, ensaio “*off-axis*” *Eucalyptus citriodora*, simulação numérica, método dos elementos finitos.

BILESKEY, L. R. **Numerical Simulation for shear behavior using off-axis test of *Eucalyptus citriodora***. 2010. 120 f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2010.

### **ABSTRACT**

The tensile off-axis test is a method used to obtain the shear behavior of materials. In this test, the symmetry material axis is rotated with the axes of the specimen. In a large extension of the specimen is produced a state of uniaxial and homogeneous stress, unlike what occurs standardized tests for shear, with the overlap of nonlinear stress and strain. In this work was realized a numerical study of applicability of the off-axis test by finite element method for *Eucalyptus citriodora*. For this, we performed a study of distribution of stress and strain fields in a specimen proposed by NBR 7190 (1997), through numerical simulation. The results of numerical simulation of the test proposed by NBR 7190 (1997), demonstrated that not occur a stress homogeneous state in the shear area, as desired. Moreover, the numerical simulation of the off-axis test in a large region of the specimen LR and LT, produced a homogeneous distribution of stress and uniform strains. For the orthotropic plane RT this has not happened.

**KEYWORDS:** Wood, shear test, off-axis test, *Eucalyptus citriodora*, numerical simulation, finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macro-estruturas de uma árvore, composta por copa, caule e raiz, adaptado de (ESAU, 2002). .....	25
Figura 2 - Disposição da estrutura interna do caule (PFEIL; PFEIL, 2003). .....	26
Figura 3 - Regiões de cerne e albarno no xilema (apostila) <sup>1</sup> .....	28
Figura 4 - Anéis de crescimento em madeira de conífera (apostila) <sup>1</sup> .....	29
Figura 5 - Anéis de crescimento em madeira de folhosa (apostila) <sup>1</sup> .....	30
Figura 6 - Esquema de representação de um traqueíde (ESAU, 2002). .....	31
Figura 7 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera segundo Bodig e Jayne (1982) .....	32
Figura 8 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas segundo Bodig e Jayne (1982) .....	33
Figura 9 - Composição das paredes da fibra - (a) corte transversal (b) vista lateral (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003). .....	35
Figura 10 - Referenciais <i>LRT</i> para o estudo das propriedades mecânica e físicas da madeira segundo Pfeil e Pfeil (2003). .....	37
Figura 11 - Distorções nas diversas regiões do tronco devida à secagem da tora (BODIG; JAYNE, 1982). .....	39
Figura 12 - Defeitos nas madeiras: (a) nó; (b) fendas; (c) gretas; (d) arqueadura; (e) arqueamento; (f) fibras reversas; (g) esmoado; (h) empenamento. Segundo Pfeil e Pfeil (2003). .....	40
Figura 13 - Direções relativas de referência do material madeira (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003). .....	43
Figura 14 - Simplificação do modelo da árvore à um modelo de madeira limpa com propriedades ortotrópicas: (a) árvore com suas características naturais; (b) modelo cilíndrico do tronco da árvore; (c) madeira serrada com sistema de coordenadas cilíndricas; (d) modelo ortotrópico de madeira serrada. (BODIG; JAYNE, 1982). ....	43
Figura 15 - Madeiras de diferentes regiões do tronco (BODIG; JAYNE, 1982). .....	44
Figura 16 - Gráfico tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ), comportamento elástico da madeira. Editado de Pfeil e Pfeil (2003). .....	44
Figura 17 - Mudança no sistema de coordenadas do eixo de simetria do material $X, Y$ para $1,2$ com um ângulo $\theta$ . .....	52
Figura 18 - Demonstração do cisalhamento nas fibras adaptado de (MORESCHI, 2007). .....	56

Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralelas às fibras, com as dimensões em centímetros segundo NBR 7190 (1997).....	56
Figura 20 - Mecanismo de acoplamento do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997).....	57
Figura 21 - Carregamento aplicado ao corpo de prova, adaptado de Garrido (2004)...	58
Figura 22 - Tensões distribuídas uniformemente pretendidas no ensaio de cisalhamento (MORESCHI, 2007).....	59
Figura 23 - Esquema do ensaio do vão variável, adaptado de Garrido (2004). ....	60
Figura 24 - Corpo de prova do ensaio iosipescu adaptado para madeira por Xavier (2003).....	62
Figura 25 - Esquema de dispositivo mecânico para o ensaio Iosipescu segundo ASTM D5379-93 (1993). ....	63
Figura 26 - Corpo de prova e dispositivo de solicitação de carga para o ensaio de Arcan, adaptado de Garrido (2004). ....	65
Figura 27 - Corpo de prova off-axis, $I,2$ eixo de simetria do material; $X,Y$ eixo de simetria do corpo de prova. ....	66
Figura 28 - Extensômetro na região central do corpo de prova “off-axis”, com a indicação da direção da força de tração aplicada. ....	67
Figura 29 - (a) Deformação ideal do corpo de prova “off-axis” – (b) Deformação real no corpo de prova “off-axis” adaptado de Garrido (2004). ....	68
Figura 30 - Placas oblíquas de amortecimento, formando um ângulo $\beta$ com o eixo $x$ do corpo de prova. ....	69
Figura 31 - Condições de contorno impostas ao modelo do corpo de prova. Regiões $A_1$ , $A_2$ e $A_3$ que serão consideradas neste estudo. ....	75
Figura 32 - Linhas de referência para análise dos campos de tensão.....	76
Figura 33 - Dimensões do modelo do corpo de prova “off-axis” em mm.....	79
Figura 34 - Dimensões do modelo do corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas segundo o critério de Sun e Chung (1993). ....	80
Figura 35 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas com o ângulo $\beta=\alpha$ . ....	81
Figura 36 - Geometria do modelo do corpo de prova “off-axis” para os planos de simetria $LR$ e $LT$ em mm, adaptado de Garrido (2004).....	82
Figura 37 - Dimensões do modelo do corpo de prova do ensaio de tração “off-axis” no plano de simetria $RT$ em mm, adaptado de Garrido (2004). ....	83
Figura 38 - Análise de convergência das malhas do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997) pela estabilização das tensões $\sigma_{ij}$ .....	84
Figura 39 - Análise de convergência das malhas do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997) pela estabilização das deformações $\varepsilon_{ij}$ . ....	85

Figura 40 - Malha do corpo de prova sugerida pela NBR 7190 (1997).....	85
Figura 41 – (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_x$ com unidade de medida em Pa. (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_x$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_x$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. ....	86
Figura 42 – Campos de deformações $\varepsilon_x$ no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m. ....	87
Figura 43 - Campos de deformações $\varepsilon_y$ no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m. ....	87
Figura 44 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_y$ com unidade de medida em Pa; (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_y$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_y$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. ....	88
Figura 45 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_z$ ; (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_z$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_z$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa). ....	89
Figura 46 - Campos de deformações $\varepsilon_z$ no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m. ....	90
Figura 47 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_{xy}$ ; (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_{xy}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_{xy}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa). ....	90
Figura 48 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_{xz}$ ; (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_{xz}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_{xz}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa). ....	91
Figura 49 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão $\sigma_{yz}$ ; (b-I) Gráfico das tensões $\sigma_{yz}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões $\sigma_{yz}$ normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa). ....	92
Figura 50- Análise de convergência das malhas para corpo de prova “off-axis” com placas normais ao seu comprimento.....	93
Figura 51 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas normais à direção do comprimento. (a) tem-se os campos de deformações $\varepsilon_x$ ; (b) os campos de deformações $\varepsilon_y$ ; (c) os campos de tensões $\sigma_x$ ; (d) os campos de tensões $\sigma_y$ e (e) campos de tensões $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa e de $\varepsilon$ em m). ....	94
Figura 52 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas de amortecimento normais à direção do comprimento. ....	95
Figura 53 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas segundo o critério de Sun e Chung (1993) .....	96

Figura 54 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas oblíquas proposta por Sun e Chung (1993). (a) campos de deformações $\varepsilon_x$ ; (b) campos de deformações $\varepsilon_y$ ; (c) campos de tensões $\sigma_x$ ; (d) campos de tensões $\sigma_y$ e (e) campos de tensões $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa e de $\varepsilon$ em m). .....	97
Figura 55 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas oblíquas segundo o critério de Sun et al. (1993). .....	98
Figura 56 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas com o ângulo $\beta = \alpha$ . .....	99
Figura 57 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas oblíquas com o ângulo $\beta$ igual ao ângulo $\alpha$ . (a) campos de deformações $\varepsilon_x$ ; (b) campos de deformações $\varepsilon_y$ ; (c) campos de tensões $\sigma_x$ ; (d) campos de tensões $\sigma_y$ e (e) campos de tensões $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de $\sigma$ em Pa e de $\varepsilon$ em m). .....	100
Figura 58 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas de amortecimento oblíquas com o ângulo $\beta$ igual ao ângulo $\alpha$ . .....	101
Figura 59 - Malha do corpo de prova “off-axis” no plano LR. ....	102
Figura 60 - Campo de deformações $\varepsilon_x$ em metros, no corpo de prova no plano LR. ..	102
Figura 61 - Campo de deformações $\varepsilon_y$ em metros, no corpo de prova no plano LR. ..	102
Figura 62 - Campo de tensões $\sigma_x$ em Pascal, do corpo de prova no plano LR. ....	103
Figura 63 - Campo de tensões $\sigma_x$ em Pascal, do modelo do corpo de prova LR. ....	103
Figura 64 - Campo de tensões $\sigma_y$ em Pascal, do corpo de prova no plano LR. ....	104
Figura 65 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central horizontal do corpo de prova no plano LR. ....	104
Figura 66 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central vertical do corpo de prova no plano LR. ....	105
Figura 67 - Malha do modelo do corpo de prova “off-axis” no plano LT. ....	105
Figura 68 - Campo de deformações $\varepsilon_y$ em metros, do corpo de prova no plano LT. ..	106
Figura 69 - Campo de deformações $\varepsilon_x$ em metros, do corpo de prova no plano LT. ..	106
Figura 70 - Campo de tensões $\sigma_x$ em Pascal, do corpo de prova no plano LT. ....	107
Figura 71 - Campo de tensões $\sigma_y$ em Pascal, do corpo de prova no plano LT. ....	107
Figura 72 - Campo de tensões $\sigma_{xy}$ em Pascal, do corpo de prova no plano LT. ....	107
Figura 73 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central horizontal do corpo de prova LT. ....	108
Figura 74 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central vertical do corpo de prova LT. ....	108
Figura 75 - Malha do modelo do corpo de prova “off-axis” no plano RT. ....	109
Figura 76 - Campo de deformações $\varepsilon_x$ em metros, do corpo de prova no plano RT. ..	109

Figura 77 - Campo de deformações $\varepsilon_y$ em metros, do corpo de prova no plano <i>RT</i> . ..	110
Figura 78 - Campo de tensões $\sigma_x$ em Pascal, do corpo de prova no plano <i>RT</i> . .....	110
Figura 79 - Campo de tensões $\sigma_y$ em Pascal, do corpo de prova no plano <i>RT</i> . .....	110
Figura 80 - Campo de tensões $\sigma_{xy}$ em Pascal, do corpo de prova no plano <i>RT</i> . .....	111
Figura 81 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central horizontal do corpo de prova <i>RT</i> . .....	111
Figura 82 - Distribuição das tensões $\sigma_x$ , $\sigma_y$ e $\sigma_{xy}$ ao longo da região central vertical do corpo de prova <i>RT</i> . .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média da madeira (apostila) <sup>2</sup> .....	35
Tabela 2 - Composição das camadas da parede celular segundo Wangaard (1979).....	36
Tabela 3 – Constantes de engenharia de <i>Eucalyptus citriodora</i> (Ballarin e Nogueira, 2003).....	77
Tabela 4 – Ângulos utilizados nos referentes planos do ensaio.....	82
Tabela 5 – Fatores de correção analíticos, <i>C</i> , <i>S</i> e <i>CS</i> , determinados através do método dos elementos finitos. ....	113



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- L* - Direção referente às fibras que estão dispostas longitudinalmente no tronco
- R* - Direção referente a direção radial aos anéis de crescimento
- T* - Direção referente a direção tangencial aos anéis de crescimento
- LR* - Plano de simetria da madeira definido pelas direções *L* e *R*.
- LT* - Plano de simetria da madeira definido pelas direções *L* e *T*
- RT* - Plano de simetria da madeira definido pelas direções *R* e *T*
- NBR - Norma Brasileira Registrada
- MEF - Método dos elementos finitos
- ASTM - American Society for Testing and Materials

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_i$	Módulo de elasticidade na direção $i$
$\sigma_{ij}$	Tensão na direção $ij$
$\varepsilon_{ij}$	Deformação na direção $ij$
$C_{ijkl}$	Componentes do tensor rigidez
$S_{ijkl}$	Componentes do tensor flexibilidade
$\nu_{ij}$	Coefficiente de Poisson $ij$
$[C]$	Matriz de rigidez
$[S]$	Matriz de flexibilidade
$Q_{ij}$	Elementos da matriz de tensão plana $ij$ .
$[T]$	Matriz de transformação
$F_{vv,0}$	Resistência ao cisalhamento paralela às fibras.
$F_{v0,max}$	Força máxima cisalhante
$E_i^a$	Módulo de elasticidade aparente
$J$	Coefficiente de cisalhamento
$h$	Dimensão da seção transversal do corpo de prova
$b$	Dimensão da seção transversal do corpo de prova
$L$	Distância entre apoios
$P$	Força global aplicada
$A$	Área da seção transversal
$\sigma_6$	Tensão de cisalhamento
$G_{ij}^a$	Módulo de cisalhamento aparente
$C$	Fator de correção
$S$	Fator de correção
$\varepsilon_6$	Deformação de cisalhamento
$\bar{S}$	Elementos da matriz de flexibilidade

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	20
1.1	Objetivos .....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Estrutura anatômica da madeira.....	23
2.1.1	Classificação das Espécies de Árvores .....	23
2.1.2	Macro-Estrutura de uma Árvore .....	24
2.1.3	Constituição do Lenho de Coníferas.....	30
2.1.4	Constituição do lenho de Folhosas .....	33
2.1.5	Composição química da madeira.....	34
2.1.6	Estrutura da parede celular de uma fibra .....	35
2.1.7	Variabilidade da madeira. ....	36
2.1.8	Defeitos na madeira. ....	38
2.2	Modelo elástico linear da árvore.....	42
2.2.1	Caracterização do tronco de madeira.....	42
2.2.2	Modelo Elástico Linear da Madeira .....	44
2.2.3	Transformações.....	51
2.2.4	Lei de Hooke em um referencial arbitrário.....	53
2.3	Ensaio para a caracterização do comportamento da madeira ao cisalhamento.....	55
2.3.1	Ensaio de cisalhamento paralelo (“Shear Block Test”).....	56
2.3.2	Ensaio do vão variável.....	60
2.3.3	Ensaio Iosipescu. ....	62
2.3.4	Ensaio de Arcan. ....	65
2.3.5	Ensaio “ <i>off-axis</i> ” .....	66
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	75
3.1	Simulação numérica do ensaio de resistência ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997) pelo método dos elementos finitos. ....	75
3.2	Simulação numérica do ensaio de tração “ <i>off-axis</i> ” para madeira de <i>Eucalyptus Citriodora</i> pelo método dos elementos finitos.....	78
3.2.1	Análise da geometria das placas de amortecimento. ....	
3.3	Análise pelo MEF da aplicabilidade do ensaio de tração “ <i>off-axis</i> ” para madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i> . ....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	84

4.1 Simulação numérica do ensaio de resistência ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997) pelo método dos elementos finitos. ....	84
4.2 Simulação numérica do ensaio de tração “ <i>off-axis</i> ” para madeira de <i>Eucalyptus Citriodora</i> pelo método dos elementos finitos. ....	93
4.2.1 Análise da geometria das placas de amortecimento. ....	93
4.2.2 Análise pelo MEF da aplicabilidade do ensaio de tração “ <i>off-axis</i> ” para madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i> . ....	101
4.3 Análise dos fatores de correção <i>C</i> e <i>S</i> . ....	112
5 CONCLUSÕES. ....	114

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais presentes na vida do homem, sua origem biológica e abundância nos primórdios da civilização, contribuiu para que fosse um dos primeiros materiais a ser manipulados pelo homem na confecção de diversos utensílios. Na vida moderna pode-se encontrá-la com as mais variadas aplicações, como na construção civil, móveis e objetos essenciais à vida moderna, devido às suas características naturais, tais como densidade, resistência e aparência.

Para o uso adequado da madeira é necessário conhecer seu comportamento físico e mecânico, para tanto, são realizados através de ensaios que tentam proporcionar as condições necessárias para obtenção das propriedades. Porém muitas destas condições não são obtidas através da investigação experimental devido à heterogeneidade, variabilidade e anisotropia do material madeira. Uma das dificuldades nos ensaios propostos para determinação do comportamento físico e mecânico da madeira, corresponde ao seu comportamento ao cisalhamento, pois os ensaios normatizados para a determinação de tal comportamento apresentam, desenvolvimento de rachaduras e sobreposição de tensões que podem mascarar os resultados.

A madeira é um material anisotrópico, no entanto, ela pode ter seu comportamento simplificado por um modelo ortotrópico. Neste modelo, definem-se três planos de simetria ortogonais entre si, levando em consideração a sua anatomia, ou seja, pela direção longitudinal às fibras, pela direção das células de raios, que é radial a direção das fibras e pela direção que tangencia os anéis de crescimento.

Ao tratar com os dados de ensaios normatizados para a determinação das propriedades ao cisalhamento da madeira, pressupõe-se devem obter um estado de tensão homogêneo e uniaxial ao longo de toda a extensão do corpo de prova do plano em estudo, no entanto, este estado não é obtido nestes ensaios. Garrido (2004), demonstra que os ensaios baseados nas normas ASTM D143 (1994) e EN 408 (1995) para determinação de tensões de ruptura por cisalhamento paralelo às fibras, apresentam limitações pois a ruptura não ocorre num estado de tensão homogêneo nem de cisalhamento puro.

Sendo assim Garrido (2004) propõe para a madeira, a utilização do ensaio de tração “*off-axis*” anteriormente proposto por Chamis e Sinclair (1977) para compósitos artificiais, afim de se obter o estado de tensão homogêneo e uniaxial.

Um dos principais problemas encontrados na implementação do ensaio de tração “*off-axis*” corresponde ao acoplamento do corpo de prova às garras da máquina de ensaio, pois o esmagamento ocasionado pelas garras da máquina nas extremidades do corpo de prova, modifica a distribuição das tensões no corpo de prova tracionado. Para resolver este problema Sun e Berreth (1988) propuseram a colagem de placas nas extremidades dos corpos de prova, sendo a geometria destas placas aperfeiçoada por Sun e Chung (1993) que demonstraram que o uso placas oblíquas permitem ao corpo de prova uma distribuição de tensão uniforme.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos com a aplicação do ensaio de tração “*off-axis*” para compósitos artificiais, porém para o material madeira são escassos os encontrados, principalmente quando se refere à madeira de folhosas. Instigado à essa investigação, o presente trabalho realiza um estudo da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” à madeira da folhosa *Eucalyptus citriodora*.

Para esta investigação é realizada uma simulação numérica com o método dos elementos finitos (MEF), implementado através do software comercial ANSYS ®. O método dos elementos finitos corresponde a um método de resolução de uma equação diferencial que descreve a situação em estudo, através da discretização da área do modelo e comparação do comportamento de cada pequena área discretizada. Esta ferramenta aprimorou significativamente de projetos de engenharia e a metodologia do processo de desenvolvimento em muitas aplicações industriais, pois permite o teste computacional de protótipos antes mesmo de serem construídos, otimizando o projeto em tempo e custo.

Esta dissertação inicia-se com o estudo anatômico da madeira como fundamentação para a compreensão do comportamento elástico linear que é realizado com a função de revisar conceitos básicos da teoria elástica linear para implementar a simplificação do comportamento da madeira como um material ortotrópico. Uma revisão bibliográfica é realizada no sentido de conhecer o estado da arte dos ensaios utilizados para o estudo do comportamento da madeira ao cisalhamento, sendo dada

maior ênfase ao ensaio de tração “*off-axis*” que corresponde ao objeto deste estudo. Afim de demonstrar a sobreposição das tensões no ensaio proposto pela NBR 7190 (1997) é realizada a simulação numérica pelo método dos elementos finitos com o uso da madeira de *Eucalyptus citriodora*. O efeito gerado pelo esmagamento das extremidades do corpo de prova às garras da máquina de ensaio é investigado pelo MEF na seção 3 e para finalizar é investigada a aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” para a madeira de folhosas, sendo utilizada a madeira de *Eucalyptus citriodora*, que se trata de uma espécie abundante nas áreas de reflorestamentos do Brasil. As constantes de engenharia desta espécie de madeira foram extraídas de Ballarin e Nogueira (2003).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos:

- A análise dos campos de tensão através de simulação numérica pelo método de elementos do corpo de prova para a determinação da resistência ao cisalhamento na madeira de *Eucalyptus citriodora*, proposto pela NBR 7190 (1997).
- A análise através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos da geometria adequada das placas de amortecimento aplicada no corpo de prova do ensaio de tração “*off-axis*” na madeira de *Eucalyptus citriodora*.
- Análise pelo método de elementos finitos da implementação do ensaio de tração “*off-axis*” para a madeira de *Eucalyptus citriodora*, nos planos de simetria *LR* (longitudinal, radial), *LT* (longitudinal, tangencial) e *RT* (radial, tangencial).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estrutura anatômica da madeira

O estudo das características da constituição da madeira é de grande importância para a compreensão dos fenômenos fisiológicos, estruturais e mecânicos, permitindo a otimização do seu uso nos diversos segmentos de pesquisa e mercado. Foi realizado um estudo com enfoque nas propriedades da madeira que possam influenciar nas características mecânicas do material.

#### 2.1.1 Classificação das Espécies de Árvores

Dentre as diversas classificações que biólogos e botânicos agrupam as diferentes espécies de árvores, neste trabalho será usada a classificação generalizada das espécies em dois grandes grupos, sendo o das gimnospermas e o das angiospermas, por se tratar de uma simplificação que não compromete nem oculta conhecimentos relevantes.

Segundo Esau (2002), as gimnospermas são espécies primitivas, cuja existência se tem conhecimento desde o período jurássico, há cerca de 130 milhões de anos. Podem ser encontrada na literatura outras denominações à este grupo, usando como referência as características de sua constituição, sendo: resinosas, por possuírem resina em seu lenho; “softwood”, pelo seu lenho relativamente macio e também como conífera, pois possuem a característica de crescimento monopodial e em sua maioria com copas em formatos de cones.

As coníferas são originárias de biomas encontrados em regiões de clima frio, mas devido a sua grande aplicabilidade industrial, é comum encontrarmos reflorestamentos exóticos de coníferas nas mais variadas regiões do planeta (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

As angiospermas são espécies que se desenvolveram no período cretáceo, há cerca de 150 milhões de anos e ainda são divididas em outras duas grandes classes, sendo as monocotiledôneas e as dicotiledôneas (ESAU, 2002).



As monocotiledôneas são espécies de angiospermas com característica de possuir em sua semente apenas um cotilédone, como o coco, por exemplo. Seu lenho possui pouca exploração comercial, por ter propriedades indesejáveis para aplicação estrutural e para usinagem.

As dicotiledôneas são espécies de angiospermas que em sua semente são encontrados dois cotilédones, o crescimento de sua copa é simpodial, com estrutura latifoliada, e ainda algumas apresentam o desenvolvimento de frutos e flores. Por serem latifoliadas (ESAU, 2002), as angiospermas também são conhecidas por folhosas, termo este que passará a ser utilizado a partir deste ponto.

Seu lenho é relativamente duro e pesado, sendo assim também chamadas de “hardwood”, mas isto não se faz regra, pois folhosas também são encontradas com madeira leve e macia.

A maior parte de suas espécies são encontradas em biomas de climas quente e tropical, sendo facilmente encontradas em reflorestamentos, pois o seu uso é de grande demanda para as empresas de celulose e papel, assim como para biomassa, construção civil e indústria moveleira (CALIL JUNIOR, LAHR; DIAS, 2003).

Neste trabalho, o material em estudo é a madeira da espécie de folhosa *Eucalyptus citriodora*, cultivada com abundância em reflorestamentos no Brasil, possuindo aplicabilidade no mercado de biomassa, celulose e papel e poucas aplicações estruturais (mas com potencial), devido ao pouco conhecimento que se tem de suas propriedades físicas e mecânicas.

### 2.1.2 Macro-Estrutura de uma Árvore

As árvores são compostas por três macro-estruturas, que podem ser identificadas visualmente sem o auxílio de instrumentos ópticos específicos, sendo estas: as raízes, a copa e o caule conforme mostrado na Figura 1.

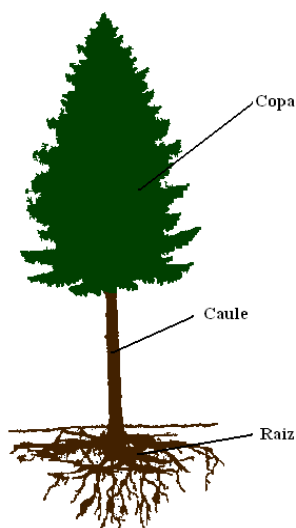


Figura 1 - Macro-estruturas de uma árvore, composta por copa, caule e raiz, adaptado de Esau, (2002).

#### 2.1.2.1 Raiz

Na constituição da árvore, as raízes têm a função de sustentação mecânica no solo, e a extração dos nutrientes nele presente, como sais minerais e água (ESAU, 2002).

Por se tratar de uma parte da árvore que em sua maior porção é encontrada sob o solo, com crescimento caótico sem um padrão definido, sua extração torna-se difícil e economicamente inviável, pois possui baixo valor de mercado. Alguns segmentos industriais, como o farmacêutico utiliza as substâncias encontradas nas raízes para a fabricação de medicamento e o segmento de biomassa que atualmente está em expansão tecnológica para facilitar a extração das raízes.

#### 2.1.2.2 Copa

A copa da árvore tem por função a fotossíntese e transpiração, ambos fenômenos fisiológicos de suma importância para a sua vitalidade (ESAU, 2002). Em algumas espécies as folhas podem ser aproveitadas como matéria prima para a fabricação de óleos, essências e produtos farmacêuticos. Assim como as raízes possuem baixo valor de mercado.

### 2.1.2.3 Caule

O caule é a macro-estrutura da árvore responsável pela sustentação da copa, transporte e armazenamento de nutrientes e fotossintatos. Conhecido também como fuste, é a porção da árvore que se encontra o lenho usinável de grande interesse pela indústria na aplicação da manufatura de celulose e papel, mobiliários, biomassa e construção civil. Por se tratar da parte que possui a maior porção da madeira utilizável, conseqüentemente é a parte da árvore que possui maior valor de mercado.

O caule por sua vez possui uma estrutura com regiões e funções específicas que pode ser observado a olho nu, na seguinte seqüência, quando observado de fora para dentro segundo Pfeil e Pfeil (2003): cascas (composta ainda pelo ritidoma e floema), câmbio, xilema (composto pelo alburno e cerne) e medula, conforme ilustrado na Figura 2.

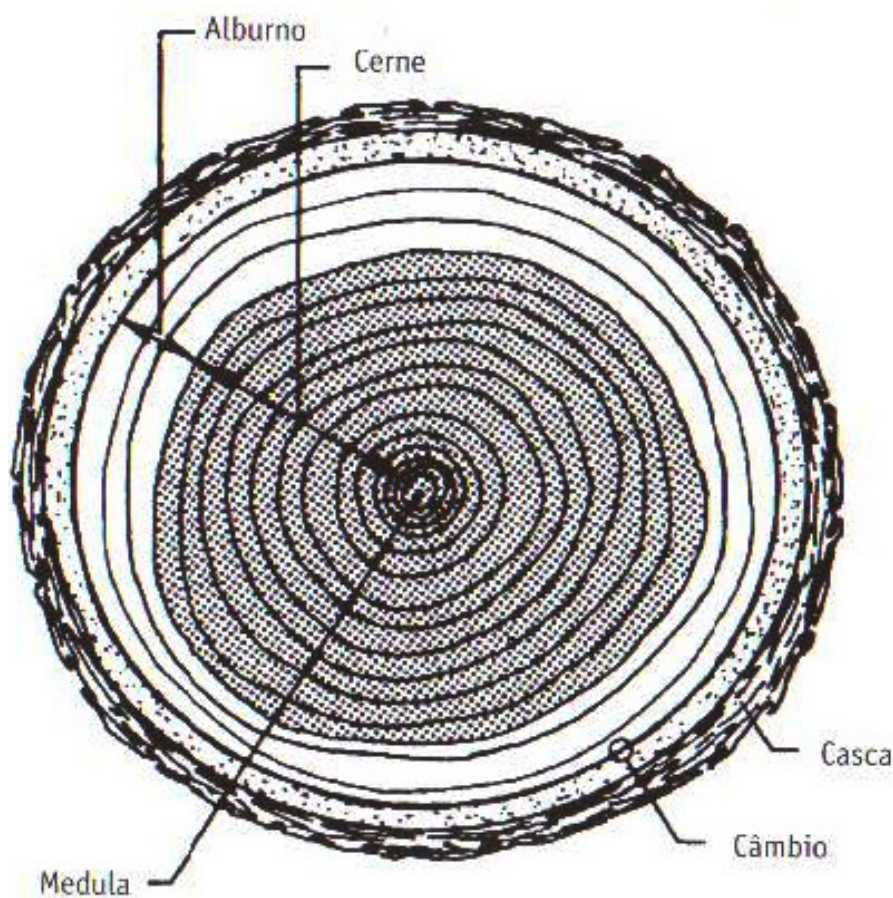


Figura 2 - Disposição da estrutura interna do caule (PFEIL; PFEIL, 2003).

#### 2.1.2.4 Casca

A casca tem a função de proteção para o fuste, contra ataques biológicos, mecânicos, incêndios e intempéries. É constituída de duas partes, sendo estas, o ritidoma e floema (GONÇALVES, 2000).

O ritidoma é o lado externo da casca, com uma coloração geralmente amarronzada. É composto por células fisiologicamente inativas, exercendo a função de proteção para o caule (GONÇALVES, 2000).

O floema, também denominado líber, é a parte interna da casca da árvore, sendo esta composta por células fisiologicamente ativas, exercendo a função de condução da seiva elaborada das folhas para a região inferior da árvore (GONÇALVES, 2000).

A casca corresponde a uma porção ínfima do tronco, quando comparado ao xilema, não exerce nenhuma relação com as propriedades mecânicas do lenho usinado, sendo esta geralmente retirada do fuste, mas é representativo para as propriedades mecânicas durante o desenvolvimento da árvore, pois é determinante em seu crescimento.

#### 2.1.2.5 Câmbio

O câmbio é responsável pelo crescimento longitudinal do fuste, pois se trata de uma camada de células meristemáticas que se dividem formando novas células de xilema e de floema (GONÇALVES, 2000). Esta estrutura assim como a casca, não influencia nas propriedades mecânicas na madeira limpa, apenas durante o seu desenvolvimento.

#### 2.1.2.6 Xilema

O xilema é a madeira propriamente dita, pois se trata da maior parte do lenho de uma árvore. É dividido em duas partes: albúrnio e cerne, ilustrado na Figura 3. O cerne é a região interna e escura enquanto o albúrnio é a região clara e externa (GONÇALVES, 2000).



Figura 3 - Regiões de cerne e alburno no xilema (apostila)<sup>1</sup>.

Para Gonçalves (2000) alburno é a porção do xilema onde se encontram as células fisiologicamente vivas, com a função de condução, armazenamento de nutrientes e condução da seiva bruta das raízes para as folhas da árvore. Por estocar nutrientes interessantes a outras formas de vida como fungos e bactérias, o alburno fica sujeito ao ataque biológico, constituindo a biodeterioração do material madeira.

O cerne é formado por células fisiologicamente mortas, que perderam a sua função fisiológica durante o crescimento da árvore. Não apresentam outra função a não ser, a sustentação da estrutura da árvore (GONÇALVES, 2000).

Comparando o lenho do cerne em relação ao lenho do alburno, percebemos que o cerne possui maior teor de extrativos (componentes estranhos que não fazem parte da parede celular), na maioria das madeiras possui uma maior densidade, fibras mais curtas e menos espessas, maior teor de lignina (composto orgânico responsável pela união das células do lenho), menor teor de celulose (polímero de cadeia linear, correspondente de 40% à 45% da composição do xilema), e maior resistência a biodeterioração do lenho em relação ao alburno (apostila)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Apostila elaborada pelo Professor Doutor Ricardo Marques Barreiros, para a disciplina de pós-graduação Estrutura Morfológica da Madeira, ministrada no Campus da Unesp de Itapeva.

Durante o desenvolvimento do lenho, a árvore possui comportamento fisiológico diferente conforme as condições climáticas das estações do ano, proporcionando o surgimento de anéis concêntricos com propriedades físicas e químicas diferentes de um anel para o outro, sendo assim denominados anéis de crescimento ou anéis de estações (GONÇALVES, 2000).

No período primaveril do ano, quando as condições climáticas oferecem maior incidência de luz, chuvas e maiores temperaturas, ou seja, quando existe uma maior disponibilidade de fatores e nutrientes para o desenvolvimento da árvore, o lenho se desenvolve a uma maior taxa, em relação ao período outonal, quando a disponibilidade de água e luz solar é menor e então a árvore entra em dormência, derrubando total ou parcialmente de suas folhas (dependendo da espécie), para realizar menor transpiração para poupar água, conseqüentemente o desenvolvimento do lenho é afetado, crescendo à uma menor taxa em relação ao lenho desenvolvido no período primaveril (ESAU, 2002).

O lenho que se desenvolve no período da primavera, é denominado lenho inicial ou lenho primaveril, já ao lenho que se desenvolve no período do outono, denominamos de lenho tardio ou lenho outonal.

Quando comparamos o lenho dos anéis de crescimento primaveril (iniciais) com os anéis de crescimento outonais (tardios), verificamos sua coloração é mais clara como ilustra a Figura 4 e Figura 5; possui maior espessura, menor densidade, fibras mais largas e menos longas, menor espessura nas paredes das fibras, menor teor de lignina, menor teor de celulose e maior teor de extrativos.



Figura 4 - Anéis de crescimento em madeira de conífera (apostila)<sup>1</sup>.



Figura 5 - Anéis de crescimento em madeira de folhosa (apostila)<sup>1</sup>.

#### 2.1.2.7 Medula

A medula está localizada na região central do caule, no sentido vertical do fuste, se estende desde a base de uma árvore, até o seu topo. Tem por função a armazenagem de substâncias nutritivas (GONÇALVES, 2000). É formada por células meristemáticas primárias, por um tecido tenro e de pouca importância para a utilização comercial. A medula por apresentar o armazenamento de nutrientes, é uma região muito suscetível ao ataque de microorganismos e insetos, assim biodeteriorando o centro do Caule.

#### 2.1.3 Constituição do Lenho de Coníferas

As coníferas (gimnospermas) possuem a constituição do lenho considerada homogênea, são conhecidas por possuírem fibras longas e ser constituídas basicamente por células de parênquima, canais de resina e principalmente por traqueídes, representando cerca de 93% do lenho (BODIG; JAYNE, 1982).

Os traqueídes são fibras responsáveis pela sustentação e condução da água e nutrientes inorgânicos, com uma disposição longitudinal no lenho, lado a lado um de outro. São compostos por células mortas e lenhificadas, como cerca de quarenta e cinco vezes maiores no comprimento em relação a sua largura, com uma geometria fusiforme (ESAU, 2002), como ilustrado na Figura 6.

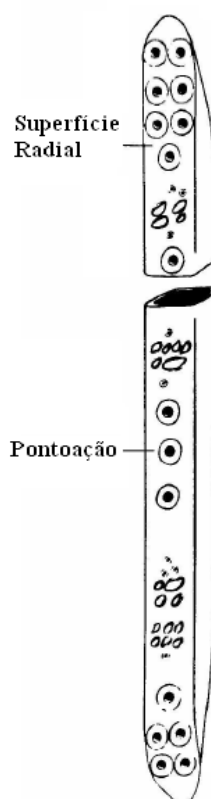


Figura 6 - Esquema de representação de um traqueíde (ESAU, 2002).

Na Figura 6 é possível observar a existência de pontoações areoladas, por toda a extensão da fibra de traqueíde, estas pontoações têm a função de comunicação entre um traqueíde e outro para a condução de água e outros nutrientes (ESAU, 2002).

Os traqueídes possuem características diferenciadas, conforme a época do ano em que ele se desenvolve, sendo menor e mais denso no inverno e maior e menos denso no verão, dando as mesmas características para os anéis de crescimento presentes no lenho.

As células de parênquima são encontradas com disposição radial e com menor frequência no lenho de coníferas, constituindo cerca de 6% do lenho. Difere-se dos traqueídes, pela sua menor diferença entre o comprimento e a largura, são formadoras



das estruturas dos raios lenhosos como mostrado na Figura 7, exercendo a função de condução, entre a parte mais interna com a parte mais externa da árvore (ESAU, 2002).

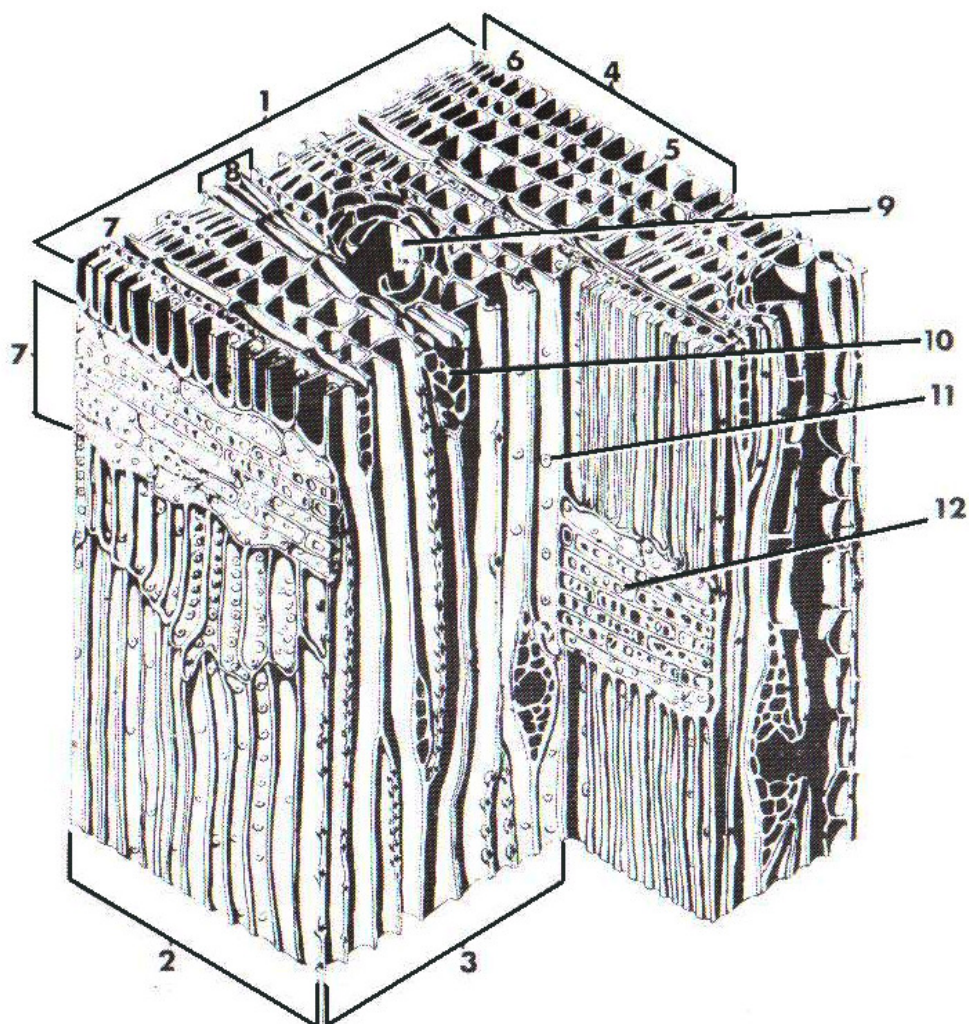


Figura 7 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera segundo Bodig e Jayne (1982). (1) seção transversal, (2) seção radial, (3) seção tangencial, (4) anéis de crescimento, (5) lenho inicial, (6) lenho tardio, (7) raios, (8) raios fusiformes, (9) canal de resina vertical, (10) canal de resina horizontal, (11) pontoação, (12) pontoação.

Em madeira de coníferas, pode-se também encontrar canais de resina, constituindo até 1% do total do lenho. Formados por células epiteliais, são responsáveis pela secreção de resinas, conectadas como tubos, podem formar uma rede, interligada radialmente e longitudinalmente (ESAU, 2002).

### 2.1.4 Constituição do lenho de Folhosas

Quando comparado os lenhos de uma conífera, com o lenho de uma folhosa, é fato que a estrutura da folhosa é mais complexa que a estrutura da conífera, pois possuem uma constituição caótica de parênquimas, traqueídes, elementos de vasos e fibras (ESAU, 2002), como pode ser observado na Figura 8.

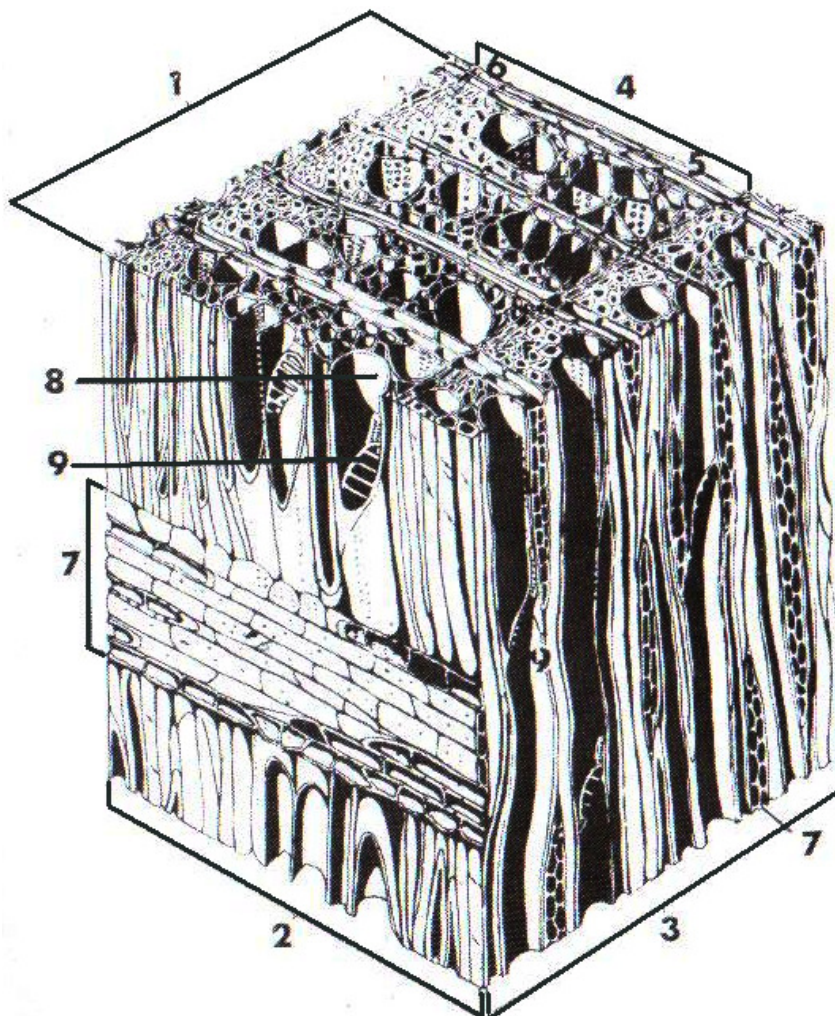


Figura 8 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas segundo Bodig e Jayne (1982). (1) seção transversal, (2) seção radial, (3) seção tangencial, (4) anéis de crescimento, (5) lenho inicial, (6) lenho tardio, (7) raios, (8) vasos, (9) pontoações.

Na madeira de folhosa são encontrados longitudinalmente vasos, células de parênquima, fibras, e canais de resina. Radialmente estão dispostas as células de parênquima e canais de resina.

Os elementos de vasos, também chamados de poros, são dispostos longitudinalmente um sobre o outro, de forma que através de uma placa perfurada,

comunicam-se entre si, permitindo a condução da seiva bruta pelo seu interior. Quando alinhados com outro vaso ou fibra, pode-se estabelecer uma comunicação lateral através de pontoações areoladas e quando alinhado com células de parênquima pode se estabelecer a comunicação através das pontoações semi-areoladas (ESAU, 2002).

Os elementos de vaso são encontrados, solitários ou em cadeias, com dimensões variáveis de espécie para espécie. Podem ser obstruídas pela deposição de materiais orgânicos, formação de tilos, gomas e resinas, impedindo a passagem de água, diminuindo a fisiologia da região, formando assim o cerne (ESAU, 2002).

As fibras são células com grande comprimento em relação a sua largura, com dimensões variáveis de espécie para espécie, podendo ter o comprimento de 0,5 mm a 1,5 mm, constituem a maior parte do lenho das folhosas com a função de sustentação (BODIG; JAYNE, 1982).

Assim como nas coníferas as células de parênquima podem ser encontradas longitudinalmente e radialmente exercendo função de armazenamento de nutrientes e condução entre o centro e a periferia do xilema (ESAU, 2002).

### 2.1.5 Composição química da madeira

A madeira é composta em sua maior porção por material orgânico e biológico. Os principais componentes químicos são polímeros de alto peso molecular que podem ser apreciados na Tabela 1, sendo eles, a celulose, hemicelulose e a lignina, podendo ainda ser encontrados outros componentes químicos que sejam pouco representativos para a constituição da madeira (apostila)<sup>2</sup>.

A celulose é um polímero de cadeia linear longa, composta por unidades de glucose, organizada e parcialmente cristalina. É organizada em fibras finas denominadas microfibrilas (apostila)<sup>2</sup>.

A hemicelulose é formada por estruturas ramificadas e amorfas, podendo ainda ser destacada em dois tipos principais, sendo as glucomanas e as xilanas. Possuem a função estrutural e são organizadas como a celulose.

---

<sup>2</sup>Apostila elaborada pelo Professor Doutor José Cláudio Caraschi, para a disciplina de pós-graduação de Química dos Compósitos Lignocelulósicos ministrada no Campus da Unesp de Itapeva.

A lignina é um polímero aromático, heterogêneo, ramificado e amorfo. Possui a função de aumentar a rigidez da parede celular, ligando umas células às outras (apostila)<sup>2</sup>. Por aumentar a resistência da planta à compressão, o seu crescimento vertical se torna possível.

Tabela 1 - Composição química média da madeira (apostila)<sup>2</sup>.

Componente	Coníferas	Folhosas
Celulose	40% a 45%	40% a 45%
Glucomanas	20%	5%
Xilanas	10%	25% a 30%
Ligninas	25% a 30%	20% a 25%

### 2.1.6 Estrutura da parede celular de uma fibra

Segundo Wangaard (1979), a parede de uma célula é composta por três camadas sobrepostas e com diferentes orientações nas disposições das microfibrilas. São elas a lamela média (M), a parede primária (P) e parede secundária subdividindo-se em outras três camadas: S<sub>1</sub> Camada Exterior, S<sub>2</sub> camada Média e S<sub>3</sub> Camada Inferior, conforme apresentado na Figura 9.

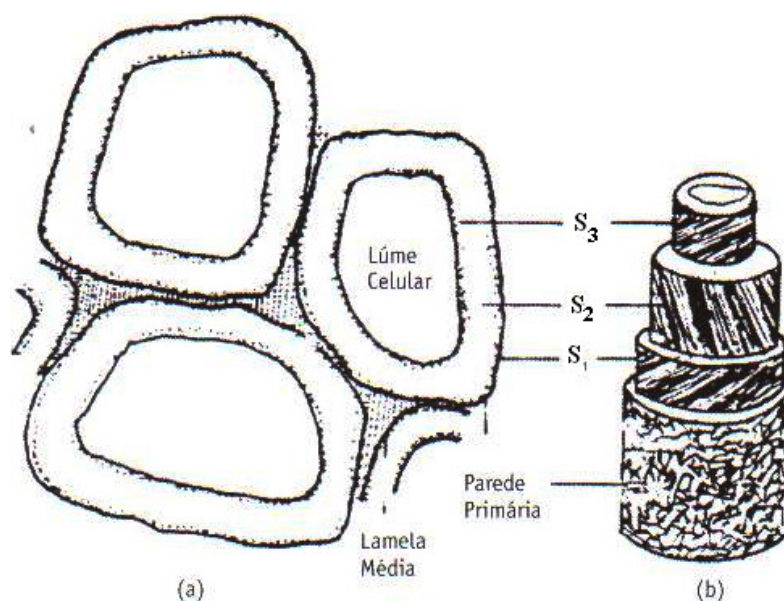


Figura 9 - Composição das paredes da fibra - (a) corte transversal (b) vista lateral (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Na Tabela 2, pode ser observada a composição química, o ângulo formado pela fibrila e a espessura em cada uma das camadas da parede celular.

Tabela 2 - Composição das camadas da parede celular segundo Wangaard (1979).

CAMADA	ESPESSURA $\mu\text{m}$	ÂNGULO FIBRILAR	COMPOSIÇÃO
M	0,2-1,0	-	Lignina, pectina.
P	0,1-0,2	-	Celulose, hemicelulose, pectina, proteínas.
S <sub>1</sub>	0,2-0,3	50°-70°	Celulose, lignina, hemicelulose.
S <sub>2</sub>	1-5	10°-30°	Celulose, lignina, hemicelulose.
S <sub>3</sub>	0,1	50°-90°	Celulose, lignina, hemicelulose.

Para Wangaard (1979), a camada S<sub>2</sub> é mais representativa, constituindo a maior parte do volume da parede celular, com as microfibrilas em um formato levemente helicoidal, quase na direção do eixo.

As microfibrilas têm a característica de serem unidas por ligações primárias em seu comprimento, e por ligações secundárias lateralmente umas as outras. Tendo em vista que a energia das ligações primárias, são muitos maiores em relação às secundárias, pode-se então concluir que a resistência e a rigidez das fibras na direção paralela às fibras são maiores que em relação à direção normal (WANGAARD, 1979).

### 2.1.7 Variabilidade da madeira.

A madeira é um material de origem biológica, sendo ela utilizada pela árvore como estrutura, e para sua fisiologia, realizando as suas mais variadas atividades, como transporte e armazenamento de água e nutrientes, sustentação de galhos e folhas, entre outras diversas. Assim como cada parte da madeira tem uma função, claramente é evidenciado que cada parte da madeira tem uma forma e um comportamento

diferente, assim evidenciando um fato de grande importância no estudo das propriedades mecânicas da madeira que é a variabilidade das estruturas e comportamentos existente na madeira.

Wangaard (1979) afirma que da mesma forma que não existem duas pessoas iguais, também não existirão duas árvores idênticas, nem mesmo duas peças idênticas, evidenciando que a madeira é diferente de uma árvore para outra, sendo estas da mesma ou de espécies diferentes e também variação interna, ou seja, uma peça retirada de um mesmo tronco, mas de regiões diferentes, possuirá características diferentes, pois existe variabilidade radialmente e longitudinalmente ao longo do tronco de uma árvore.

Para o estudo das propriedades da madeira, são tomados alguns referenciais com relação ao seu tronco e a disposição das fibras, como é mostrado na Figura 10.

Longitudinalmente ao tronco e as fibras, definimos a direção Longitudinal ( $L$ ); quando tomado como referência as células de raio é definida a direção Radial ( $R$ ) e tangenciando os anéis de crescimento, a direção Tangencial ( $T$ ), formando o sistema de referência  $L R T$ .

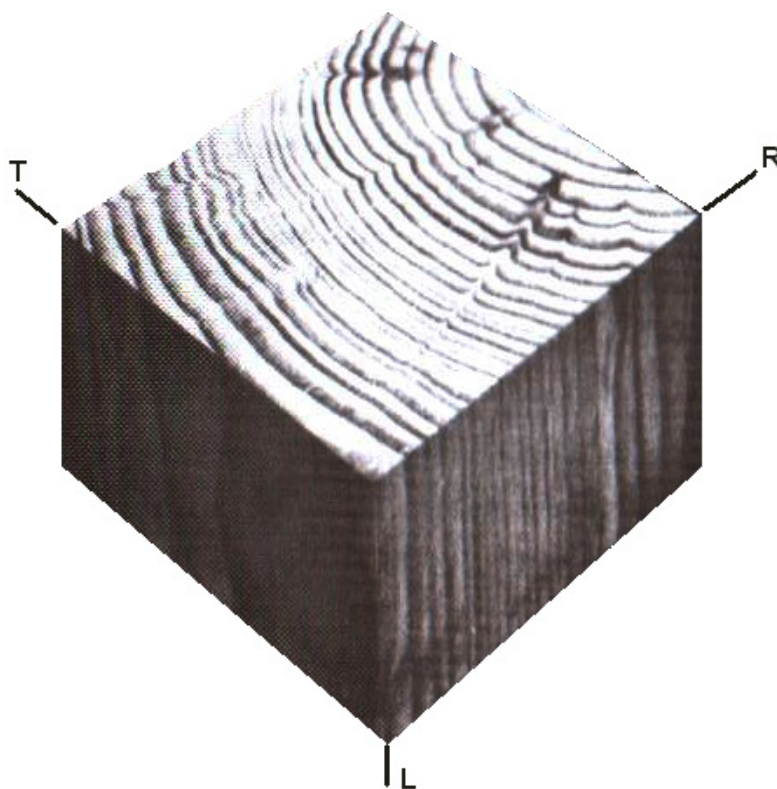


Figura 10 - Referenciais  $LRT$  para o estudo das propriedades mecânica e físicas da madeira segundo Pfeil e Pfeil (2003).

É possível identificar a variabilidade nas propriedades da madeira, quando é tomada como referência a direção radial no sentido da medula para a casca e na direção longitudinal da raiz à copa, pois sabe-se das diferenças de densidade no lenho do cerne em relação ao lenho do alburno, também diferenças de densidade, dimensões das fibras e densidade de vasos, quando analisamos os anéis de crescimento.

Estas diferenças de características são existentes, devido às condições de crescimento e desenvolvimento da árvore, pois fatores como relevo e clima são importantes para a formação do lenho.

#### 2.1.8 Defeitos na madeira.

Como sabemos, o crescimento da madeira depende de alguns fatores biológicos. Durante o desenvolvimento da madeira, existem características que ela assume, sendo muitas delas indesejáveis, pois podem comprometer ou dificultar a sua aplicação em determinados segmentos. Estas indesejáveis características sejam elas adquiridas no seu desenvolvimento, ou depois do corte, denominamos defeitos da madeira.

No seu desenvolvimento, os principais defeitos encontrados são grã irregular, madeira de reação, nós, variabilidade na composição química, coloração variada, ou seja, diversas características irregulares que a madeira assume durante o seu desenvolvimento, comprometendo a sua aplicação.

A madeira de reação é desenvolvida, quando a árvore se encontra em posições de inclinação, seja este motivada por ventos, relevo ou qualquer outro motivo (ESAU, 2002). O lenho produzido nessas regiões é irregular, com fibras dispostas com várias inclinações diferentes, causando diferenças nas propriedades mecânicas do material assim, dificultando sua aplicação.

No lenho é comum o aparecimento de nós, ou seja, uma região de junção do galho com o tronco. Esta região é lignificada e suas fibras não seguem um padrão direcional (como representado na Figura 12-a), tornando-se assim uma região frágil, influenciando nas propriedades mecânicas da madeira ocasionando a redução na resistência à tração (PFEIL; PFEIL, 2003)

Após a colheita, o processo de secagem torna-se uma etapa bastante importante, pois quando este é realizado sem o uso de técnicas adequadas, este processo pode comprometer a madeira, causando distorções no lenho, como podemos observar na Figura 11.

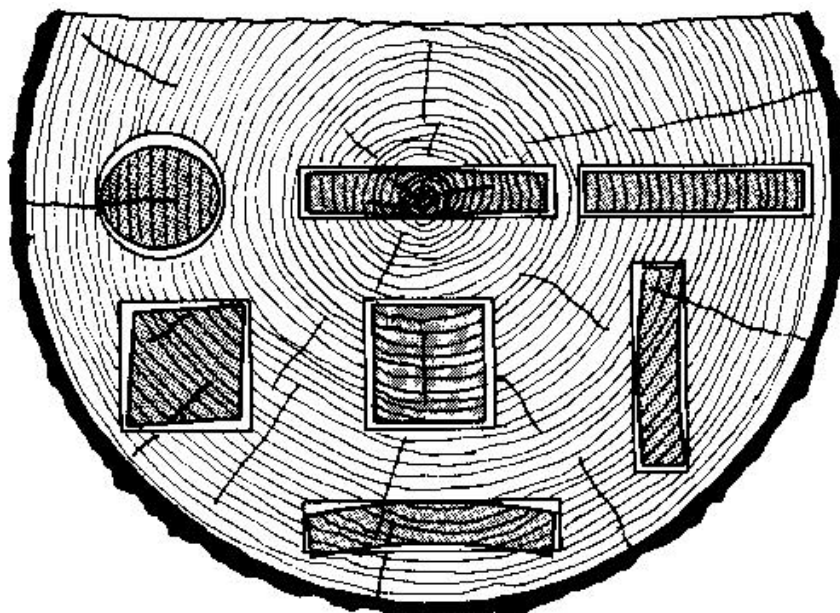


Figura 11 - Distorções nas diversas regiões do tronco devida à secagem da tora (BODIG; JAYNE, 1982).

Para Pfeil e Pfeil (2003) algumas das distorções por processo de secagem mais comuns são o abaulamento, que consiste no encurvamento na direção da largura da peça (Figura 12-d) e a arqueadura, que consiste no encurvamento na direção longitudinal, ou seja, no comprimento da peça.

Tensões internas devido ao crescimento lateral da árvore podem causar o aparecimento de gretas ou também chamadas ventas, como pode ser observado na Figura 12-b, defeito este que consiste na separação entre os anéis de crescimento do lenho (PFEIL; PFEIL, 2003).

Fibras não paralelas ao eixo da peça são denominadas fibras reversas, que segundo Pfeil e Pfeil (2003) podem ser provocadas por causas naturais devido à proximidade de nós ou o crescimento de fibras em formato espiral e também pelo serramento da peça em plano inadequado. Um exemplo de fibras reversas pode ser observado na Figura 12-f, este defeito da madeira pode reduzir consideravelmente a resistência da madeira.



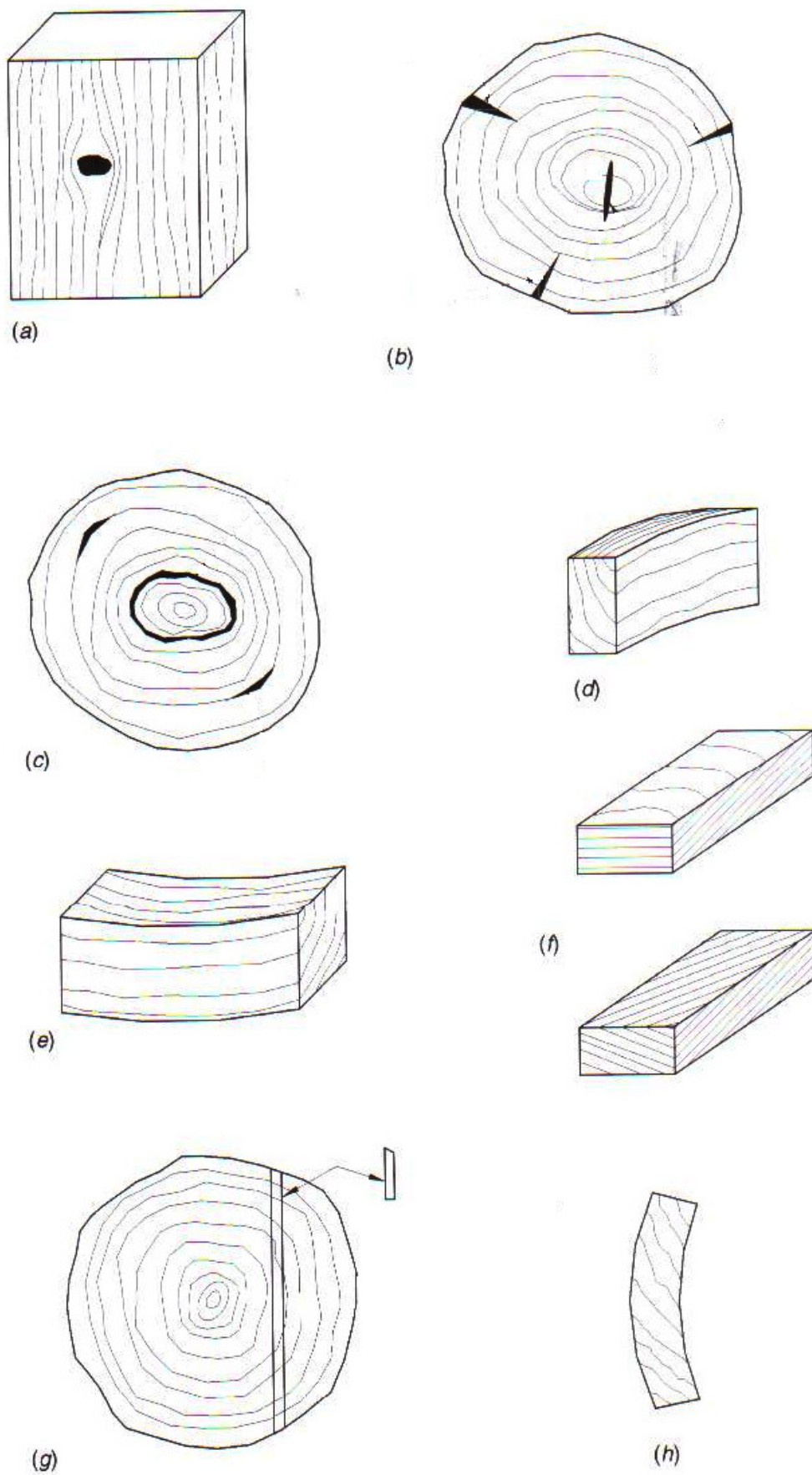


Figura 12 - Defeitos nas madeiras: (a) nó; (b) fendas; (c) gretas; (d) arqueadura; (e) arqueamento; (f) fibras reversas; (g) esmoado; (h) empenamento. (PFEIL; PFEIL, 2003).

Pfei e Pfeil (2003) observam outros defeitos que podem ser encontrados na madeira, como esmoada que consiste em um defeito formado pela curvatura natural do tronco e quina morta que consiste em uma elevada proporção de alburno no troco, como pode ser observado na Figura 12-g.

Após a colheita, outros defeitos podem aparecer, devido ao manuseio e impactos causados na madeira, como trincas e cortes e o aparecimento de fungos, manchando ou apodrecendo o lenho.

Novas técnicas devem ser desenvolvidas e aprimoradas a fim de tornar maior o aproveitamento da madeira, diminuindo os defeitos e até mesmo utilizando as peças defeituosas com o desenvolvimento de novas tecnologias.

## 2.2 Elasticidade da madeira.

### 2.2.1 Caracterização do tronco de madeira.

Os materiais são classificados conforme o seu comportamento mecânico como sendo isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos (CALLISTER, 2002).

Como visto anteriormente, a madeira é um material de origem biológica, apresenta uma grande variabilidade e heterogeneidade, pois a constituição de sua estrutura varia entre as diversas espécies e até no mesmo tronco, nas suas diferentes regiões. Esta variabilidade de estrutura provoca também uma variabilidade no comportamento mecânico nas diferentes regiões do material. Sendo assim, como não possui o mesmo comportamento em toda a sua extensão, a madeira é classificada como um material anisotrópico (TODESCHINI, 2009).

Diversos trabalhos, como Nicolas (2006) e Todeschini (2009), têm se engajado na procura de um modelo adequado que possa ser empregado para o comportamento mecânico da madeira, mas devido à heterogeneidade do material, este modelo ainda não foi encontrado.

Para o estudo da madeira é comum e aceitável a simplificação de seu comportamento como sendo um material ortotrópico, ou seja, caracterizá-la com três direções ortogonais (*LRT*) nas quais as propriedades variam analogamente em cada uma das direções.

Para Bodig e Jayne (1982) a caracterização das direções relativas da madeira é realizada de acordo com a anatomia macroscópica do tronco como pode ser observado na Figura 13, sendo:

*L* (*X*) – longitudinal – direção referente às fibras que estão dispostas longitudinalmente no tronco.

*R* (*Y*) – radial – direção referente a um corte radial aos anéis de crescimento.

*T* (*Z*) – tangencial – direção referente ao corte tangencial aos anéis de crescimento.

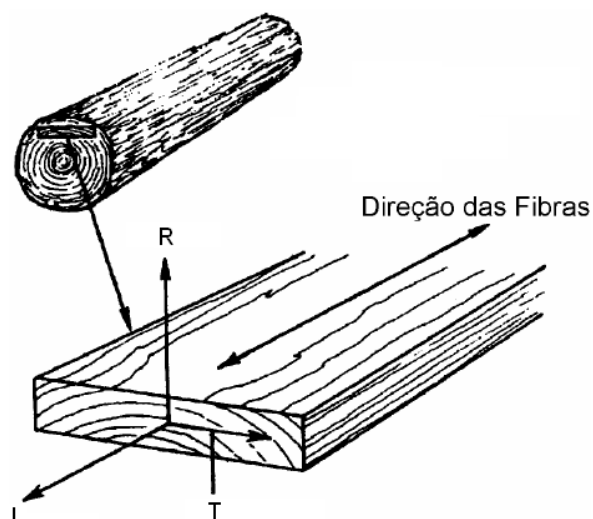


Figura 13 - Direções relativas de referência do material madeira (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Para Bodig e Jayne (1982), outras simplificações devem ser consideradas a fim de se aplicar o modelo ortotrópico para a madeira, como, admitir que o tronco possui uma geometria cilíndrica, homogênea, ausente de nós e demais defeitos e anéis de crescimento lineares, como podemos observar na Figura 14.

A região do tronco na qual se extrai a madeira também é influente nas propriedades mecânicas da madeira como observado na Figura 15, mas considera-se homogêneo todo o tronco para um modelo válido para toda a extensão do material (na adoção do modelo ortotrópico).

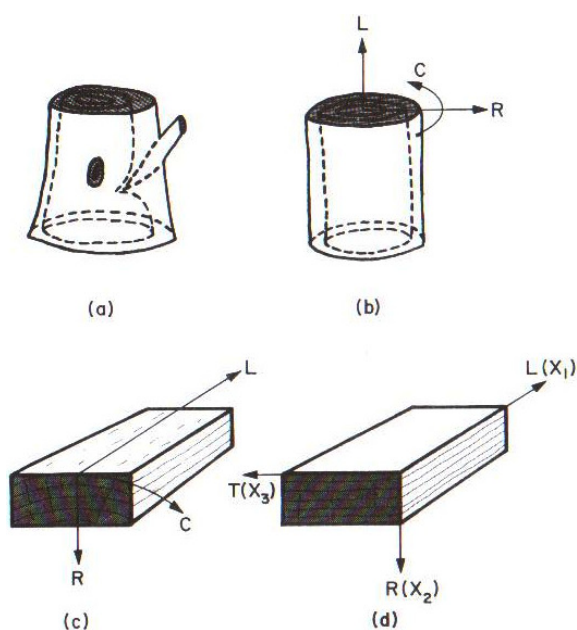


Figura 14 - Simplificação do modelo da árvore à um modelo de madeira limpa com propriedades ortotrópicas: (a) árvore com suas características naturais; (b) modelo cilíndrico do tronco da árvore; (c) madeira serrada com sistema de coordenadas cilíndricas; (d) modelo ortotrópico de madeira serrada. (BODIG; JAYNE, 1982).

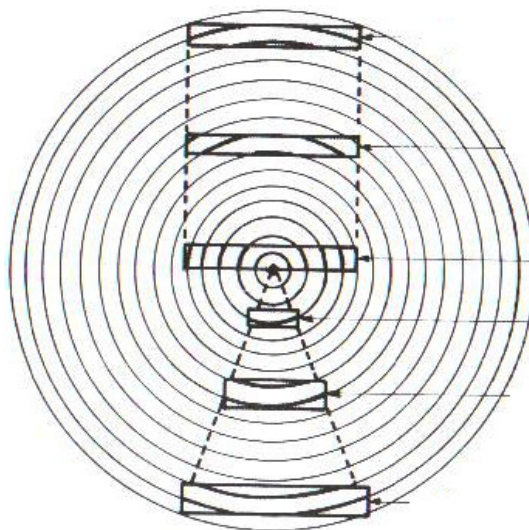


Figura 15 - Madeiras de diferentes regiões do tronco (BODIG; JAYNE, 1982).

### 2.2.2 Modelo Elástico Linear da Madeira

A madeira, assim como diversos outros materiais possuem um comportamento elástico, ou seja, a tensão é diretamente proporcional à deformação (PFEIL; PFEIL, 2003). Este comportamento é observado até certa quantidade de carregamento de carga, sendo que o material depois de certa carga passa a ter um comportamento plástico, ou seja, deforma-se, mas depois de retirada a carga, o material não volta a suas dimensões iniciais como podemos observar no gráfico da tensão pela deformação mostrado na Figura 16.

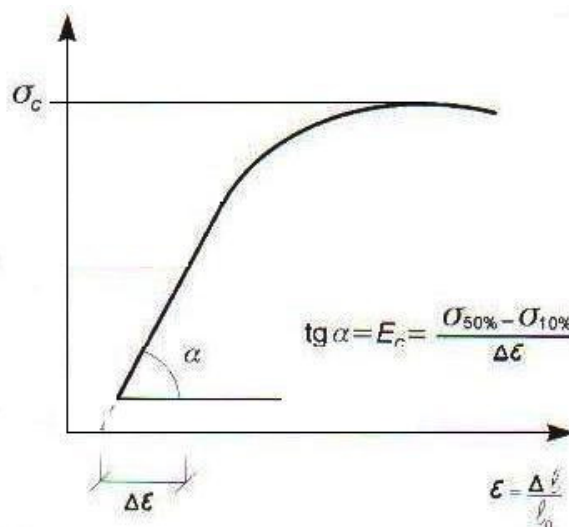


Figura 16 - Gráfico tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ), comportamento elástico da madeira. Editado de Pfeil e Pfeil (2003).

### 2.2.2.1 Lei de Hooke.

A lei de Hooke generalizada é uma lei matemática que associa uma deformação para cada tensão aplicada, supondo-se que o material em estudo tem um comportamento como um contínuo com componentes lineares definidas podendo ser encontrada na forma de rigidez e de flexibilidade (BODIG; JAYNE, 1982).

Segundo Bodig e Jayne (1982) a aplicação da lei de Hooke à madeira está sujeita às simplificações e severas restrições impostas citadas abaixo:

- Permitido apenas para pequenas deformações.
- A madeira deve ser mantida em temperatura constante e uniforme.
- O material deve ser homogêneo e com densidade uniforme.
- Não deve haver acoplamento entre as tensões.

Na forma tensorial da lei de Hooke, têm-se nove componentes de tensão  $\sigma_{ij}$ , onde  $i, j=1, 2$  e  $3$  e nove componentes de deformação  $\varepsilon_{ij}$ , onde  $i, j=1, 2$  e  $3$ . A lei de Hooke relaciona o tensor tensão com o tensor deformação em cada ponto do material (BODIG; JAYNE, 1982), conforme a Equação 1

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (01)$$

Onde  $C_{ijkl}$  são as componentes do tensor rigidez da espécie de madeira em estudo. A inversa da Equação 1 é dada por:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (02)$$

Onde  $S_{ijkl}$  são as componentes do tensor flexibilidade.

Para materiais anisotrópicos são consideradas vinte e uma constantes de flexibilidade e vinte uma constantes de rigidez. Para materiais ortotópicos o número de constantes de flexibilidade e de rigidez é reduzido a nove devido à simetria do material (BODIG; JAYNE, 1982).

A lei de Hooke é expressa por seis componentes independentes de tensão e seis componentes independentes de deformação (BODIG; JAYNE, 1982). A lei de Hooke expressa na forma da flexibilidade fica como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (03)$$

Na forma de rigidez a lei de Hooke é dada por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (04)$$

Em muitos casos é comum ser encontrada a Equação 3 e a Equação 4 na forma matricial, como pode ser observado nas Equações 5 e 6 abaixo (BODIG; JAYNE, 1982):

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (05)$$

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (06)$$

Onde  $\{\sigma\}$  corresponde à matriz coluna das tensões,  $\{\varepsilon\}$  à matriz coluna das deformações,  $[C]$  à matriz de flexibilidade e  $[S]$  à matriz de rigidez.

Por se tratar e um material ortotrópico, ou seja, possuir três planos de simetria perpendiculares entre si, pode-se definir para cada ponto do material, um sistema de coordenadas cartesianas designadas pela simetria do material (XAVIER, 2003). Para este referencial pode ser expressa a matriz de flexibilidade  $[S]$  como:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (07)$$

E a matriz de rigidez  $[C]$  como:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (08)$$

Os elementos das matrizes de flexibilidade e de rigidez acima são expressos conforme o referencial de simetria do material, sendo estes identificados experimentalmente através de ensaios mecânicos específicos para cada referencial, considerando-se que estes ensaios proporcionem tensões uniaxiais e cisalhamento puro. Com base nas relações entre as constantes de engenharia e o comportamento ortotrópico do material, a matriz de flexibilidade pode ser escrita da seguinte forma (XAVIER, 2003):



$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{TR}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (09)$$

No qual  $E_i$  é o módulo Young na direção  $i$ ,  $\nu_{ij}$  é o coeficiente de Poisson  $ij$ , sendo  $i$  a direção na qual se aplica a carga e  $j$  a direção da deformação medida.  $G_{ij}$  é o módulo de cisalhamento no plano  $ij$ .

A matriz de flexibilidade  $[S]$  é simétrica e atende a relação de igualdade  $\nu_{ij}/E_i = \nu_{ji}/E_j$  com  $ij=1,2$  e  $3$  (XAVIER, 2003).

Relacionando o referencial de ortotropia da madeira ( $LRT$ ) com a matriz de flexibilidade  $[S]$ , é possível exprimir a lei de Hooke generalizada como (XAVIER, 2003):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{RT} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Expandindo e usando a propriedade de simetria da matriz de flexibilidade, pode-se utilizar as seguintes relações (BODIG; JAYNE, 1982):

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E_L}(\sigma_L - \nu_{LR}\sigma_R - \nu_{LT}\sigma_T) \quad (11)$$

$$\varepsilon_R = \frac{1}{E_R}(\sigma_R - \nu_{RL}\sigma_L - \nu_{RT}\sigma_T) \quad (12)$$

$$\varepsilon_T = \frac{1}{E_T}(\sigma_T - \nu_{TL}\sigma_L - \nu_{TR}\sigma_R) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{RT} = \frac{1}{G_{RT}}\sigma_{RT} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{LT} = \frac{1}{G_{LT}}\sigma_{LT} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{LR} = \frac{1}{G_{LR}}\sigma_{LR} \quad (16)$$

### 2.2.2.2 Lei de Hooke no sistema plano na forma da rigidez

Para a descrição da elasticidade ortotrópica da madeira, ou para a solução de um problema de valor de fronteira, aproximações bidimensionais são frequentemente utilizadas. Essas aproximações são chamadas de sistemas planos.

Em um sistema plano de tensão, a tensão normal e a tensão de cisalhamento, são encontradas em um único plano. Com certas exceções, apenas três componentes de tensão existem: duas normais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) e um cisalhamento ( $\sigma_{12}$ ). Frequentemente duas tensões de cisalhamento  $\sigma_{13}$  e  $\sigma_{23}$  remanescem e a tensão normal  $\sigma_3$  está presente no sistema plano, contudo, eles são normalmente tão pequenos em relação para outra tensão no plano 1,2, que estas podem seguramente ser ignoradas (BODIG; JAYNE, 1982).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Onde os elementos da matriz são dados por:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad (18)$$

$$S_{12} = \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (19)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad (20)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (21)$$

Na forma condensada, pode ser escrito como:

$$\{\varepsilon\}_{1,2} = [S]\{\sigma\}_{1,2} \quad (22)$$

### 2.2.2.3 Lei de Hooke no sistema plano na forma de tensão

A Lei de Hooke na forma de tensão no plano 1,2 é dado por (BODIG; JAYNE, 1982):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Onde os elementos da matriz são dados por (BODIG; JAYNE, 1982):

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (24)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = -\frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (25)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (26)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (27)$$

Reescrevendo da forma condensada encontramos:

$$\{\sigma\}_{1,2} = [Q]\{\varepsilon\}_{1,2} \quad (28)$$

### 2.2.3 Transformações

A Lei de Hooke se modifica se os eixos de simetria do material, ao longo das fibras, estão rodados em relação aos eixos do material. Tomando como referência o sistema de simetria do material 1,2, as leis que serão descritas a seguir rotacionam o sistema de coordenadas de simetria do material 1,2 para o referencial X,Y como mostrado na Figura 17.

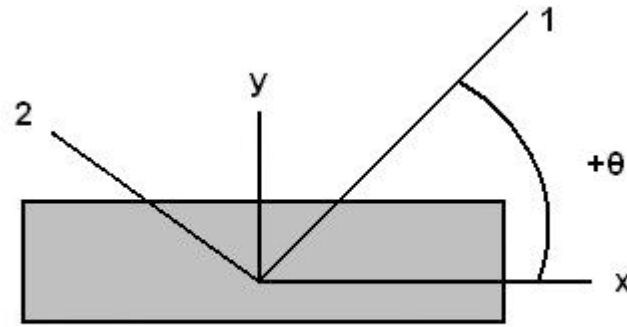


Figura 17 - Mudança no sistema de coordenadas do eixo de simetria do material  $X, Y$  para  $1, 2$  com um ângulo  $\theta$ .

A lei de transformação do sistema de coordenadas do eixo de simetria do material  $1, 2$  para  $X, Y$  entre as tensões é dada pela Equação 14 (BODIG; JAYNE, 1982):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_{XY} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de rotação entre os eixos de simetria e os eixos do material.

Na forma matricial, é reescrita como:

$$\{\sigma\}_{12} = [T]\{\sigma\}_{XY} \quad (30)$$

Na forma inversa, mudando de um referencial  $X, Y$  para o referencial  $1, 2$  a lei de transformação segue como (BODIG; JAYNE, 1982):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

Ou na forma matricial, como:

$$\{\sigma\}_{XY} = [T]^{-1}\{\sigma\}_{12} \quad (32)$$

#### 2.2.4 Lei de Hooke em um referencial arbitrário.

Em um referencial arbitrário a lei de Hooke pode ser expressa na seguinte forma (GARRIDO, 2004):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix}^{-1} \{\sigma\}_{12} \quad (33)$$

Na forma condensada onde  $\bar{S}$  é a matriz de flexibilidade expressa no referencial arbitrário pode ser escrita como:

$$\{\varepsilon\}_{XY} = [\bar{S}]\{\sigma\}_{X,Y} \quad (34)$$

Relacionando a lei das transformações expressa pela Equação 29 com a matriz de flexibilidade num referencial arbitrário, obtemos as Equações a seguir (BODIG; JAYNE, 1982)

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \quad (35)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \quad (36)$$

$$\bar{S}_{12} = \bar{S}_{21} = (S_{11} + S_{22}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) - S_{66} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (37)$$

$$\bar{S}_{66} = 4(S_{11} + S_{22} - 2S_{12}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2 \quad (38)$$

$$\bar{S}_{26} = -2(S_{11} \sin^2 \theta - S_{22} \cos^2 \theta) \sin \theta \cos \theta - (2S_{12} + S_{66}) \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (39)$$

$$\bar{S}_{16} = -2(S_{11} \cos^2 \theta - S_{22} \sin^2 \theta) \sin \theta \cos \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (40)$$

Para transformação das constantes de engenharia  $E$  (módulo de Young),  $G$  (módulo de elasticidade ou cisalhamento) e  $\nu$  (coeficiente de Poisson) em um referencial arbitrário que esteja submetido a uma mudança de coordenadas a um ângulo  $\theta$  podemos utilizar as relações trigonométricas para estimar seus valores no novo referencial arbitrário, com as seguintes Equações (WANGAARD, 1979):

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \cos^4 \theta \sin^4 \theta \left( \frac{1}{G_{12}} - 2 \frac{\nu_{12}}{\nu_1} \right) \quad (41)$$

$$\nu_\theta = -E_\theta \left[ \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) (\cos^2 \theta \sin^2 \theta) - \frac{\nu_{12}}{G_{12}} (\cos^4 \theta \sin^4 \theta) \right] \quad (42)$$

$$\frac{1}{G_\theta} = \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + 8 \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{G_{12}} (\cos^2 \theta \sin^2 \theta)^2 \quad (43)$$

### 2.3 Ensaios para a caracterização do comportamento da madeira ao cisalhamento.

Para a caracterização do comportamento ao cisalhamento da madeira, são encontrados alguns ensaios propostos por normas técnicas, como COPANT 30:1-007, ASTM D143-94 (1994), EN 408 (2002) e NBR 7190 (1997). Apesar de muito utilizados e indicados pelas normas técnicas, estes ensaios apresentam limitações na caracterização do comportamento da madeira ao cisalhamento, pois tratam-se de ensaios desenvolvidos inicialmente para materiais compósitos com o comportamento isotrópico ou ortotrópico, que foram adaptados para o material madeira sem considerar o seu comportamento real devido à heterogeneidade de sua constituição.

Uma das dificuldades encontradas no emprego dos ensaios presentes na literatura se refere à inexistência de um ensaio global que permita caracterizar todas as propriedades mecânicas da madeira, simultaneamente em todos os planos de simetria (*LR*, *RL* e *RT*) da madeira. Outra dificuldade encontrada é que nem todos os ensaios são aplicáveis a todos os planos de simetria do material madeira, ou seja, determinados ensaios são específicos para determinados planos.

Na literatura são escassos os trabalhos encontrados com o objetivo de aperfeiçoamento dos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas da madeira, especialmente para o comportamento ao cisalhamento. Dentre os presentes na literatura, podemos citar alguns ensaios mecânicos experimentais, adaptados de compósitos artificiais para a madeira, como o ensaio Iosipescu, ensaio de Arcan e o ensaio de tração “*off-axis*”.

Neste ítem é realizado um estudo crítico dos ensaios aplicados para a determinação do comportamento da madeira ao cisalhamento. São detalhados os ensaios propostos pela norma técnica NBR 7190 (1997) conhecido como ensaio de cisalhamento paralelo ou “*shear block test*”, e pelas normas EN 408 (2002) e ASTM D198-84 (1994) conhecido como ensaio do vão variável. Os ensaios experimentais estudados são: o de Arcan, ensaio Iosipescu e o ensaio de tração “*off-axis*”, sendo este último com maior detalhamento pois trata-se do objeto de estudo desta dissertação.



### 2.3.1 Ensaio de cisalhamento paralelo (“Shear Block Test”)

O cisalhamento é a característica mecânica da madeira, referente ao esforço necessário para a separação das fibras, como ilustrado na Figura 18.

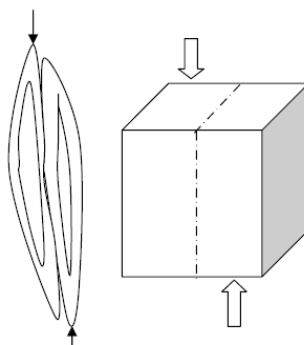


Figura 18 - Demonstração do cisalhamento nas fibras adaptado de (MORESCHI, 2007).

No Brasil, o ensaio normatizado proposto para a determinação da resistência ao cisalhamento é o NBR 7190 (1997), que consiste em um corpo de prova prismático previamente preparado, de forma que, quando submetido a uma tensão com o auxílio de um mecanismo acoplado a máquina de ensaios universal, proporciona uma tensão cisalhante em uma região específica do corpo de prova.

Para se obter a tensão de cisalhamento paralela às fibras da madeira, é utilizado o corpo de prova com a geometria e dimensões mostradas na Figura 19, sendo a precisão das dimensões de 0,1 mm. A região do corpo de prova, onde efetivamente ocorrerá o cisalhamento é chamada de plano de seção crítica ( $A_v$ ), no qual, a disposição deste plano é configurada paralelamente à direção radial da madeira.

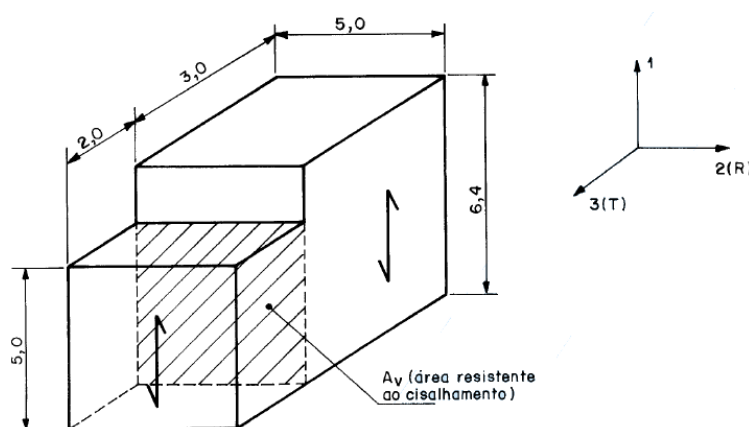


Figura 19 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na direção paralelas às fibras, com as dimensões em centímetros segundo NBR 7190 (1997).

O mecanismo utilizado para o acoplamento do corpo de prova com a máquina de ensaios universal, está com a sua geometria e dimensões expressas na Figura 20.

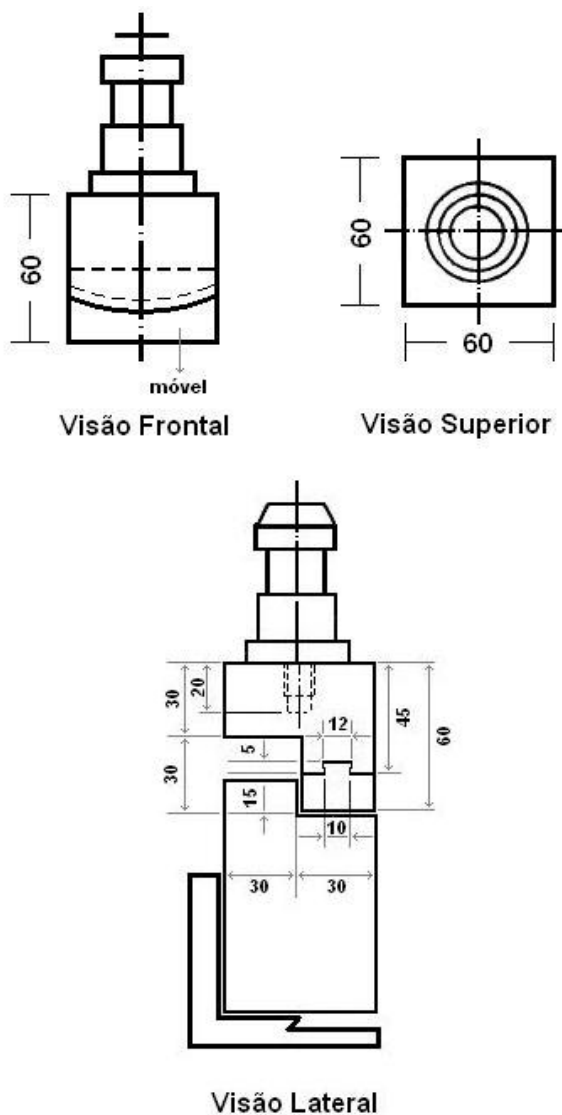


Figura 20 - Mecanismo de acoplamento do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997).

Para propiciar uma tensão cisalhante, o dispositivo de acoplamento é movimentado verticalmente para baixo, com um carregamento monotônico crescente a uma taxa de 2,5 MPa/min, conforme mostra a Figura 21.

Ensaio semelhante a este é proposto pela norma ASTM D143-94 (1994), conhecido como “*shear block test*”, diferencia-se do NBR 7190 (1997) apenas pelas dimensões do corpo de prova e taxa de carregamento da carga global aplicada pela máquina de ensaio universal.

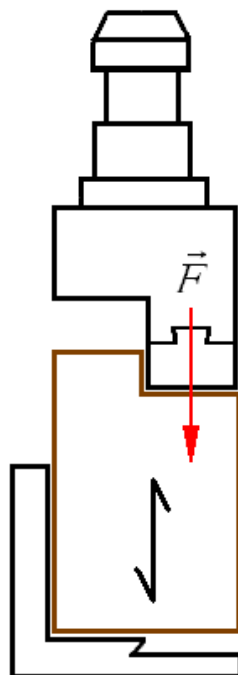


Figura 21 - Carregamento aplicado ao corpo de prova, adaptado de Garrido (2004).

A norma NBR 7190 (1997) prevê a aplicação da Equação 44 para determinar a resistência do cisalhamento paralela às fibras de madeira ( $f_{wv,0}$  ou  $f_{v0}$ ) onde  $F_{v0,max}$  é a força máxima cisalhante aplicada no corpo de prova e  $A_{v0}$  é a área inicial da seção crítica do copo de prova no plano paralelo às fibras indicada na Figura 19.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (44)$$

Para estimar os valores característicos da resistência ao cisalhamento utiliza-se da seguinte expressão proposta pela NBR 7190 (1997):

$$x_{wk} = \left( 2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}-1} \right) 1,1 \quad (45)$$

Onde  $x_n$  é o valor  $x$  obtido pela amostra  $n$ , devendo os dados ser postados em ordem crescente e deve-se desprezar o valor mais alto obtido se o número de amostras for ímpar.

O ensaio proposto pela NBR 7190 (1997) admite que o plano crítico do corpo de prova possui um campo tensões com distribuição homogênea e uniforme como mostrado na Figura 22, promovendo um estado de cisalhamento puro nesta região (MORESCHI, 2007).

O trabalho Rammer e Soltis (1994) demonstrou que ensaio “*shear block test*” ASTM D143-94 (1994) semelhante ao NBR 7190 (1997), pode apresentar valores de resistência ao cisalhamento, subestimados em até 30% quando comparado os resultados com outros tipos de ensaio. Liu, Ross e Rammer (1996) confirma que os valores da resistência ao cisalhamento obtido pelo ASTM D143-94 (1994), são inferiores, pela razão do estado de tensão no plano crítico do corpo de prova não se apresentar homogêneo como se pretende com o referido ensaio.

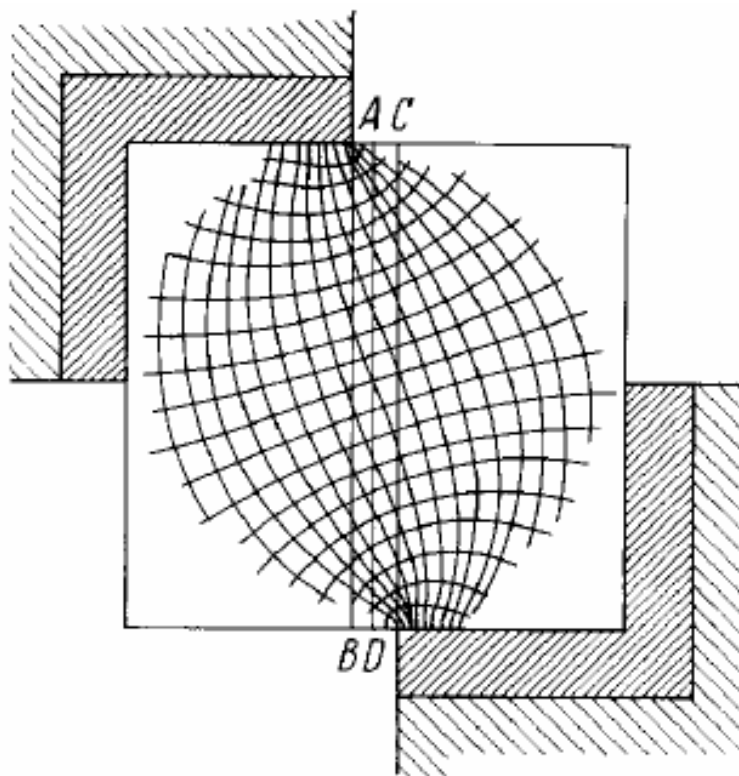


Figura 22 - Tensões distribuídas uniformemente pretendidas no ensaio de cisalhamento (MORESCHI, 2007).

### 2.3.2 Ensaio do vão variável.

As normas EN 408 (2002) e ASTM D198-84 (1994) propõem o ensaio do vão variável para a determinação simultânea do módulo de Young  $E_L$  e os módulos de cisalhamento  $G_{LR}$  e  $G_{LT}$ .

O ensaio do vão variável que consiste em uma barra do material apoiado em dois pontos (variáveis as distâncias), de forma que se aplique uma força normal a esta barra flexionando-a, conforme podemos observar na Figura 23.

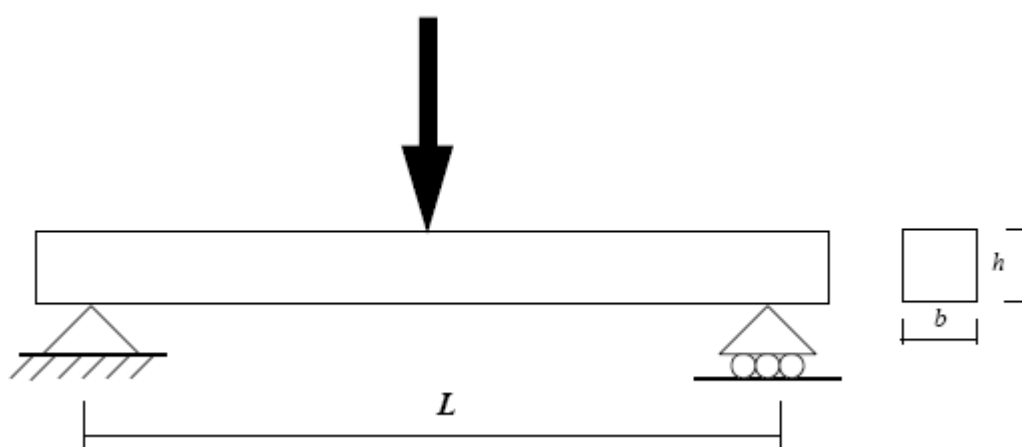


Figura 23 - Esquema do ensaio do vão variável, adaptado de Garrido (2004).

O ensaio do vão variável baseia-se no ensaio de flexão de três pontos e na teoria de Bernoulli-Euler, demonstrada pela Equação 46, segundo Garrido (2004).

$$E_L^a = \frac{1}{4b} \left( \frac{h}{L} \right)^3 \frac{F}{f} \quad (46)$$

A teoria de Bernoulli-Euler não prevê a existência de efeitos de cisalhamento, para contornar tal deficiência a teoria das vigas de Timoshenko procura contemplar esse efeito, assumindo que a deflexão de uma viga tem uma componente provocada pelo momento fletor e outra provocada pela tensão de cisalhamento, sendo esta teoria utilizada para a determinação simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de cisalhamento, baseando-se na Equação seguinte (GARRIDO, 2004):

$$\frac{1}{E_L^a} = \frac{1}{E_L} + \frac{J}{G_{L(outT)}} J \left( \frac{h}{L} \right)^2 \quad (47)$$

Onde:

$L$  é a distância entre os apoios,

$E_L^a$  é o módulo Young aparente dado pela Equação 47,

$h$  e  $b$  são as dimensões da secção transversal do corpo de prova e  $F/f$  representa a inclinação inicial da curva força/flecha

$J$  é o coeficiente de cisalhamento, igual ao quociente entre a tensão de cisalhamento máxima e a tensão de corte média ( $J=1,2$ ).

Segundo Oliveira (2003), para determinar o módulo de cisalhamento utilizando a Equação 48, são necessárias a realização de vários ensaios com o mesmo corpo de prova, com diferentes valores da distância do vão ( $L$ ).

O módulo de cisalhamento é obtido através de uma análise de regressão dos pontos experimentais  $1/E_L^a - (h/L)^2$  (OLIVEIRA, 2003):

$$G = \frac{J}{m} \quad (48)$$

Este ensaio permite a determinação apenas dos módulos de cisalhamento  $G_{LR}$  e  $G_{LT}$ , não sendo possível a determinação do módulo de cisalhamento  $G_{RT}$ , devidas às dimensões do corpo de prova que não podem ser obtidas na direção  $RT$ .

Para Oliveira (2003), o ensaio do vão variável não apresenta resultados apurados e satisfatórios, justificando que diversos trabalhos demonstram que a utilização de tal ensaio estima valores subestimados, com aproximadamente uma ordem de grandeza inferior aos valores reais.

### 2.3.3 Ensaio Iosipescu.

Este ensaio foi proposto por Iosipescu (1967) para materiais isotrópicos. Xavier (2003) enumera diversos trabalhos que passaram a utilizar o ensaio Iosipescu em materiais ortotrópicos. A partir de 1993 este ensaio passou a ser normatizado pela ASTM para materiais sintéticos sendo encontrado sob o código ASTM D5379-93 (1993). Em 2003 Xavier (2003) adaptou o ensaio para determinação do comportamento ao cisalhamento na madeira.

O ensaio Iosipescu, consiste em um corpo de prova com um entalhe em V que forma um ângulo aberto de  $90^\circ$ , como mostra a Figura 24, que sofre a solicitação de uma força global  $P$  com o uso de um dispositivo apropriado que pode ser observado na Figura 25 (Gonçalves et al., 2009).

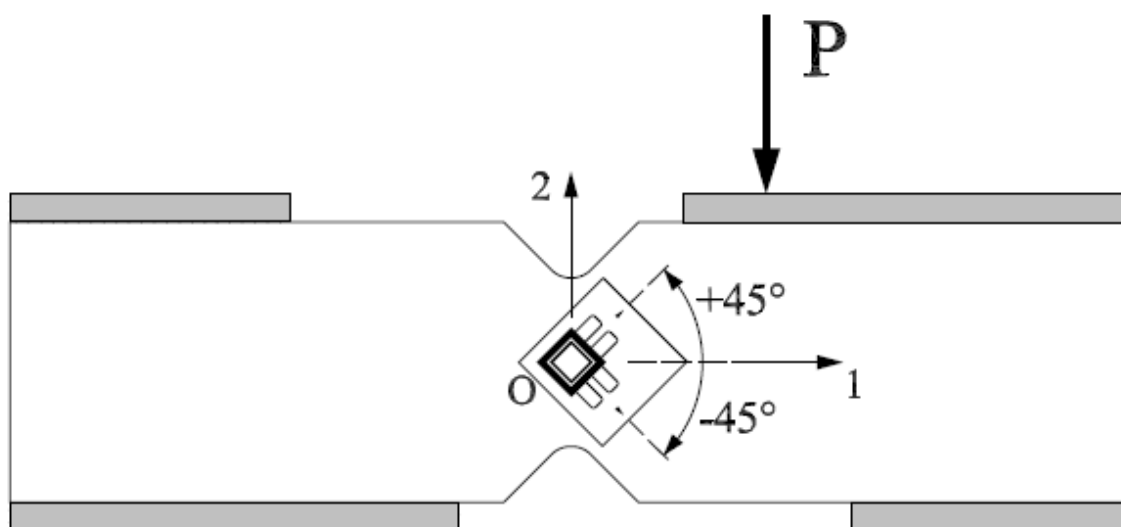


Figura 24 - Corpo de prova do ensaio iosipescu adaptado para madeira por Xavier (2003)

A configuração do corpo de prova é disposta na forma da Figura 24, a fim de produzir uma tensão de cisalhamento homogêneo no centro do corpo de prova, no qual as deformações podem ser medidas através de um extensômetro colado no seu centro (GONÇALVES et al., 2009).

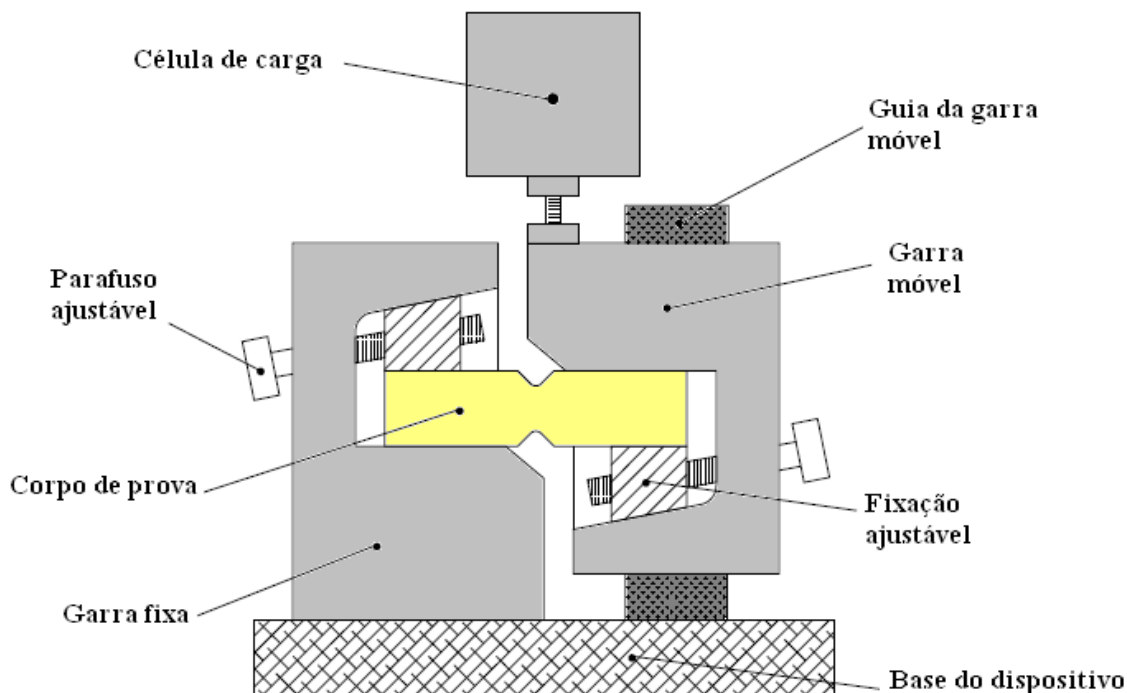


Figura 25 - Esquema de dispositivo mecânico para o ensaio Iosipescu segundo ASTM D5379-93 (1993).

A tensão de cisalhamento média é dada por (XAVIER, 2003):

$$\sigma_6 = \frac{P}{A} \quad (49)$$

Onde  $P$  é a força global aplicada pela célula de carga e  $A$  é a área da seção transversal entre os entalhes. A deformação é medida pelo extensômetro e transformada para o referencial através da Equação 50 (XAVIER, 2003):

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_{+45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ} \quad (50)$$

Onde  $\varepsilon_{+45^\circ}$  é a deformação medida pelo extensômetro a  $+45^\circ$  e  $\varepsilon_{-45^\circ}$  é a deformação medida pelo extensômetro em  $-45^\circ$ .

Supondo que a tensão de cisalhamento seja uniforme na região do entalhe, o módulo de cisalhamento é dado por (XAVIER, 2003):



$$G_{12}^a = \frac{\sigma_6}{\varepsilon_6} \quad (51)$$

Segundo Xavier (2003), diversos trabalhos mostraram que o estado de tensão na região do entalhe não é homogêneo nem uniforme. Sendo desta forma, determinado um módulo de cisalhamento aparente pela Equação 51, sendo então preciso o uso de fatores de correção para a determinação do verdadeiro módulo de cisalhamento  $G_{12}^C$ .

$$G_{12}^C = CS G_{12}^a \quad (52)$$

Em que  $C$  é dado por:

$$C = \frac{\sigma_6^o}{\sigma_6} \quad (53)$$

E  $S$  é dado por:

$$S = \frac{\varepsilon_6}{\varepsilon_6^o} \quad (54)$$

$\sigma_6^o$  corresponde ao valor da tensão de corte no centro do corpo de prova e  $\varepsilon_6^o$  à deformação de cisalhamento. Xavier (2003) afirma que estes valores não podem ser medidos experimentalmente, para contornar esta dificuldade, recorre ao método dos elementos finitos para a obtenção de tais valores.

Xavier (2003) considera o ensaio Iosipescu adequado para a determinação do módulo de cisalhamento diferente da determinação da resistência ao cisalhamento que demonstra ser um ensaio inadequado, pois o estado de tensão encontrado no centro do corpo de prova não é homogêneo.

### 2.3.4 Ensaio de Arcan.

O ensaio de Arcan é um método desenvolvido por Arcan, Goldenberg e Nicolau (1958) para a caracterização mecânica de materiais compósitos. Segundo Oliveira (2004), encontramos na literatura diversos trabalhos com a aplicação de tal ensaio para a caracterização do comportamento da madeira ao cisalhamento.

O ensaio de Arcan, consiste em um corpo de prova parecido com o do ensaio Iosipescu, mas com uma particularidade quanto à aplicação de carga pela máquina de ensaios, que é realizado com o auxílio de um dispositivo diferente do ensaio Iosipescu, que pode ser observado na Figura 26, segundo Cerveira (2008).

Para Xavier (2003), o tratamento dos dados é parecido com o tratamento dado aos dados do ensaio Iosipescu, visto na Seção 4.3, pois no centro do corpo de prova é colado um extensômetro (Figura 26) que mede as deformações correntes no centro do corpo de prova.

Para a determinação da tensão de cisalhamento média, utiliza-se a Equação 49. Para verificar a deformação ocorrida no extensômetro utiliza-se a Equação 50 e para a correção dos dados pode-se utilizar o mesmo processo expresso entre as Equações 51 à 54.

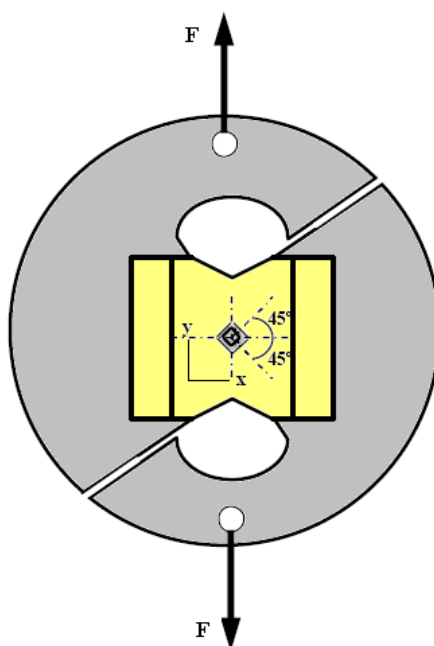


Figura 26 - Corpo de prova e dispositivo de solicitação de carga para o ensaio de Arcan, adaptado de Garrido (2004).

Oliveira (2004), em sua dissertação de mestrado realiza um estudo experimental e a análise pelo método dos elementos finitos para a madeira de *Pinus Pinaster* Ait, no qual demonstra que o ensaio de Arcan é um ensaio adequado para a determinação do comportamento ao cisalhamento em todos os seus planos de simetria.

### 2.3.5 Ensaio “*off-axis*”.

O ensaio de tração “*off-axis*” foi proposto por Chamis e Sinclair (1977) com aplicação em compósitos artificiais. O referido ensaio consiste em um corpo de prova com o formato de um paralelepípedo, no qual a orientação de suas fibras 1,2, forma um ângulo  $\alpha$  com a direção X do corpo de prova, como podemos observar na Figura 27.

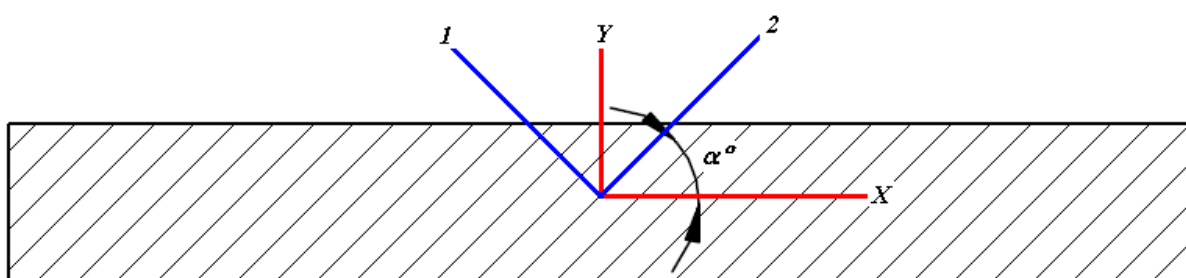


Figura 27 - Corpo de prova off-axis, 1,2 eixo de simetria do material; X,Y eixo de simetria do corpo de prova.

Na região central do corpo de prova, onde se pretende proporcionar um estado de tensão puro, é colado um extensômetro a fim medir as deformações provocadas por uma força de tração horizontal aplicada em suas extremidades, como mostrado na Figura 28 (CHAMIS; SINCLAIR, 1977).

O ensaio de tração “*off-axis*” é realizado em máquinas universais de ensaios, acompanhada de um módulo eletrônico que proporcione a captação dos dados medidos pelo extensômetro. Podemos destacar que o ensaio de tração “*off-axis*” tem custo total considerado relativamente baixo, e fácil aplicabilidade devido a sua configuração, tornando viável a sua aplicação (GARRIDO, 2004).

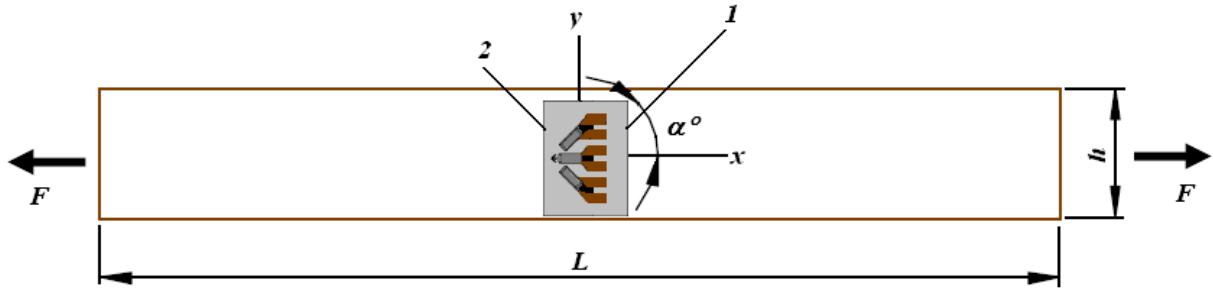


Figura 28 - Extensômetro na região central do corpo de prova “*off-axis*”, com a indicação da direção da força de tração aplicada.

Para Chamis e Sinclair (1977) o ângulo  $\alpha$  formado entre o eixo de simetria referencial do material e o eixo longitudinal  $L$  do corpo de prova deve ser aquele onde o quociente entre a deformação ao cisalhamento no referencial de simetria do material e a deformação linear axial do corpo de prova seja a máxima encontrada, no trabalho de Chamis e Sinclair (1977) o ângulo proposto para materiais compósitos é o de  $10^\circ$ .

Garrido (2004) propõe as seguintes relações entre as deformações no referencial de simetria do material  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  e a deformação  $\varepsilon_x$  demonstrando que o valor do ângulo  $\alpha$  depende diretamente das propriedades do material.

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{xx}} = \frac{S_{11} \cos^2 \alpha + S_{12} \sin^2 \alpha}{S_{11} \cos^4 \alpha + 2 \left( S_{11} + \frac{1}{2} S_{66} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + S_{22} \sin^4 \alpha} \quad (55)$$

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{xx}} = \frac{S_{11} \cos^2 \alpha + S_{22} \sin^2 \alpha}{S_{11} \cos^4 \alpha + 2 \left( S_{11} + \frac{1}{2} S_{66} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + S_{22} \sin^4 \alpha} \quad (56)$$

$$\frac{\varepsilon_6}{\varepsilon_{xx}} = \frac{S_{66} \sin \alpha \cos \alpha}{S_{11} \cos^4 \alpha + 2 \left( S_{11} + \frac{1}{2} S_{66} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + S_{22} \sin^4 \alpha} \quad (57)$$

Uma dificuldade encontrada no ensaio de tração “*off-axis*” consiste no acoplamento do corpo de prova a máquina de ensaio universal, pois são utilizadas garras com cunhas deslizantes, sistema que proporciona uma compressão das garras nas extremidades do corpo de prova, a fim de evitar um escorregamento entre as garras

e o corpo de prova (PINDERA; HERAKOVIC, 1986). Este sistema trás por conseqüência um esmagamento nas extremidades do material, que conseqüentemente proporciona um momento fletor além da sollicitação global aplicada na direção  $X$  para o cisalhamento das fibras. Pelo motivo antes citado, a deformação ideal do corpo de prova em paralelogramo ilustrado na Figura 29-a dá lugar a uma deformação em “S” ilustrada na Figura 29-b segundo Pindera e Herakovic (1986).

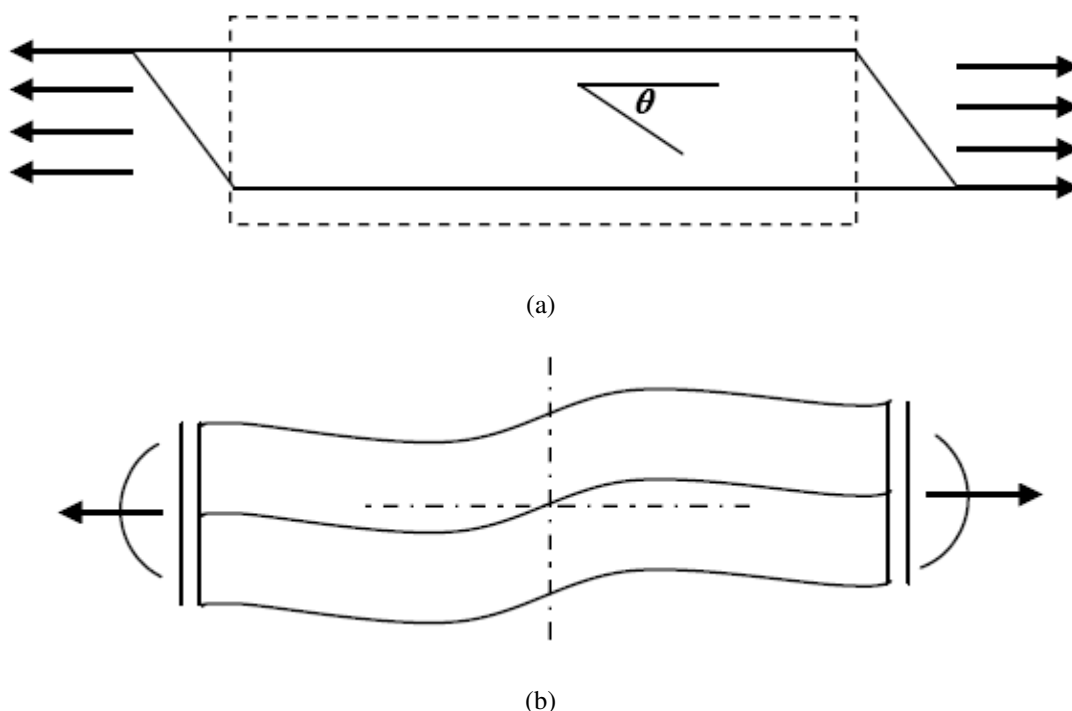


Figura 29 - (a) Deformação ideal do corpo de prova “*off-axis*” – (b) Deformação real no corpo de prova “*off-axis*” adaptado de Garrido (2004).

Os trabalhos de Pindera e Herakovich (1986 apud GARRIDO, 2004, p.56), Sun e Berret (1988 apud GARRIDO, 2004, p.56) e Boheler e El Aourfi (1989 apud GARRIDO, 2004, p.56), consistem na resolução do problema de acoplamento do corpo de prova com as garras da máquina de ensaio. Dentre estes trabalhos, Sun e Chung (1993) propõem a utilização de placas oblíqua coladas nas extremidades dos corpos de prova (Figura 30), solução esta que se mostrou eficiente através de simulação pelo método de elementos finitos e experimentalmente, possibilitando um estado de tensão homogêneo e uniaxial em uma grande região do corpo de prova. Método este testado experimentalmente por Garrido (2004) sendo considerado

apropriado para a obtenção de um estado de tensão uniaxial e homogêneo em uma região significativa no corpo de prova “*off-axis*” para a madeira de *Pinus Pinaster Ait.*

Para a determinação do ângulo  $\beta$  das placas mostrados na Figura 30 propostas por Sun e Chung (1993), é utilizada a Equação 58 onde  $\bar{S}_{ij}$  são elementos da matriz de flexibilidade do sistema de eixos do corpo de prova.

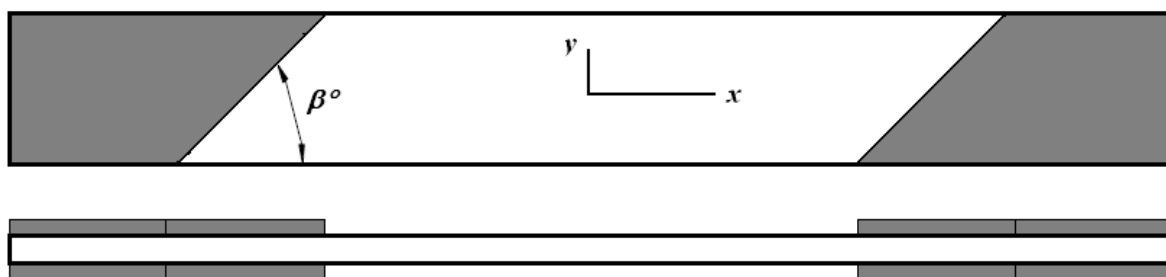


Figura 30 - Placas oblíquas de amortecimento, formando um ângulo  $\beta$  com o eixo  $x$  do corpo de prova.

$$\cot \beta = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}} \quad (58)$$

### 2.3.5.1 Determinação do módulo de cisalhamento.

Os dados extraídos diretamente do ensaio de tração “*off-axis*” são, a força global, aplicada pela máquina de ensaio universal e as deformações lineares  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  e  $\varepsilon_c$  medidas pelo extensômetro colado na região central do corpo de prova. Segundo Garrido (2004), se o estado de tensão for uniaxial no centro do corpo de prova, a tensão pode ser dada por:

$$\sigma_x = \frac{F}{A} \quad (59)$$

Onde  $F$  é a força global aplicada pela máquina de ensaio e  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova.

As componentes do estado de tensão no referencial de simetria do material são calculadas, seguindo a lei das transformações contida na Seção 2.2.3 (Equação 29) ficando expressas como:

$$\sigma_1^{média} = \frac{P}{A} \cos^2 \alpha \quad (60)$$

$$\sigma_2^{média} = \frac{P}{A} \sin^2 \alpha \quad (61)$$

$$\sigma_6^{média} = \frac{P}{A} \sin 2\alpha \quad (62)$$

A deformação de cisalhamento média no referencial de simetria do material é dada pela Equação 63 (CHAMIS; SINCLAIR, 1977):

$$\varepsilon_6^{média} = (\varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c) \sin \alpha + (\varepsilon_a - \varepsilon_c) \cos \alpha \quad (63)$$

O módulo de cisalhamento aparente obtém-se dividindo a tensão de cisalhamento média  $\sigma_6^{média}$  pela deformação de cisalhamento média  $\varepsilon_6^{média}$ , quando a distribuição das tensões for uniaxial e homogênea, a Equação 64 também se refere ao verdadeiro valor do módulo de cisalhamento do material (GARRIDO, 2004):

$$G_{12}^a = \frac{\sigma_6^{média}}{\varepsilon_6^{média}} \quad (64)$$

Quando a condição de homogeneidade das tensões não acontecer, o método de correção analítico, proposto no trabalho de Garrido (2004) pode ser utilizado, para a determinação do módulo de cisalhamento através da Equação 65:

$$G_{12} = CSG_{12}^a \quad (65)$$

Onde,  $C$  e  $S$  são fatores de correção definidos por:

$$C = \frac{\sigma_6}{\sigma_6^{m\u00e9dia}} \quad (66)$$

$$S = \frac{\varepsilon_6^{m\u00e9dia}}{\varepsilon_6} \quad (67)$$

Onde  $\sigma_6$  é a tensão de cisalhamento no ponto central do corpo de prova e  $\varepsilon_6$  é a deformação de cisalhamento média na região de colagem do extensômetro.

#### 2.3.5.2 Estado da arte do ensaio “*off-axis*” aplicado à madeira

Na literatura são encontrados alguns trabalhos com a aplicação do ensaio de tração “*off-axis*” à madeira, a partir deste ponto, será realizada uma revisão dos principais trabalhos.

Yoshihara e Ohta (2000) realizaram o estudo da estimativa da resistência ao cisalhamento na madeira através do ensaio de tração “*off-axis*” e a comparação dos dados obtidos com o ensaio de torção, nas espécies *Sitka spruce* (*Picea sitchensis* Carr.) e *katsura* (*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. e Zucc.).

Para o ensaio “*off-axis*”, foram utilizadas cinco amostras para cada ângulo  $\alpha$ , com variação entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$  de um corpo de prova para o outro e de  $30^\circ$  a  $90^\circ$  com intervalos de  $15^\circ$ . Nas extremidades do corpo de prova, foram coladas placas feitas de *Kamba* (*Japanese birch*, *Betula* sp.)

Os valores obtidos da resistência de cisalhamento na escala de ângulo  $\alpha=10^\circ-30^\circ$  para *spruce* e  $\alpha=15^\circ-30^\circ$  para *katsura*, com o ensaio “*off-axis*”, foram próximas aos valores encontrados no ensaio de torção, porém para ângulos  $\alpha$  maiores do que  $10^\circ$  recomendado para os compósitos de fibras por Chamis e Sinclair (1977). Yoshihara e



Ohta (2000), concluíram que a tensão de tração perpendicular à grã pode ter uma grande influência na resistência ao cisalhamento. O módulo da resistência ao cisalhamento predita pelos testes de tensão uniaxial, deve ser tratado como valores aproximados. Outros métodos devem ser adotados para a determinação do módulo de resistência do cisalhamento da madeira conclui Yoshihara e Ohta (2000).

Liu (2001) realizou um estudo com os dados obtidos por Yoshihara e Ohta (2000), para avaliar a relação do efeito de Poisson e o coeficiente de interação mútua na distribuição da tensão, aplicando o critério de ruptura *Tsai-Hill*. Liu (2001), concluiu que o ângulo adequado para o ensaio de tração “*off-axis*” é o de  $10^\circ$ , pois neste ângulo a componente da tensão de cisalhamento é aquela que mais contribui para o coeficiente de interação mútua.

Garrido (2004), faz o estudo da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” para a identificação do comportamento ao cisalhamento da madeira *Pinus pinaster* Ait., nos planos de simetria naturais *LR*, *LT* e *RT*.

Quando realizado o ensaio com ângulo  $\alpha=15^\circ$  com o eixo de simetria do material e  $\beta=34^\circ$  na inclinação das placas, Garrido (2004) afirma que é um ensaio adequado pra a identificação direta dos módulos de cisalhamento das madeiras de pinho nos planos de simetria natural *LR* ( $G_{LR}$ ) e *LT* ( $G_{LT}$ ), sendo questionável a utilização destes ângulos no plano de simetria *RT*, devida a distribuição de tensões ao longo do corpo de prova que não se apresentou uniforme.

Para Garrido (2004) o ensaio “*off-axis*”, quando aplicado à madeira *Pinus pinaster* Ait. pode ser considerado um bom método de determinação do módulo de cisalhamento nos planos *LR* e *LT*, quando comparado aos ensaios de Arcan realizado por Oliveira (2004) e Iosipescu realizado Xavier (2003).

Por não existir um estado de tensão de cisalhamento puro no referencial de simetria natural, o ensaio “*off-axis*” não permite a identificação direta das resistências ao cisalhamento  $S_{LR}$  e  $S_{LT}$ , sendo necessário recorrer a um critério de ruptura adequado para determinação dessas propriedades, no qual utiliza o critério de ruptura de *Tsai-Hill*, e obtém uma boa estimativa das propriedades no ângulo de  $15^\circ$ .

Conclui que é questionável a possibilidade de recorrer ao ensaio de tração “*off-axis*” para determinação das propriedades  $G_{RT}$  e  $S_{RT}$  no plano de simetria  $RT$ , devido à baixa razão  $E_R/E_T$ , e à curvatura dos anéis de crescimento (GARRIDO, 2004).

O trabalho realizado por De Conti (2006), apresenta uma simulação numérica pelo método dos elementos finitos do ensaio “*off-axis*”; utilizando o interpretador de comandos SCILAB, para identificação do comportamento de cisalhamento da madeira *Pinus Pinaster* Ait e comparação dos resultados com Garrido (2004).

Baseado na Teoria da Elasticidade e no Método dos Elementos Finitos foi desenvolvido um programa no ambiente SCILAB para calcular as tensões e deslocamentos de uma placa de madeira bidimensional, homogênea, ortotrópica com um comportamento linear e elástico, discretizada em elementos finitos triangulares lineares ou retangulares bilineares. O ângulo “*off-axis*” é incluído transformando a matriz do material por uma rotação de  $\alpha=15^\circ$ .

Através do programa SCILAB, construiu-se uma matriz e o vetor força de cada elemento, em seguida montou-se a equação matricial geral do sistema, incluindo as condições de contorno do problema. Para finalizar, o programa resolve essa Equação nas variáveis nodais, obtendo os deslocamentos e as deformações para cada nó e as tensões em cada elemento.

O método desenvolvido por De Conti para elementos finitos demonstrou ser uma ferramenta útil para caracterização de propriedades mecânicas da madeira. Comparando os resultados de De Conti (2006) com Garrido (2004) verifica-se que o programa reproduziu o comportamento ao cisalhamento antes obtido no ensaio de tração “*off-axis*”.

Santos (2007) redige em seu trabalho uma coletânea dos métodos para a caracterização mecânica da madeira, no qual o ensaio de tração “*off-axis*” está incluído como sendo um bom método para a caracterização do comportamento ao cisalhamento nos planos de simetria  $LR$  e  $LT$ .

Todeschini (2009) realiza em seu trabalho teórico da dedução matemática para a extração dos dados em um ensaio de tração e compressão “*off-axis*”, fazendo adaptações na fórmula de Hankinson para a obtenção dos dados reais.

Yoshihara (2009) realiza um ensaio de compressão “*off-axis*” com as espécies *Agathis* sp. E *Cercidiphyllum japonicum* Sieb. Et Zucc. variando os ângulos afim de definir o mais adequado para a determinação da relação tensão-deformação. Para isso foi utilizada a Equação de Ramberg-Osgood e aproximação por regressão dos parâmetros contidos na Equação de Hankinson.

A comparação da relação tensão-deformação obtida experimentalmente com a obtida numericamente revelou que o ensaio de compressão “*off-axis*” pode ser considerado válido quando usado as relações da ortotropia da madeira.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Simulação numérica do ensaio de resistência ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997).

Para a análise do comportamento do corpo de prova no ensaio para caracterização das propriedades mecânicas ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997), foi realizada uma simulação numérica pelo MEF (método dos elementos finitos) através do software ANSYS ®. O objetivo desta análise é verificar se o comportamento dos campos de tensão gerados na região de cisalhamento  $A_v$  mostrado na Figura 19, são homogêneos como pretendido com o referido ensaio.

Para a construção do modelo em 3-D, foram utilizadas as dimensões indicadas na Figura 19 segundo a norma NBR 7190 (1997). Buscando melhorar a interpretação e entendimento da construção do modelo e dos resultados obtidos pelo estudo, conforme mostrado na Figura 31, serão consideradas as regiões  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  do corpo de prova.

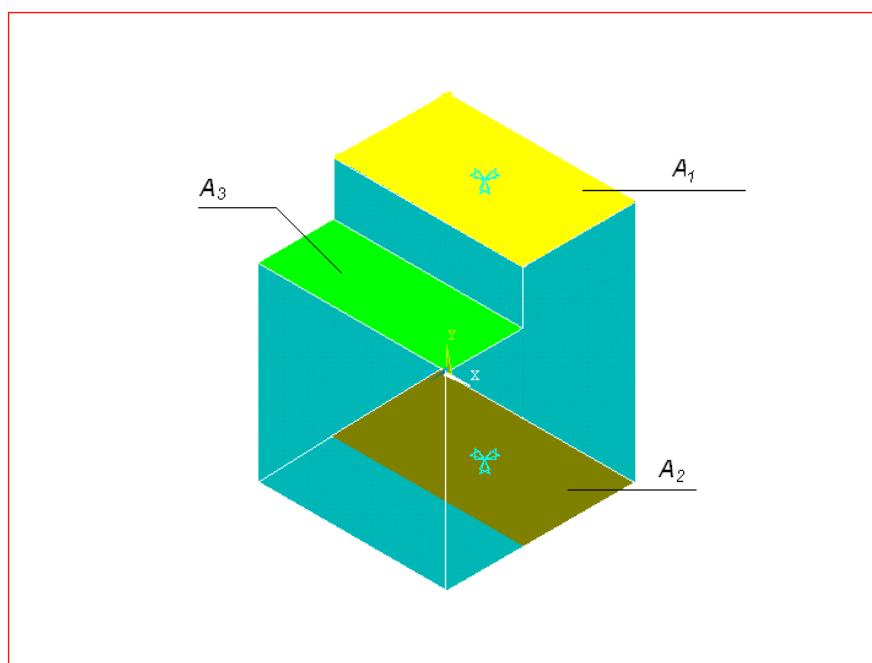


Figura 31 - Condições de contorno impostas ao modelo do corpo de prova. Regiões  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  que serão consideradas neste estudo.

Na Figura 32 é tomada como referência, as linhas 1, 2, 3 e 4 como localizações das regiões no qual o estudo da distribuição das tensões se faz importante por se tratar das linhas que formam a região  $A_v$  em discussão.

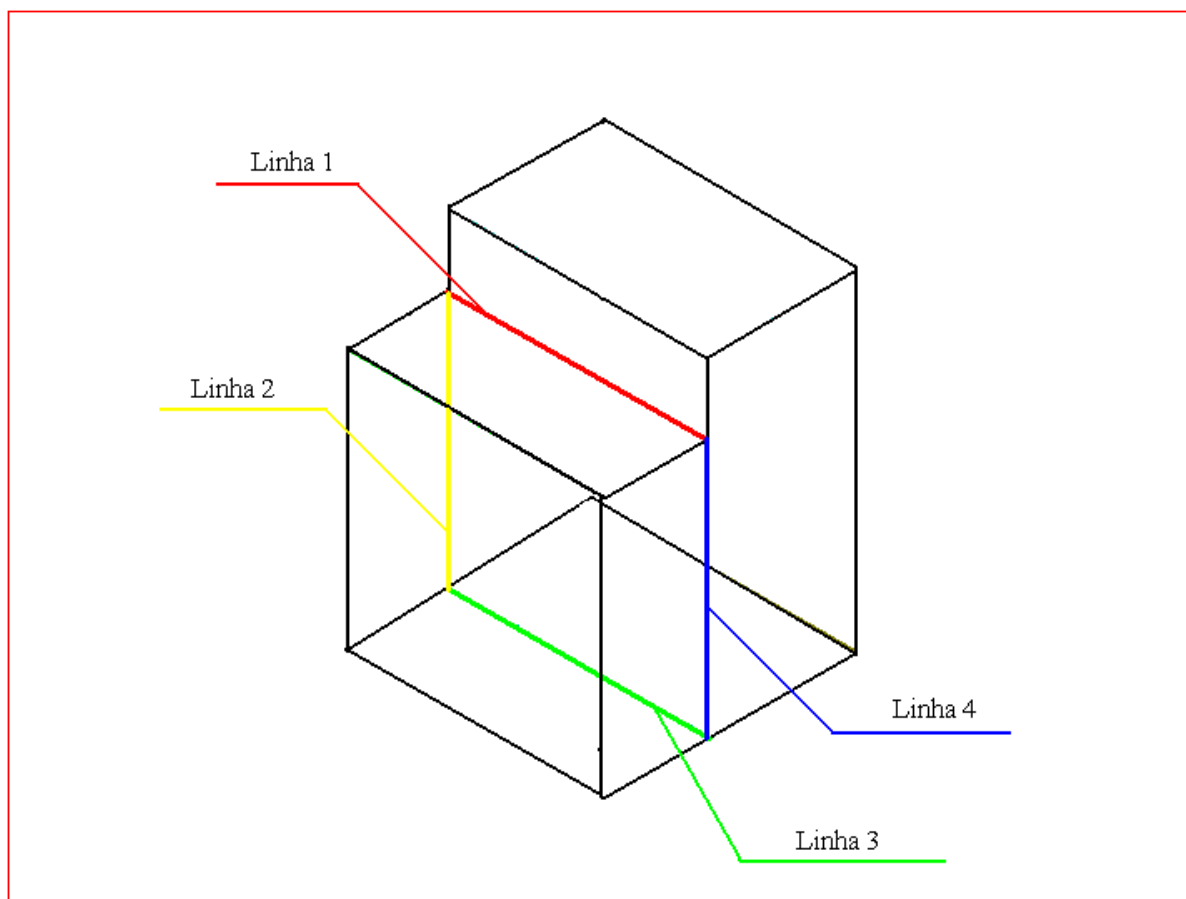


Figura 32 - Linhas de referência para análise dos campos de tensão.

Na construção do modelo o elemento selecionado para a análise foi o *SOLID 64* da biblioteca de elementos do software ANSYS®, por apresentar bom comportamento para análises estruturais, pois permite a entrada de todas as constantes de engenharia relacionadas ao estudo, assim como também permite a leitura precisa dos resultados desta simulação.

As constantes de engenharia do material madeira *Eucalyptus citriodora* usadas para a modelagem, são as determinadas experimentalmente por Ballarin e Nogueira (2003), expressas na Tabela 3, que foram extraídas a partir de ensaios destrutivos de compressão e tração, seguindo a prescrição da metodologia experimental da Norma Brasileira de Estruturas de Madeira NBR 7190 (1997).

Tabela 3 – Constantes de engenharia de *Eucalyptus citriodora* (Ballarin e Nogueira, 2003)

<i>Eucalyptus citriodora</i>			
$E_L$	16981 MPa	$G_{LR}$	861 MPa
$E_R$	1825 MPa	$S_{11}$	$0,058 \cdot 10^{-12}$
$\nu_{LR}$	0,23	$S_{12}$	$0,014 \cdot 10^{-12}$
$\nu_{LT}$	0,48	$S_{22}$	$0,548 \cdot 10^{-12}$
$\nu_{RT}$	0,70	$S_{66}$	$1,161 \cdot 10^{-12}$

As constantes de engenharia  $E_T$ ,  $G_{LT}$  e  $G_{RT}$  não são encontradas na literatura, portanto foram determinadas analiticamente pelos fatores de conversões propostos por Bodig e Jayne (1982).

$$\begin{aligned}
 \frac{E_L}{E_T} &= \frac{20}{1,6} & \frac{E_T}{E_R} &= \frac{1,6}{1} & \frac{E_L}{E_R} &= \frac{20}{1} \\
 \frac{G_{LR}}{G_{LT}} &= \frac{10}{9,4} & \frac{G_{LT}}{G_{RT}} &= \frac{9,4}{1} & \frac{G_{LR}}{G_{RT}} &= \frac{10}{1}
 \end{aligned} \tag{68}$$

Para a construção da malha do modelo em estudo, foi realizada uma análise de convergência utilizando como critério a estabilização dos dados encontrados no centro da linha 4 indicada na Figura 31, por se tratar de uma região presente no plano crítico cisalhante.

Para obter a malha, foi aumentado o número de elementos a cada interação, os dados foram obtidos com a relação  $x_i^{centro}/x_i^{máximo}$ , onde  $x_i^{centro}$  é o valor da grandeza  $x$  (deformação ou tensão) em estudo no centro da linha 4 no referencial  $x$ ,  $y$  ou  $z$  do modelo e  $x_i^{máximo}$  é o maior valor da grandeza na linha 4.

O critério utilizado para a escolha da malha foi o comparativo quanto à estabilização da variação dos valores normalizados das grandezas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{xz}$  e  $\varepsilon_{yz}$ , e assim a opção pela malha que apresenta a convergência destes dados com menor número de nós usados.

As condições de contorno impostas ao modelo foram, a fixação das áreas  $A_1$  e  $A_2$  indicadas na Figura 31, nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ; e a aplicação de uma tensão na direção  $Y$  com sentido para baixo, com intensidade 16,3 MPa na área  $A_3$ , referente ao módulo de cisalhamento da madeira *Eucalyptus citriodora* proposto por IPT (2009).

### 3.2 Simulação numérica do ensaio de tração “*off-axis*” para madeira de *Eucalyptus Citriodora* pelo método dos elementos finitos.

Nesta Seção, são apresentadas as técnicas utilizadas para a análise numérica do ensaio de tração “*off-axis*” pelo método de elementos finitos, a fim de analisar a sua aplicabilidade para determinação do módulo de cisalhamento  $G_{ij}$  nos planos de simetria  $LR$ ,  $LT$  e  $RT$  da madeira de *Eucalyptus citriodora*.

A análise consiste em duas etapas, sendo a primeira, a análise da geometria das placas de amortecimento nas extremidades do corpo de prova e a segunda, consiste na análise da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” para a madeira de *Eucalyptus citriodora* seguindo os critérios de Garrido (2004) conforme o que fora descrito na Seção 2.3.5.

A análise numérica pelo método dos elementos finitos foi realizada com o auxílio do software ANSYS ®. As constantes de engenharia para a simulação do ensaio de tração “*off-axis*” são as mesmas usadas na Seção 3.1 para o plano  $LT$ , fornecidas pela Tabela 3, determinada por Ballarin e Nogueira (2003) juntamente com as grandezas determinadas analiticamente seguindo os critérios de Bodig e Jayne (1982).

#### 3.2.1 Análise da geometria das placas de amortecimento.

Na Seção 2.3.5 verifica-se o método da aplicação do ensaio de tração “*off-axis*” e um dos problemas encontrados para a implementação do ensaio se diz respeito ao acoplamento do corpo de prova às garras da máquina de ensaio, sendo que este acoplamento gera uma sobreposição e intensificação de tensões nas extremidades do corpo de prova, que pode ser contornado com o uso de placas de amortecimento.

Foi realizada a análise da geometria das placas de amortecimento, para verificar a mais adequada para aplicação no corpo de prova. Esta análise é composta por três critérios de geometria para as placas. Primeiramente seguindo o critério proposto por Chamis e Sinclair (1977) que usou placas com um ângulo reto formado entre o eixo na extremidade da placa e o eixo longitudinal do corpo de prova. A segunda foi construída utilizando o critério de Sun e Chung (1993), cujo ângulo  $\beta$  entre as placas e o corpo de prova é determinado conforme as características do material segundo a Equação 58. E por último, o uso de placas com o ângulo  $\beta$  igual ao ângulo  $\alpha$ .

Para a modelagem usando o método dos elementos finitos para as três análises foi utilizado o elemento *SOLID 64* da biblioteca de elementos ANSYS®, pois apresenta um bom comportamento para análises estruturais, pois permite a entrada de todas as constantes de engenharia relacionadas ao estudo, assim como também permite a leitura precisa dos resultados desta simulação.

O cálculo do ângulo  $\alpha$  entre as fibras da madeira e corpo de prova, foi realizado através da relação estabelecida na Seção 2.3, sendo determinado o valor de  $\alpha=12,88^\circ$  para madeira de *Eucalyptus citriodora*. Toda a simulação feita nesta seção foi realizada para o plano LT desta espécie de madeira.

### 3.2.1.1 Geometria das placas normais ao comprimento do corpo de prova.

Para a construção do modelo para a análise pelo MEF utilizou um corpo de prova com a geometria indicada na Figura 36.

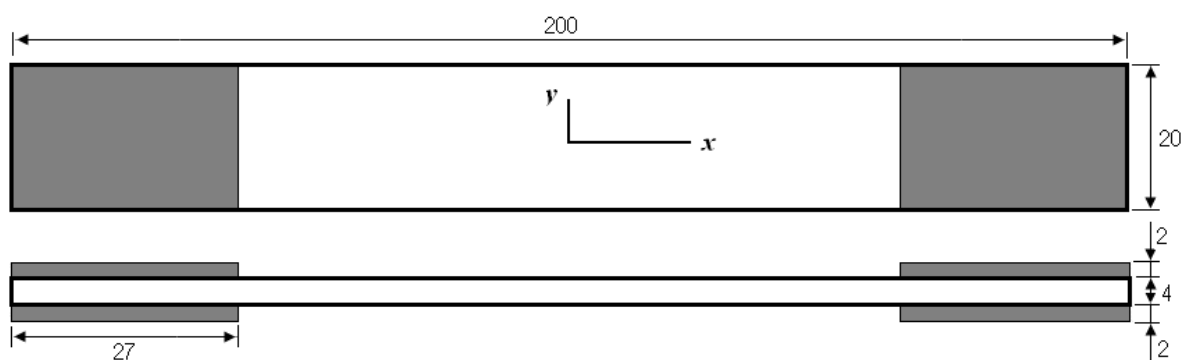


Figura 33 - Dimensões do modelo do corpo de prova “off-axis” em mm.



A análise de convergência, foi realizada seguindo o critério de estabilização dos dados normalizados ( $x_{ij}^{centro} / x_{ij}^{máximo}$ ), das grandezas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  no centro do corpo de prova.

As condições de contorno impostas ao modelo correspondem à fixação da extremidade direita nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , e na extremidade esquerda a fixação de  $Y$ ,  $Z$  e o deslocamento em  $X$  de 0,5 mm para a esquerda.

### 3.2.1.2 Geometria das placas segundo o critério de Sun e Chung (1993).

Seguindo o critério de construção das placas de amortecimento proposta por Sun e Chung (1993) descrito na Seção 2.3, se faz necessário a utilização da Equação 51 para a determinação do ângulo  $\beta$  formado entre o comprimento do corpo de prova e as placas.

O ângulo determinado para o material madeira de *Eucalyptus citriodora* foi  $\beta=26,7^\circ$ . A geometria do corpo de prova utilizado para a construção do modelo é mostrado na Figura 34.

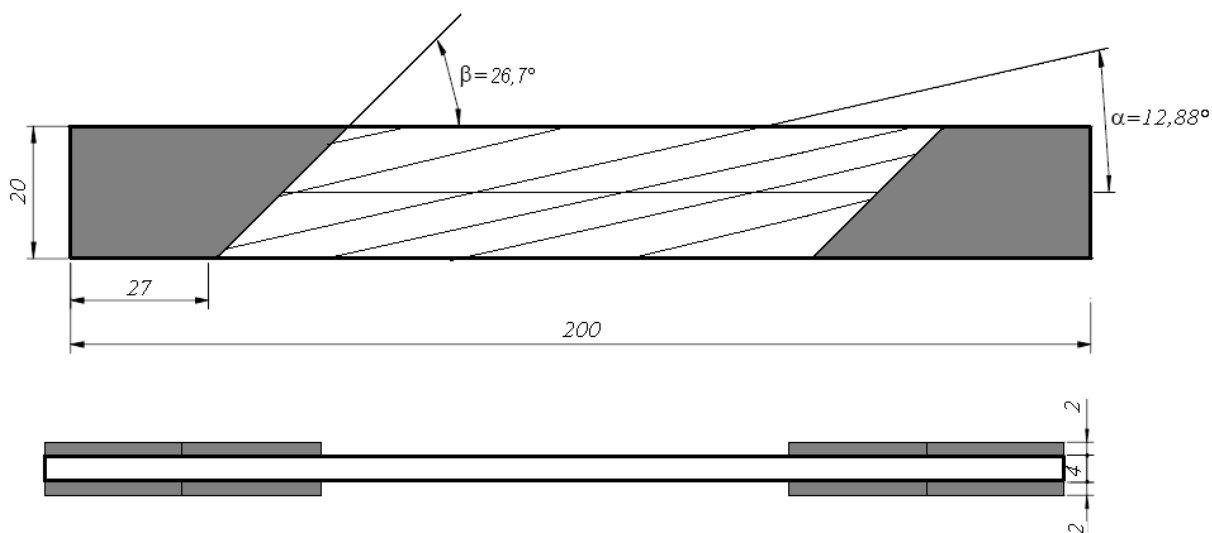


Figura 34 - Dimensões do modelo do corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas segundo o critério de Sun e Chung (1993).

Para a determinação da malha foi realizada uma análise de convergência seguindo o critério de estabilização dos dados normalizados ( $x_{ij}^{centro} / x_{ij}^{máximo}$ ), das grandezas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  no centro do corpo de prova.

As condições de contorno impostas ao modelo correspondem à fixação da extremidade direita nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , e na extremidade esquerda a fixação de  $Y$ ,  $Z$  e o deslocamento em  $X$  de 0,5 mm para a esquerda.

### 3.2.1.3 Geometria das placas oblíquas com o ângulo $\beta$ igual ao ângulo $\alpha$ .

Para esta análise o corpo de prova é dotado de placas oblíquas cujo ângulo  $\beta = \alpha$ . O ângulo  $\alpha$  anteriormente calculado, corresponde ao valor  $\alpha = 12,88^\circ$ . As geometrias do corpo de prova assim como as suas dimensões estão representadas na Figura 35.

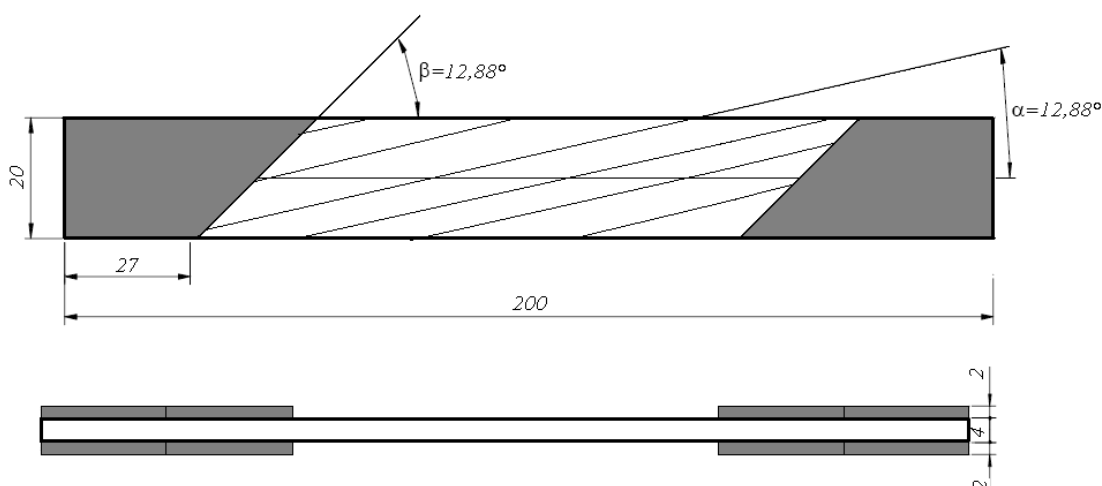


Figura 35 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova “off-axis” com placas oblíquas com o ângulo  $\beta = \alpha$ .

Para a determinação da malha foi realizada uma análise de convergência seguindo o critério de estabilização dos dados normalizados ( $x_{ij}^{centro} / x_{ij}^{máximo}$ ), das grandezas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  no centro do corpo de prova.

As condições de contorno impostas ao modelo correspondem à fixação da extremidade direita nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , e na extremidade esquerda a fixação de  $Y$ ,  $Z$  e o deslocamento em  $X$  de 0,5 mm para a esquerda.

### 3.3 Análise pelo MEF da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” para madeira de *Eucalyptus citriodora*.

Para a análise da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” pelo MEF para a determinação do módulo de cisalhamento  $G_{LR}$  em madeira de *Eucalyptus citriodora*, foram utilizados os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  das placas de amortecimento, presentes na Tabela 4, calculados a partir das relações estabelecidas na Seção 3.1, utilizando as constantes de engenharia determinadas por Ballarin e Nogueira (2003), presentes na Tabela 3 da Seção 3.1.

Tabela 4 – Ângulos utilizados nos referentes planos do ensaio.

Plano $LR$		Plano $LT$		Plano $RT$	
$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
12°	32°	12,88°	26,7°	32,95°	90°

A geometria e dimensões do modelo do corpo de prova para o ensaio de tração “*off-axis*” nos planos de simetria  $LR$  e  $LT$  são as presentes na Figura 36 definidas por Garrido (2004).

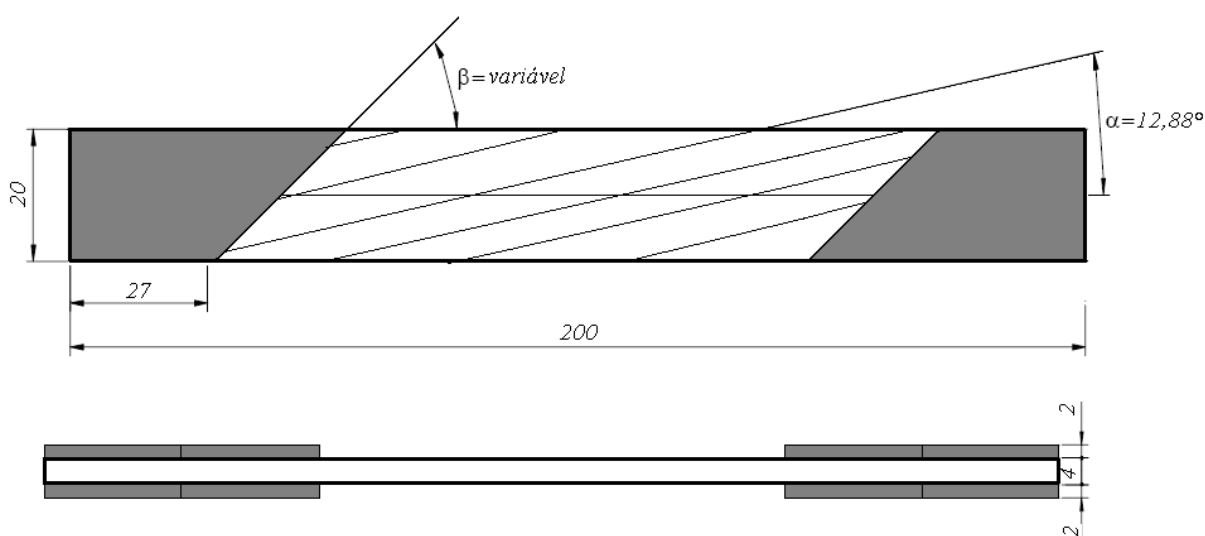


Figura 36 - Geometria do modelo do corpo de prova “*off-axis*” para os planos de simetria  $LR$  e  $LT$  em mm, adaptado de Garrido (2004).

Para o corpo de prova no plano de simetria  $RT$ , Garrido (2003) propõe o uso de um corpo de prova com as dimensões reduzidas em relação aos planos de simetria  $LR$  e  $LT$ , observado na Figura 37. As dimensões deste corpo de prova são reduzidas devido ao diâmetro de uma tora de qualquer espécie de madeira não alcançar em geral dimensões maiores que 300 mm e além disso, por causa da configuração dos anéis de crescimento da madeira.

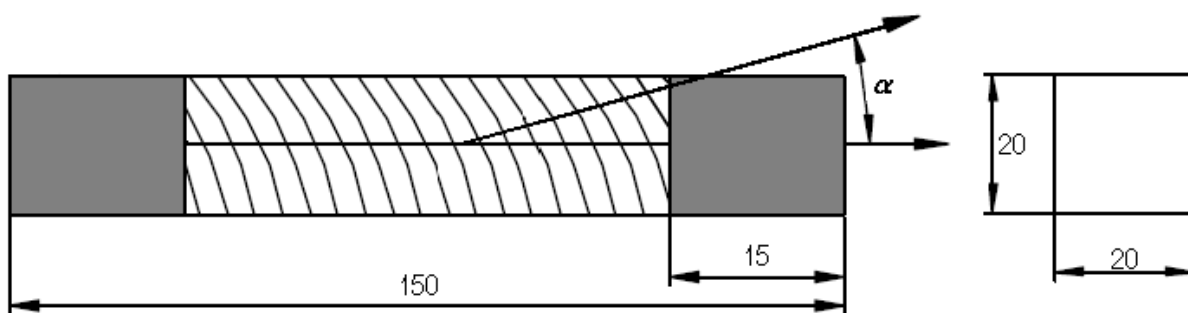


Figura 37 - Dimensões do modelo do corpo de prova do ensaio de tração “off-axis” no plano de simetria  $RT$  em mm, adaptado de Garrido (2004).

Para a modelagem pelo MEF nos planos  $LR$ ,  $LT$  e  $RT$ , foi usado o elemento bidimensional,  $PLANE 182$ , da biblioteca de elementos ANSYS®, por apresentar bom comportamento para análises estruturais, pois permite a entrada de todas as constantes de engenharia relacionadas ao estudo, assim como também permite a leitura precisa dos resultados desta simulação.

As condições de contorno impostas ao modelo correspondem à fixação da extremidade direita nas direções  $X$  e  $Y$ , e na extremidade esquerda a fixação de  $Y$  e o deslocamento em  $X$  de 0,5 mm para a esquerda.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises discutidas anteriormente, correspondente à verificação dos campos de tensão gerados no corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997), análise da geometria das placas oblíquas aplicadas no corpo de prova, a análise da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” à madeira de *Eucalyptus citriodora*.

### 4.1 Simulação numérica do ensaio de resistência ao cisalhamento proposto pela NBR 7190 (1997) pelo método dos elementos finitos.

Os gráficos das Figuras 38 e 39 mostram os valores obtidos pela análise de convergência da malha utilizando a relação  $x_{ij}^{centro}/x_{ij}^{máximo}$  em função ao número de nós gerados.

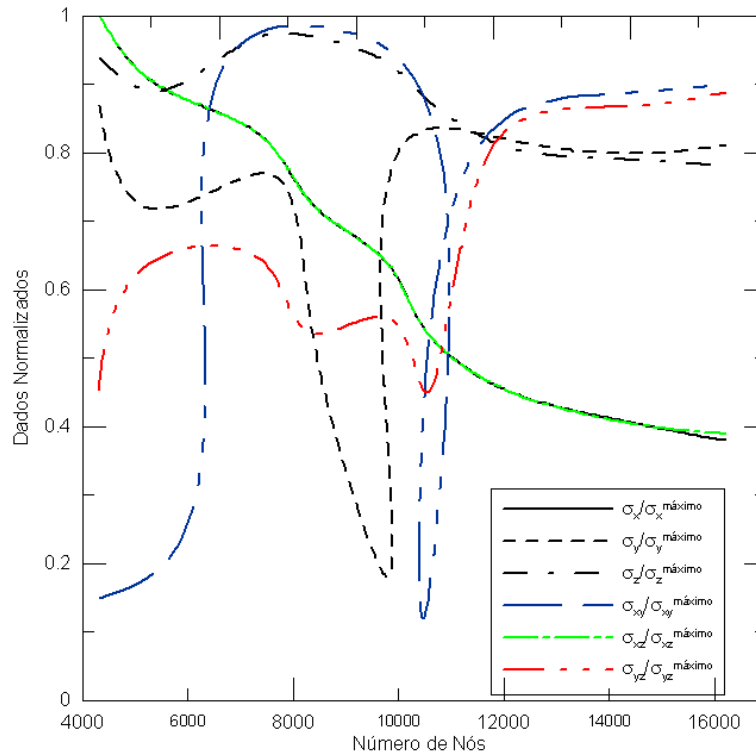


Figura 38 - Análise de convergência das malhas do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997) pela estabilização das tensões  $\sigma_{ij}$ .

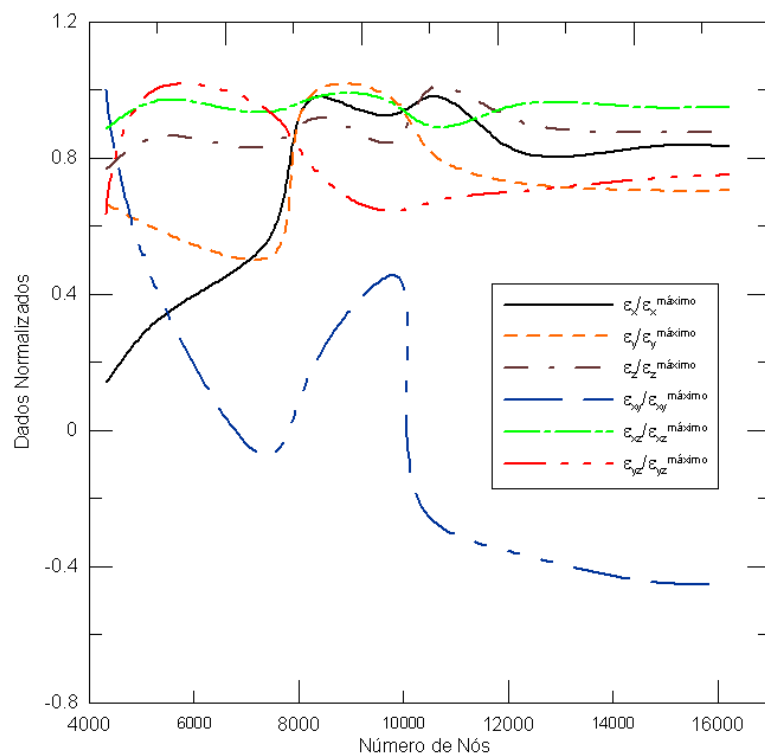


Figura 39 - Análise de convergência das malhas do corpo de prova proposto pela NBR 7190 (1997) pela estabilização das deformações  $\varepsilon_{ij}$ .

A malha determinada pela análise de convergência para a simulação numérica é constituída por 14813 nós e 9759 elementos e pode ser observada na Figura 40.

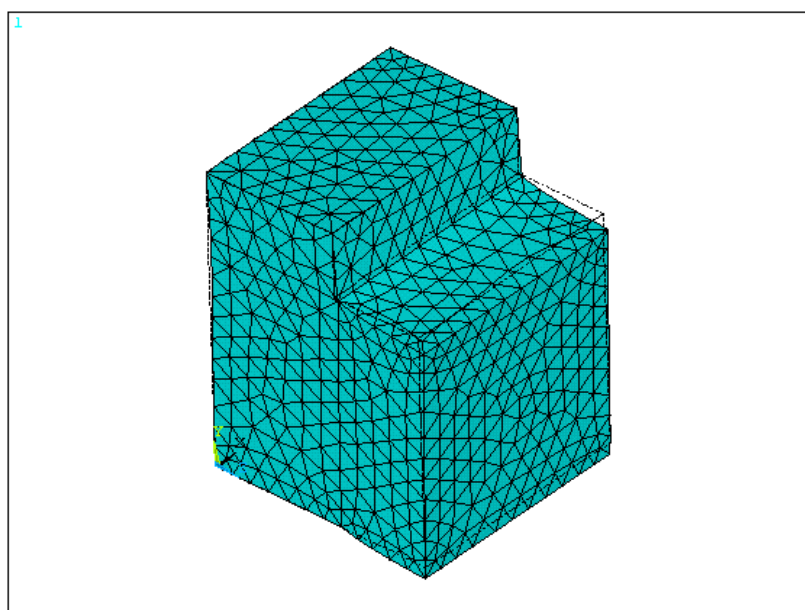


Figura 40 - Malha do corpo de prova sugerida pela NBR 7190 (1997)

Para verificação dos campos de tensão  $\sigma_x$  gerados no corpo de prova, é apresentada a Figura 41 composta do modelo gerado pelo MEF, acompanhado dos gráficos das tensões normalizadas ao longo das linhas representativas da área cisalhante.

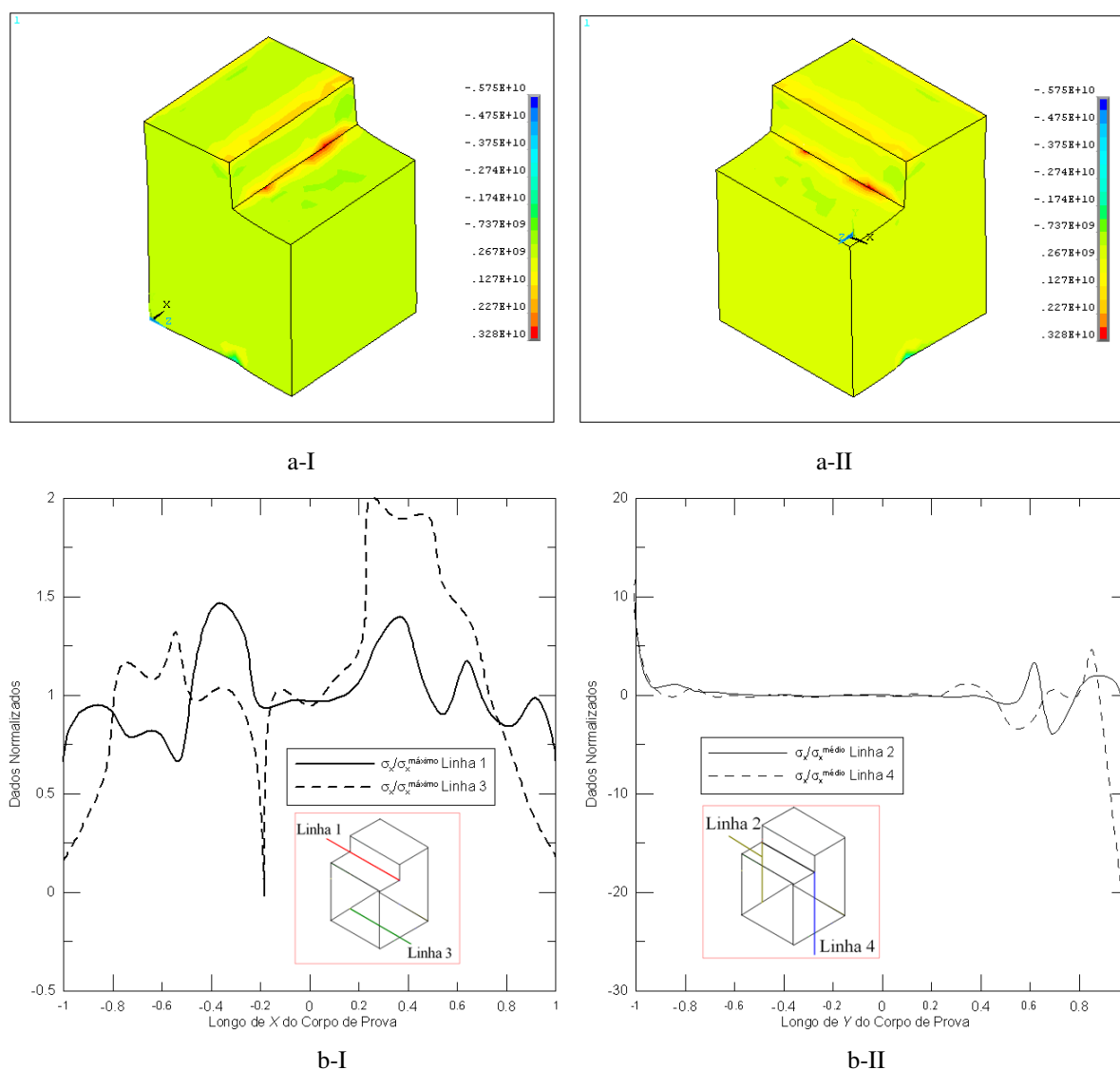


Figura 41 – (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_x$  com unidade de medida em Pa. (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_x$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_x$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4.

Verifica-se através da Figura 41, que não ocorre um estado de tensão homogêneo para as tensões  $\sigma_x$ , pois ao longo da linha de referência 1 e 3 as tensões não demonstram homogeneidade. Nas linhas 2 e 4 a homogeneização das tensões ocorre em uma região consideravelmente grande, mas nas suas extremidades, verifica-se uma

acentuação das tensões  $\sigma_x$  não desejável, devido às deformações  $\varepsilon_x$  no corpo de prova não serem uniformes, como mostradas na Figura 42.

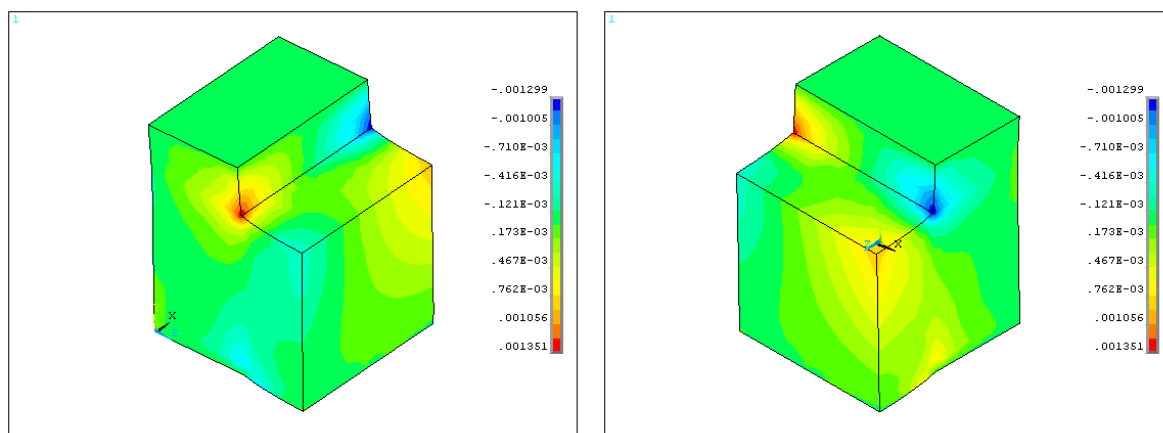


Figura 42 – Campos de deformações  $\varepsilon_x$  no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m.

A Figura 43, mostra os campos de deformação  $\varepsilon_y$  no modelo do corpo de prova. Como é possível observar, as deformações  $\varepsilon_y$  ocorridas na região da área cisalhante, podem ser consideradas uniformes em uma grande região. Porém quando tomado como referência as linhas 2 e 4, verifica-se que os campos de deformação próximos à base inferior de apoio se mostram sem uniformidade.

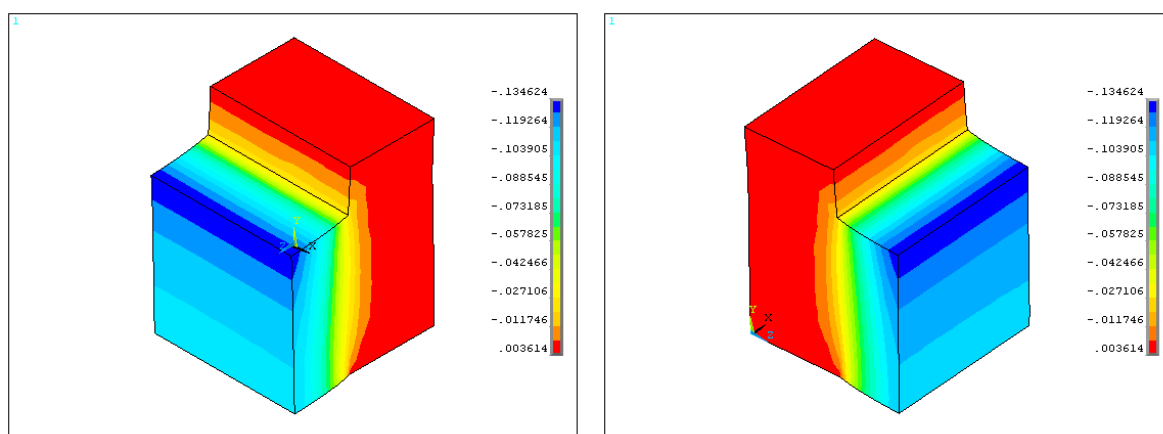


Figura 43 - Campos de deformações  $\varepsilon_y$  no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m.

A figura 44, mostra os campos de tensões  $\sigma_y$  obtidos pela simulação numérica por MEF, juntamente com os gráficos das tensões  $\sigma_y$  normalizadas ao longo das linhas de referência da área cisalhante.



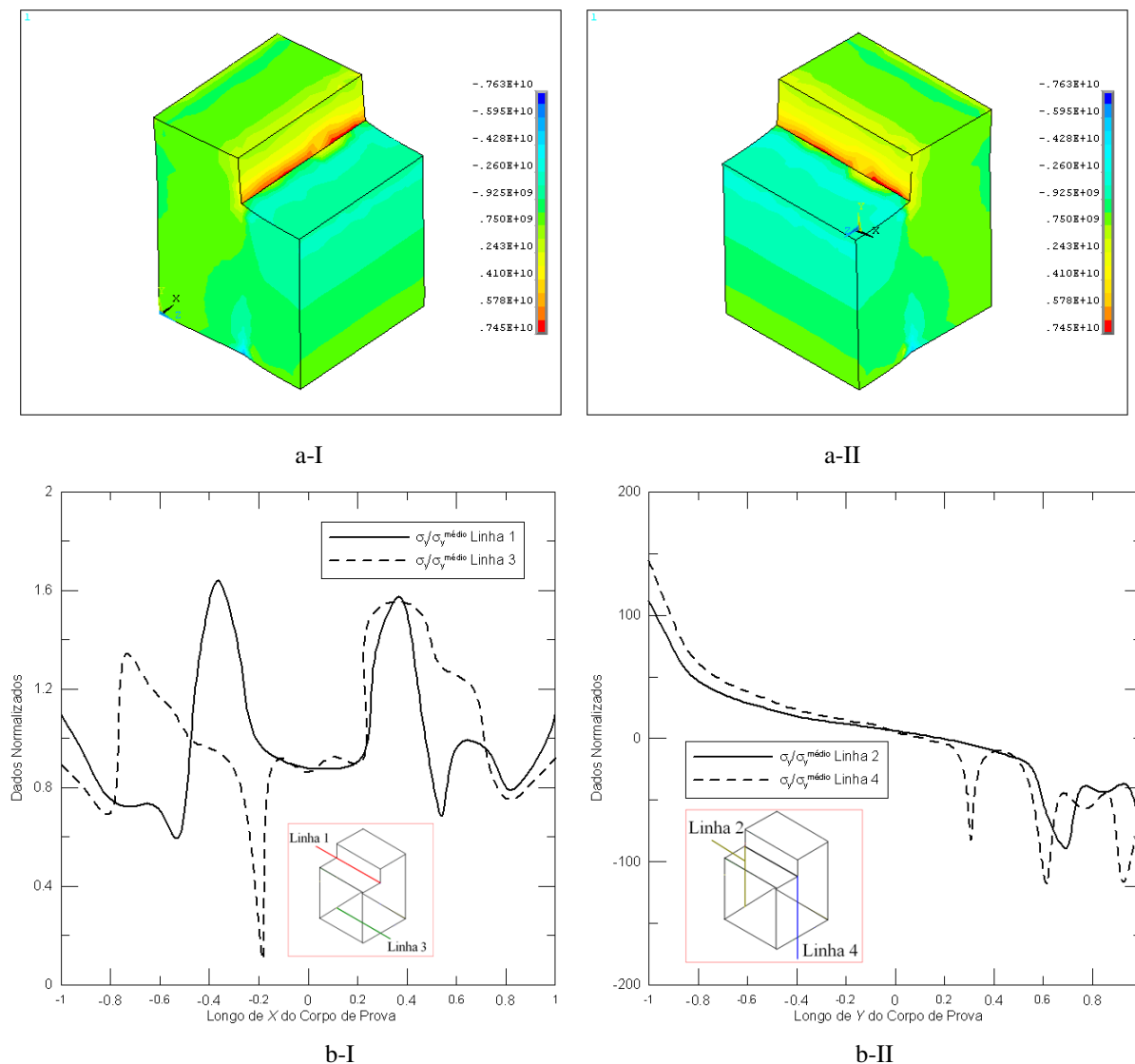


Figura 44 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_y$  com unidade de medida em Pa; (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_y$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_y$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4.

Os campos de tensão  $\sigma_y$ , não podem ser considerados homogêneos, é possível verificar através da figura 43 a não existência de uma região com tensões  $\sigma_y$  homogêneas ao longo das linhas de referência 1, 2 3 e 4 devidas às deformações encontradas não serem de natureza uniforme. Nas linhas 2 e 4 verifica-se a acentuação do módulo das tensões  $\sigma_y$  nas extremidades do corpo de prova.

A figura 46, mostra os campos de tensão  $\sigma_z$ , obtidos no modelo do corpo de provas, juntamente com o gráfico das tensões  $\sigma_z$  normalizadas ao longo das linhas de referência em torno da área cisalhante.

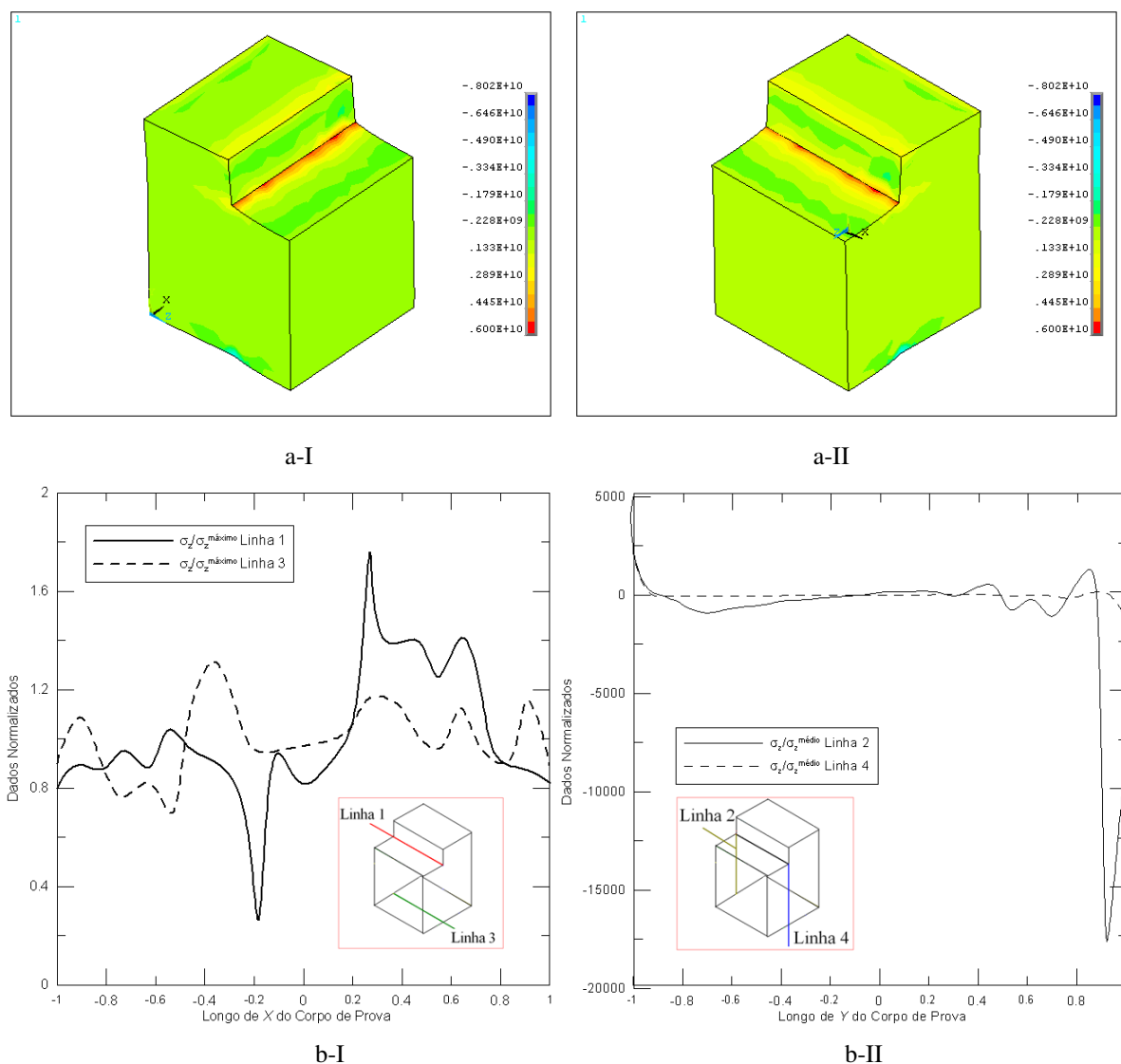


Figura 45 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_z$ ; (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_z$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_z$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa).

Os campos de tensão  $\sigma_z$ , presentes na Figura 46, não podem ser considerados homogêneos. Nas linhas 1 e 3 de referência da área cisalhante as tensões não são homogêneas por toda a extensão destas linhas, devida à deformação não uniforme do corpo de prova. Nas linhas de referência 2 e 4, as tensões  $\sigma_z$ , podem ser consideradas homogêneas em uma grande extensão destas linhas, porém ocorre a intensificação das tensões nas extremidades do corpo de prova, devida à deformação decorrente, especialmente pelo efeito de Poisson encontrado nas junções das linhas 1 e 2, 2 e 4, 3 e 4, e 3 e 2.

As deformações  $\varepsilon_z$ , podem ser observadas na Figura 47.

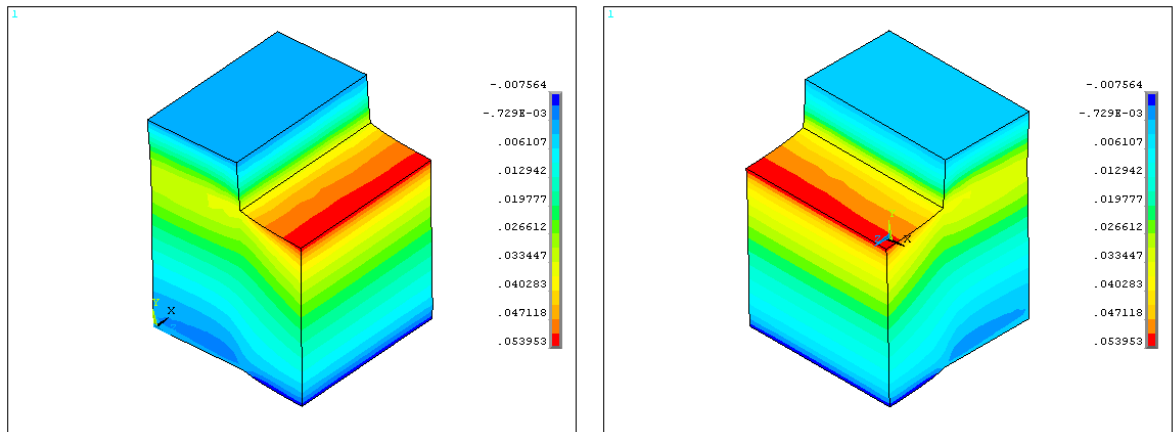
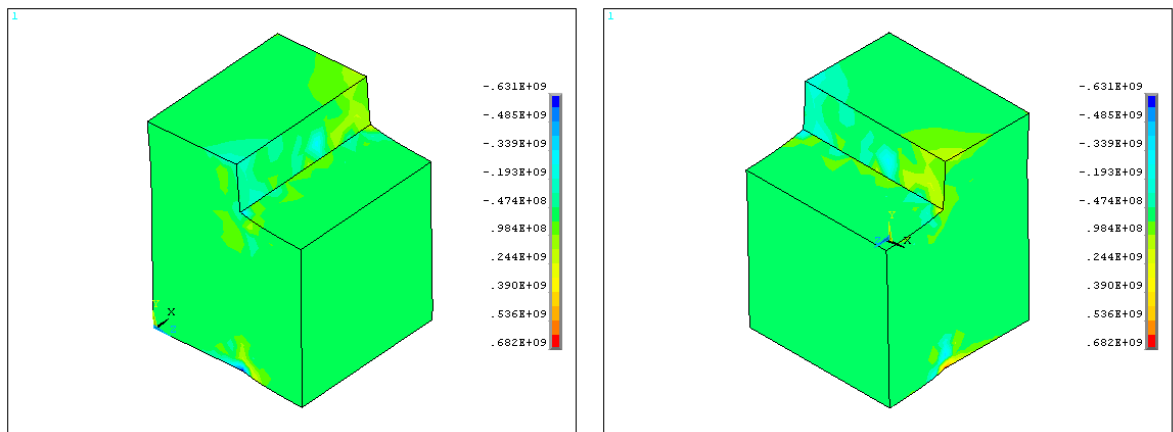
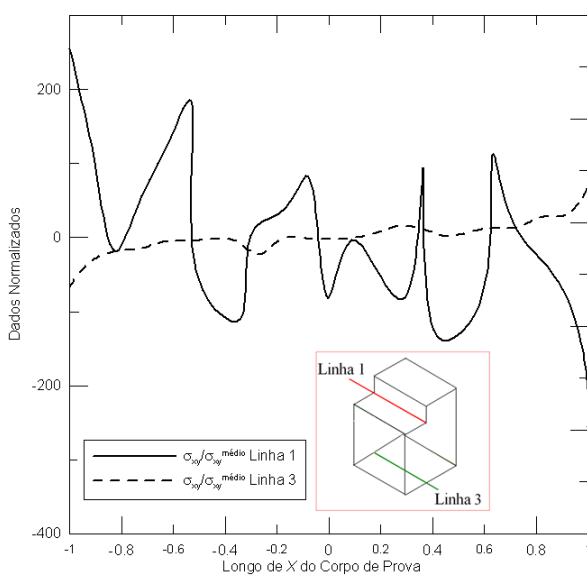


Figura 46 - Campos de deformações  $\epsilon_z$  no modelo do corpo de provas proposto pela NBR 7190 (1997) com unidade de medida em m.

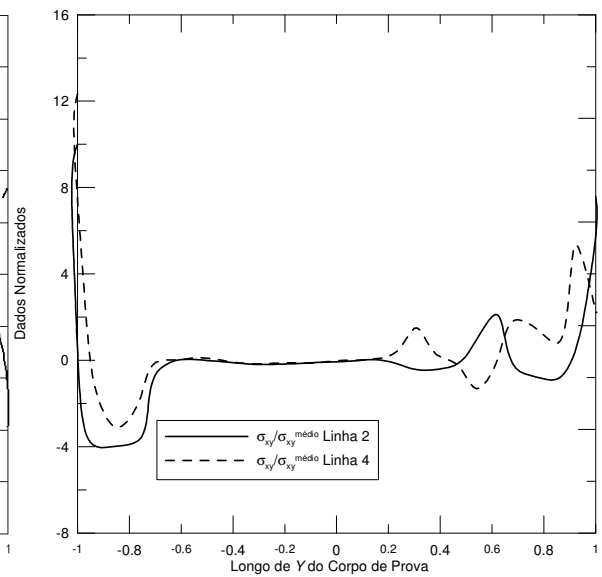


a-I

a-II



b-I



b-II

Figura 47 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_{xy}$ ; (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_{xy}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_{xy}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa).

Quando analisadas as Figuras 47, 48 e 49, correspondentes aos campos das tensões  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$  e  $\sigma_{yz}$ , observa-se uma tendência de comportamento próximo dos campos de tensões de  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , sendo estes campos de tensões sem uniformidade e com acentuação em seu módulo nas extremidades das linhas de referência. Esta intensificação das tensões pode ser atribuída às deformações não uniformes ocorridas no corpo de prova.

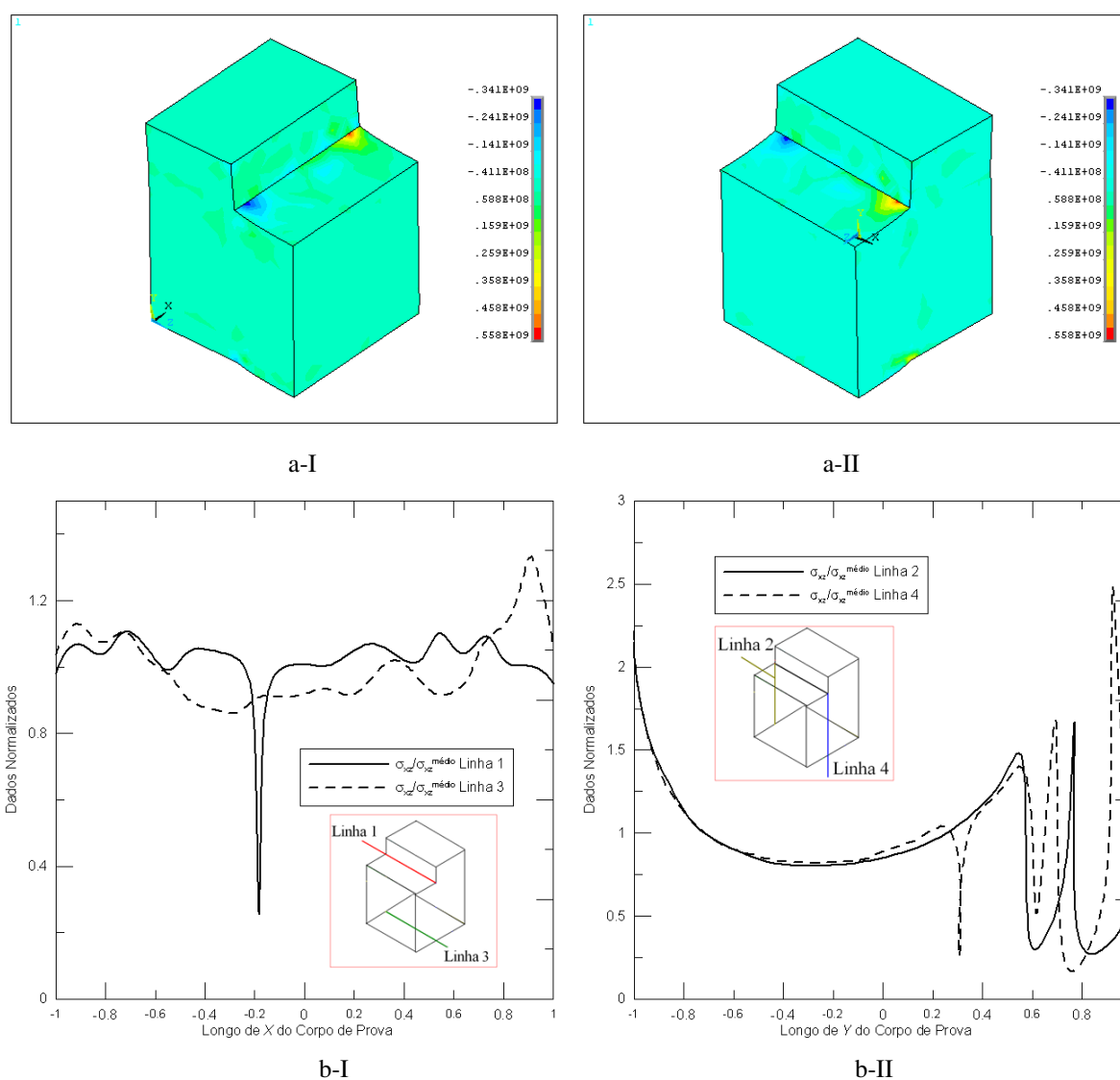


Figura 48 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_{xz}$ ; (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_{xz}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_{xz}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa).

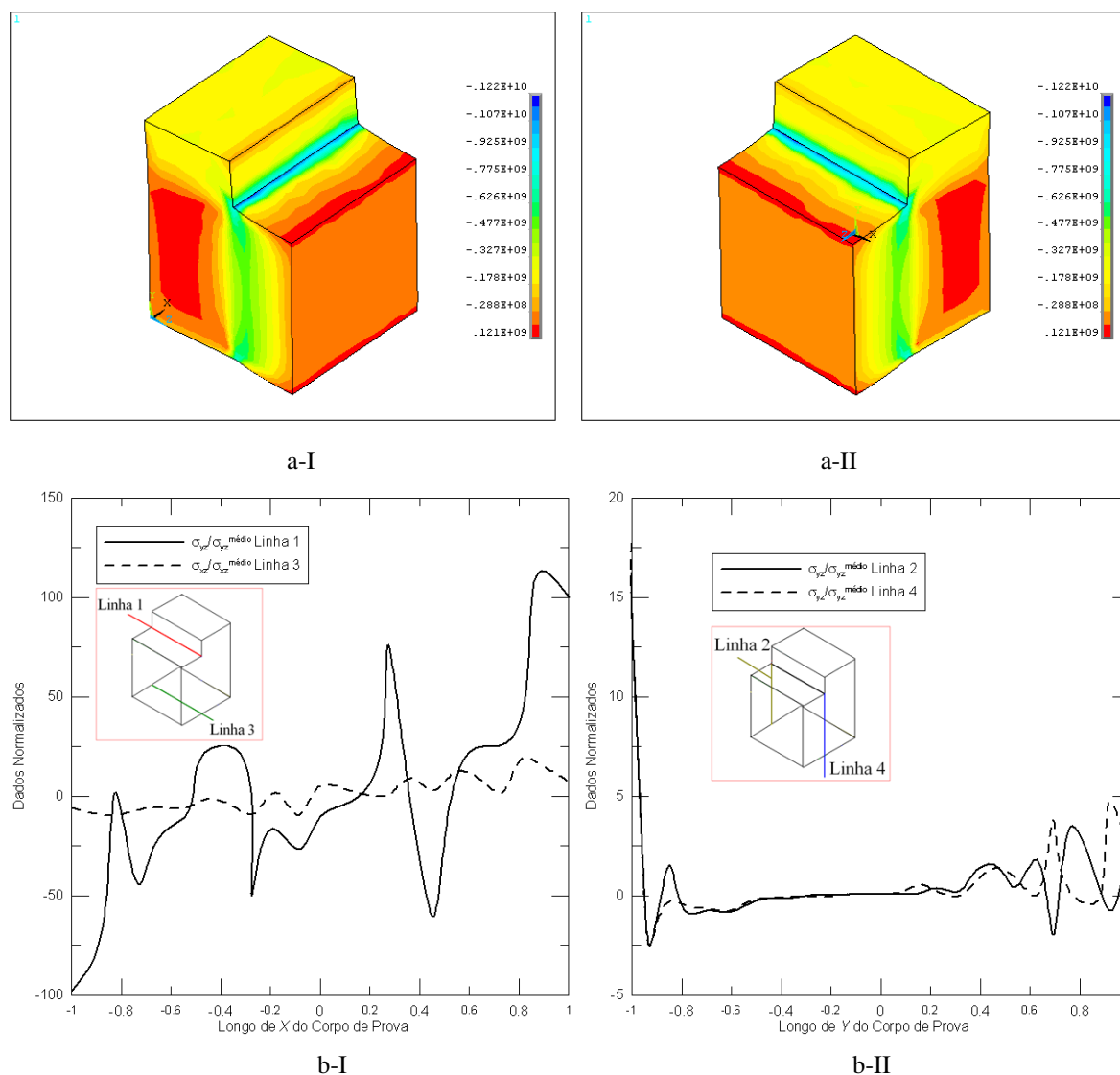


Figura 49 - (a-I) e (a-II) Campos de tensão  $\sigma_{yz}$ ; (b-I) Gráfico das tensões  $\sigma_{yz}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 1 e 3; (b-II) Gráfico das tensões  $\sigma_{yz}$  normalizadas ao longo das linhas de referência 2 e 4. (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa).

Com a observação dos dados obtidos pela análise por MEF do ensaio para a determinação do comportamento ao cisalhamento da madeira proposta pela NBR 7190 (1997), pode se verificar, que os campos das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$  e  $\sigma_{yz}$  não se apresentam homogêneos, assim como os campos de deformação  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$ , não são encontrados uniformes, concluindo então, que não é encontrado na região cisalhante  $A_v$  um estado de tensão homogêneo, podendo então afirmar, que os dados obtidos por este ensaio ao pressuporem um estado de tensão que não ocorre, não são precisos, pelo fato do cisalhamento, acompanhado do rompimento do corpo de prova ocorrer primeiro em regiões isoladas.

## 4.2 Simulação numérica do ensaio de tração “*off-axis*” para madeira de *Eucalyptus Citriodora* pelo método dos elementos finitos.

### 4.2.1 Análise da geometria das placas de amortecimento.

Nesta Seção serão verificados os resultados obtidos na simulação numérica pelo método dos elementos finitos para geometria das placas de amortecimento, inicialmente para o critério de Chamis e Sinclair (1977), em seguida para o critério de Sun e Chung (1993) e por último a geometria das placas com o ângulo  $\beta$  igual ao ângulo  $\alpha$ .

#### 4.2.1.1 Geometria das placas normais ao comprimento do corpo de prova.

A malha que demonstrou ser a adequada para o modelo é constituída por 1083 nós e 1501 elementos, determinada através de análise de convergência dos dados, presente na Figura 50.

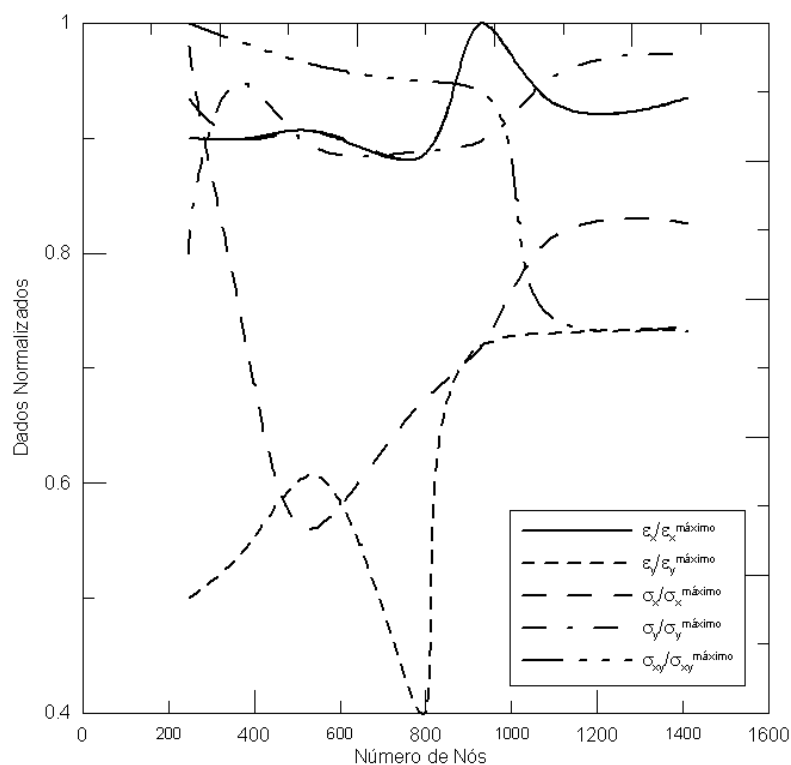


Figura 50- Análise de convergência das malhas para corpo de prova “*off-axis*” com placas normais ao seu comprimento.

A Figura 51 mostra os campos de deslocamentos  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ , e os campos de tensão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ .

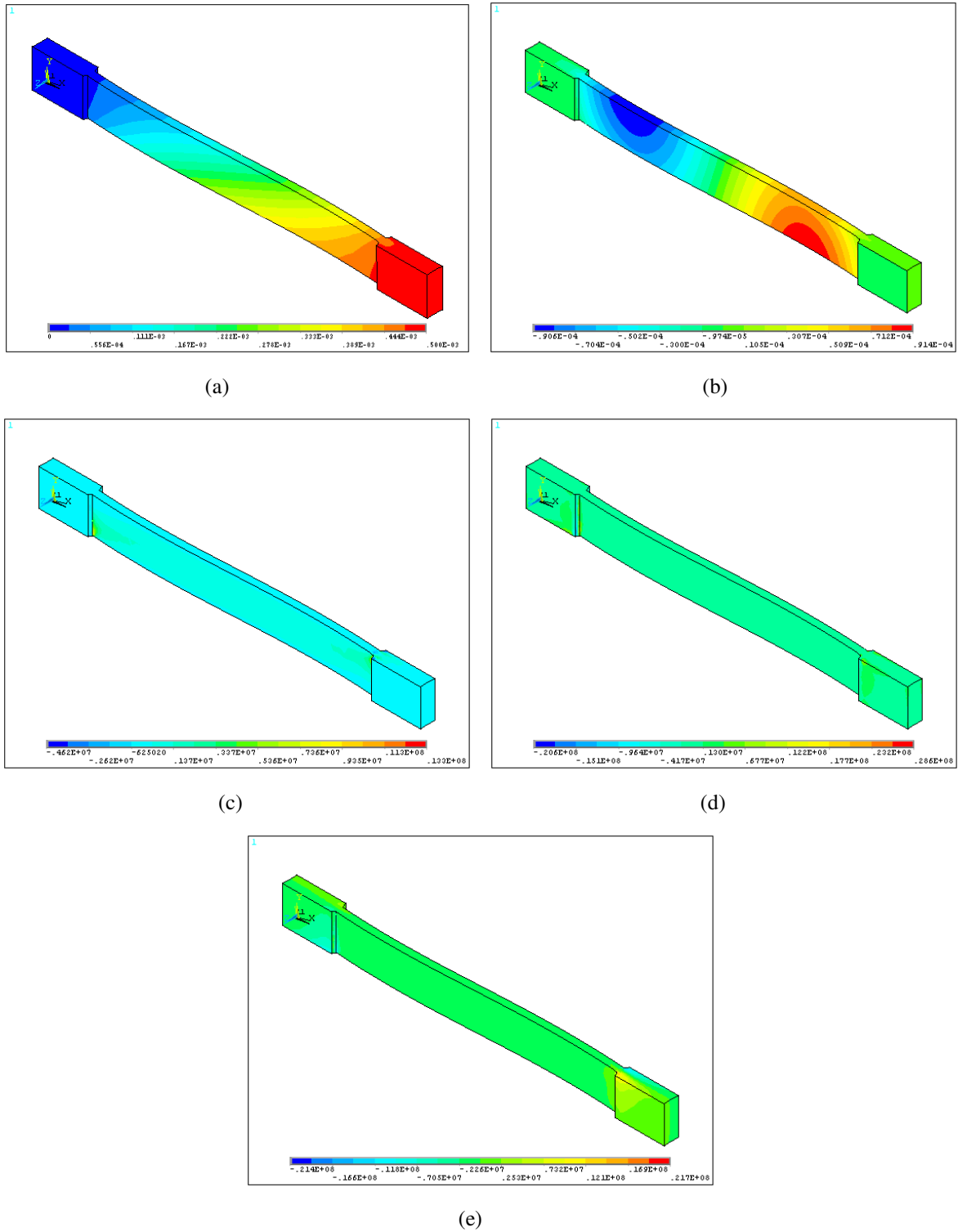


Figura 51 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas normais à direção do comprimento. (a) tem-se os campos de deformações  $\varepsilon_x$ ; (b) os campos de deformações  $\varepsilon_y$ ; (c) os campos de tensões  $\sigma_x$ ; (d) os campos de tensões  $\sigma_y$  e (e) campos de tensões  $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa e de  $\varepsilon$  em m).

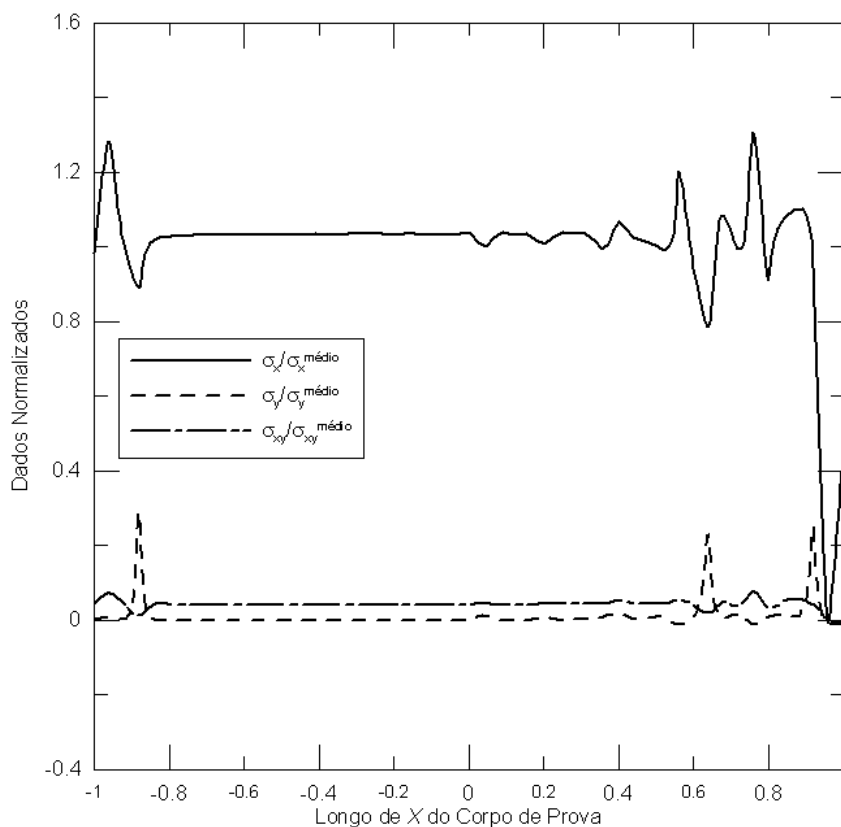


Figura 52 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas de amortecimento normais à direção do comprimento.

Observa-se na Figura 51 (a) que os campos de deformações  $\varepsilon_x$  não possuem uma distribuição regular assim como na Figura 51 (b) as deformações  $\varepsilon_y$  não se distribuem homogeneamente ao longo da direção X, pois apresenta uma distribuição típica de uma deformação em “S”. Este efeito é indesejado, pois proporciona deformações não uniformes na região central do corpo de prova.

Nas Figuras 51 (c), 51 (d) e 51 (d) são mostrados os campos de tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ , que juntamente com a análise do gráfico da Figura 52, fica evidente que a distribuição das tensões não produz um campo de tensões uniaxiais e uniformes. Nestas Figuras observa-se também que na região das placas de amortecimento existe uma distribuição irregular das tensões que podem provocar o rompimento do corpo de prova fora da região central.



#### 4.2.1.2 Geometria das placas segundo o critério de Sun e Chung (1993).

A malha determina através de análise de convergência com o critério de estabilização dos dados normalizados, é composta por 2919 nós e 2302 elementos.

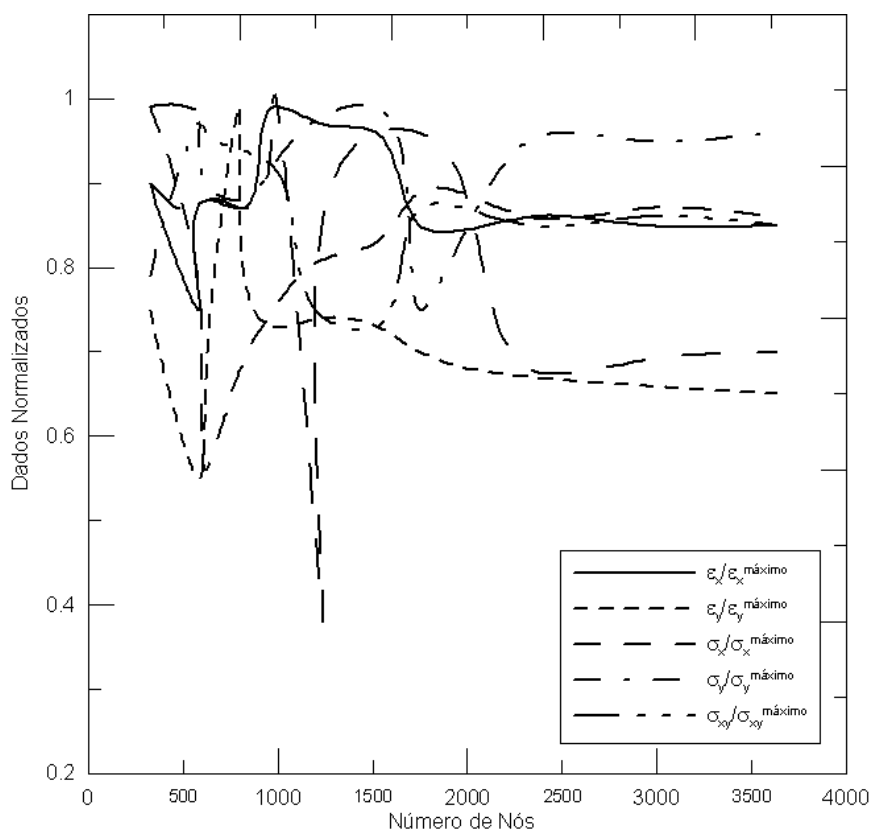


Figura 53 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova “*off-axis*” com placas oblíquas segundo o critério de Sun e Chung (1993)

A Figura 60 mostra os campos de deslocamentos  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ , e os campos de tensão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ .

Pode ser observado na Figura 54 (a) os campos de deformações  $\varepsilon_x$  consideravelmente paralelos à bolacha de amortecimento, e na Figura 54 (b) as deformações  $\varepsilon_y$  com linhas paralelas entre si, demonstrando o efeito desejado com o uso das placas oblíquas, pois proporcionou na região central do corpo de prova uma região com deformações uniformes.

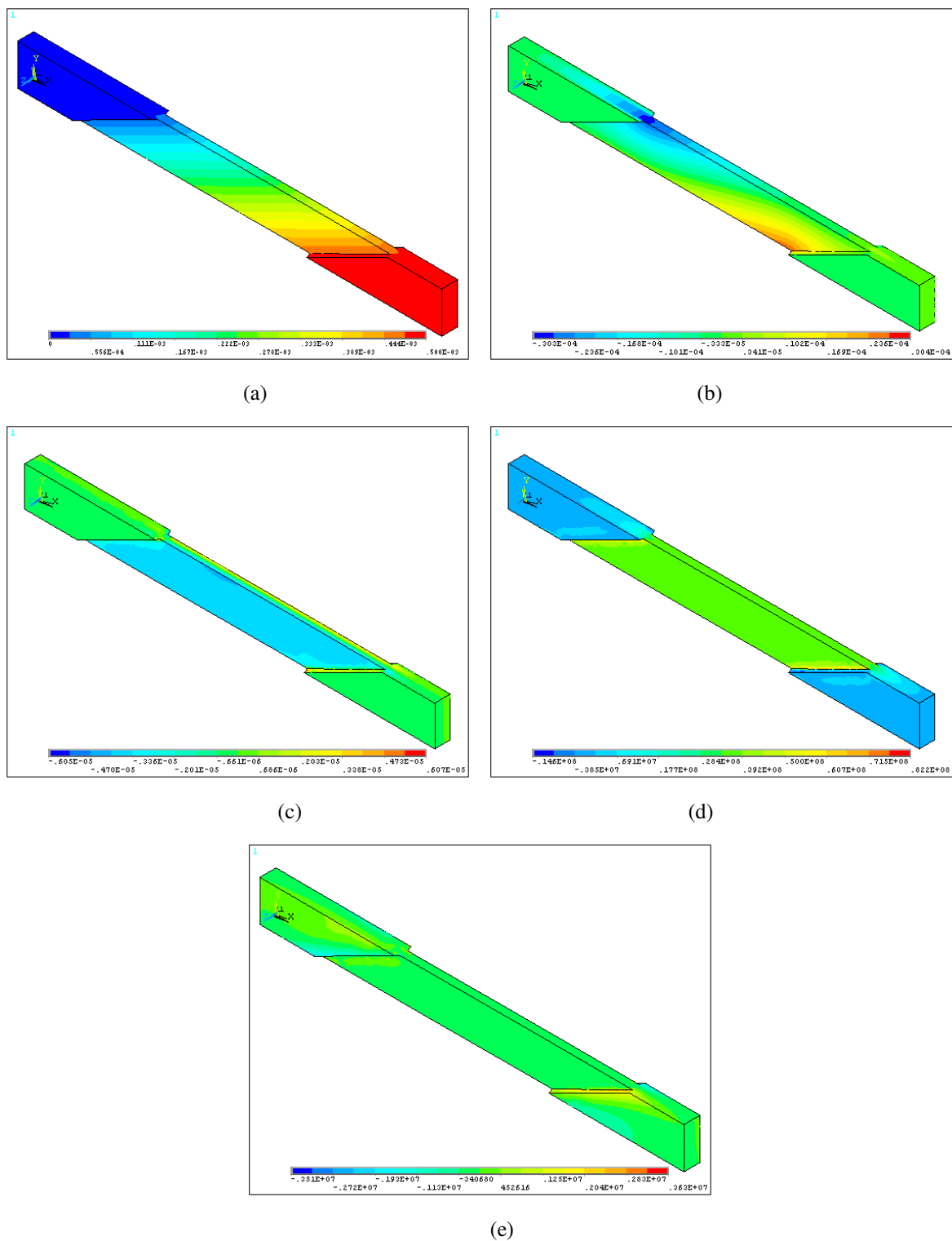


Figura 54 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas oblíquas proposta por Sun e Chung (1993). (a) campos de deformações  $\varepsilon_x$ ; (b) campos de deformações  $\varepsilon_y$ ; (c) campos de tensões  $\sigma_x$ ; (d) campos de tensões  $\sigma_y$  e (e) campos de tensões  $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa e de  $\varepsilon$  em m).

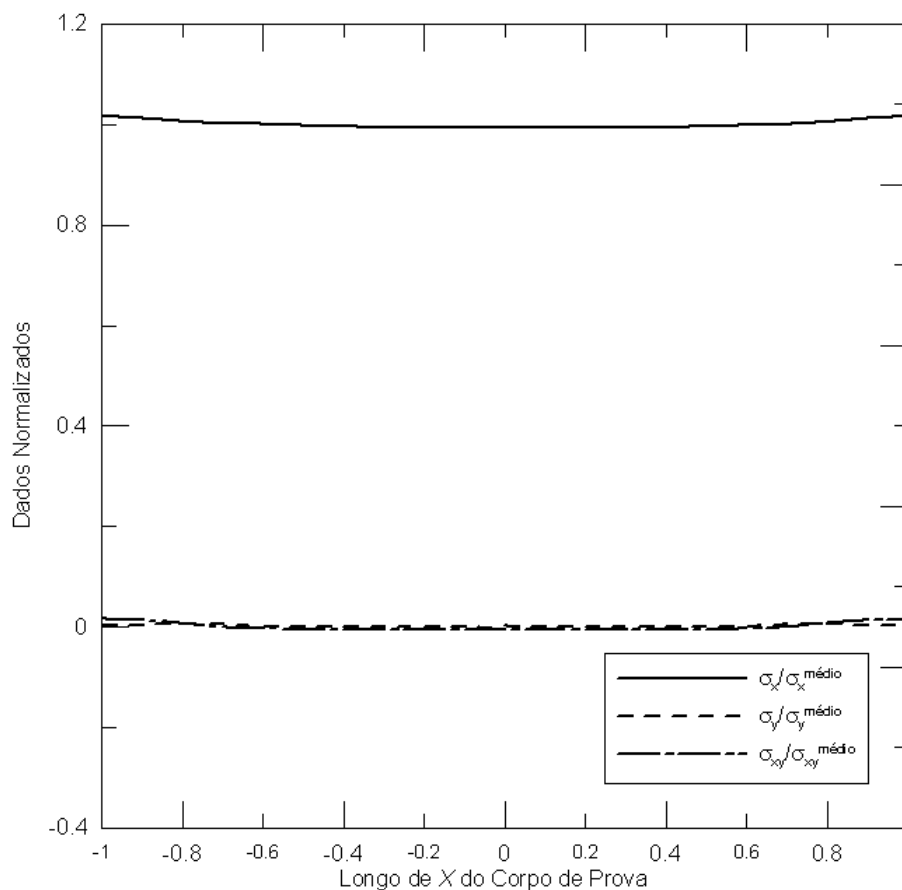


Figura 55 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas oblíquas segundo o critério de Sun et al. (1993).

Nas Figuras 54 (c), (d) e (e) estão representados os campos de tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ , respectivamente; é possível notar um estado de tensões uniforme e uniaxial em praticamente toda a região do corpo de prova, exceto em uma pequena região do corpo de prova uma pequena variação, que pode ser verificado pelo gráfico na Figura 55, das tensões normalizadas ao longo da direção X na região central do corpo de prova, verificando o efeito desejado no ensaio de tração “*off-axis*”.

#### 4.2.1.3 Geometria das placas oblíquas com o ângulo $\beta$ igual ao ângulo $\alpha$ .

A Figura 56 mostra a análise de convergência realizada para a determinação da malha ideal para o corpo de prova. A malha selecionada para o trabalho é composta por 1803 nós e 1023 elementos.

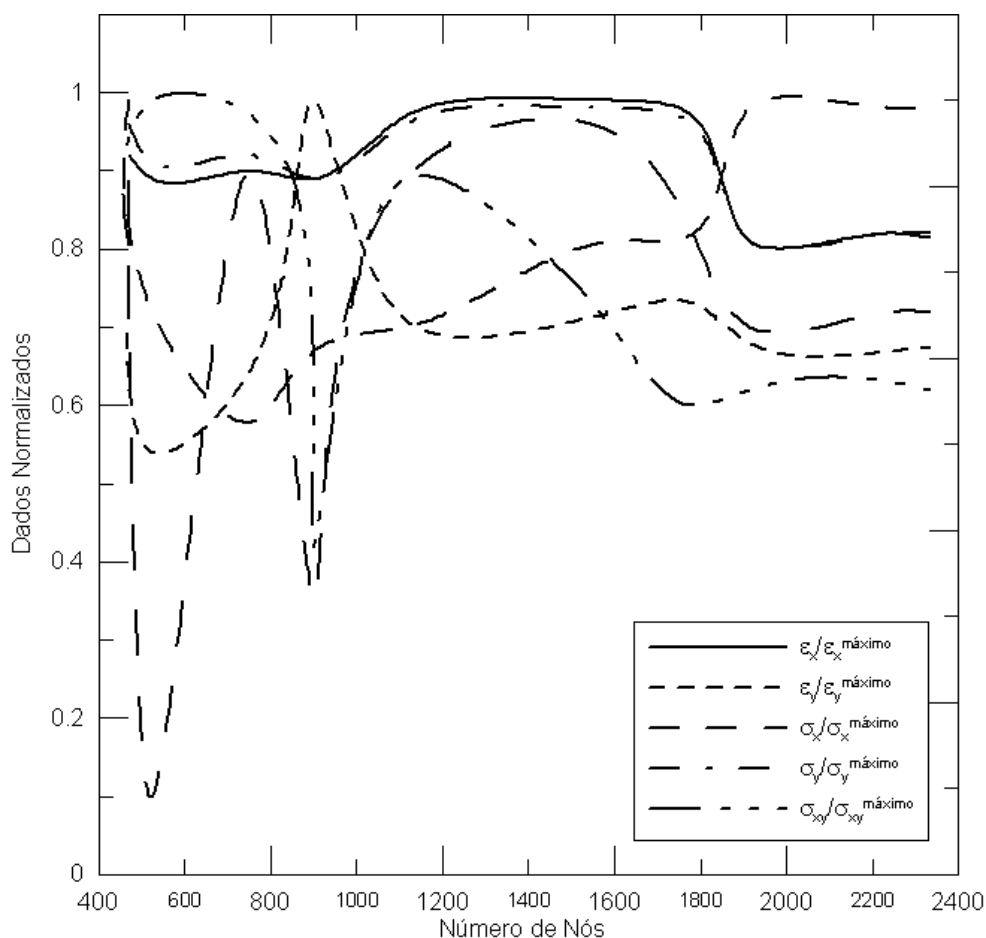


Figura 56 - Análise de convergência das malhas para o corpo de prova "off-axis" com placas oblíquas com o ângulo  $\beta = \alpha$ .

Na Figura 57-a pode-se observar os campos de deformações  $\epsilon_x$  sem a presença de uma simetria regular assim como na Figura 57-b as deformações  $\epsilon_y$  sem o evidenciamento de um paralelismo na direção  $X$ , como é de se esperar do ensaio, não proporcionando a uniformidade pretendida pelo ensaio de tração "off-axis".

Observa-se que nas Figuras 64-c, 64-d e 64-e os campos de tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ , juntamente com a análise do gráfico da Figura 65, evidenciada a uma distribuição de tensões no corpo de prova não uniforme, nem uniaxiais, como o pretendido. Também pode ser observado na região das placas de amortecimento uma acentuação no módulo das tensões, podendo provocar o rompimento do corpo de prova fora da região central, na qual está localizada o extensômetro colado para efetuar as medidas dos deslocamentos.

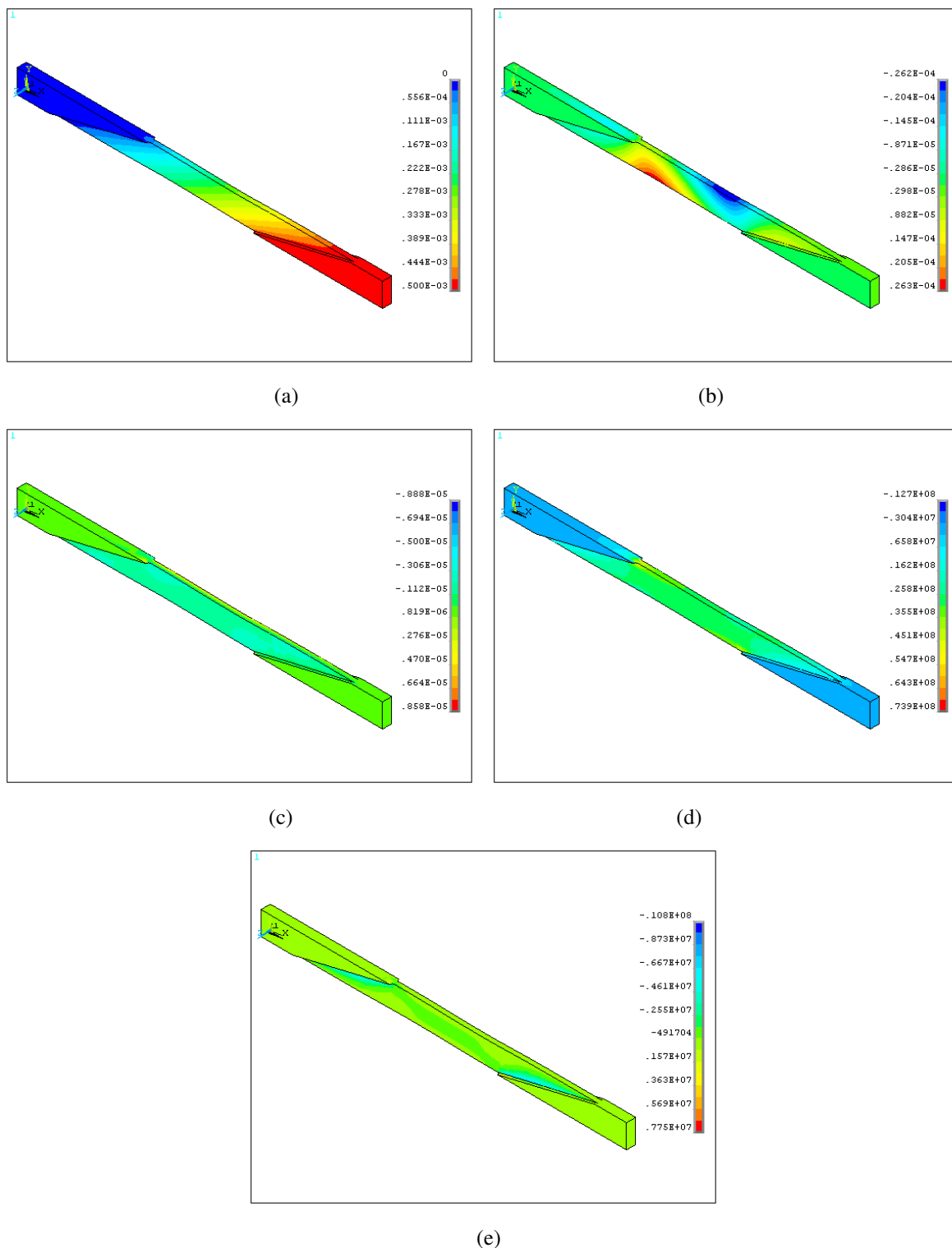


Figura 57 - Corpos de prova “off-axis” com o uso de placas oblíquas com o ângulo  $\beta$  igual ao ângulo  $\alpha$ . (a) campos de deformações  $\varepsilon_x$ ; (b) campos de deformações  $\varepsilon_y$ ; (c) campos de tensões  $\sigma_x$ ; (d) campos de tensões  $\sigma_y$  e (e) campos de tensões  $\sigma_{xy}$ . (Unidade de medida de  $\sigma$  em Pa e de  $\varepsilon$  em m).

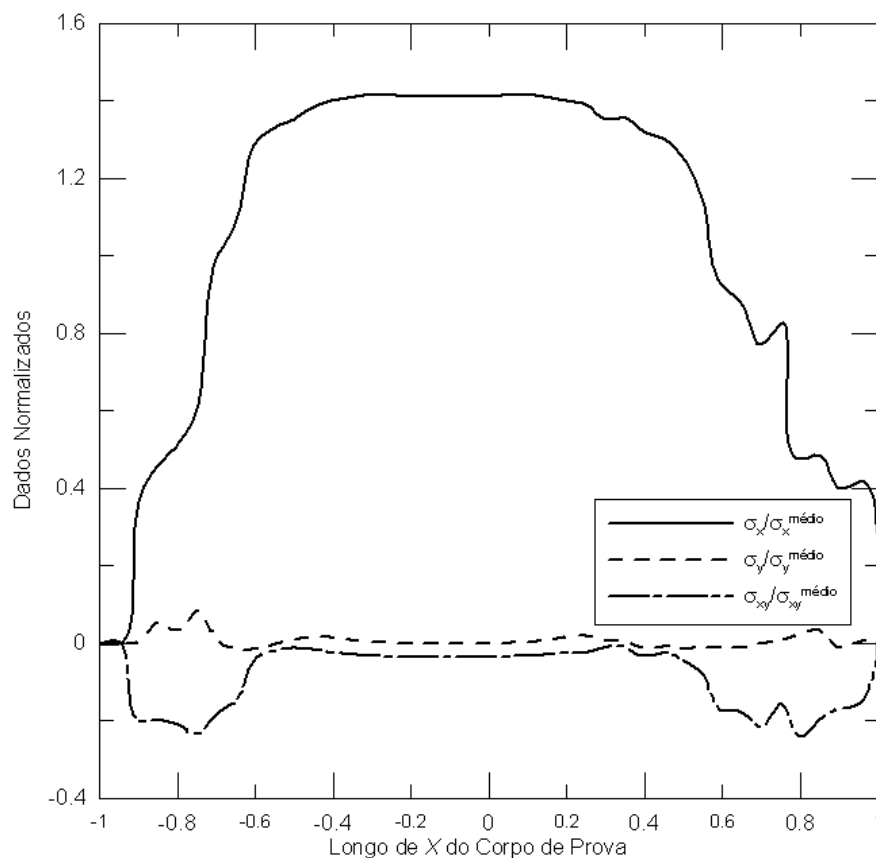


Figura 58 - Distribuição das tensões ao longo da direção X na região central do corpo de prova com o uso de placas de amortecimento oblíquas com o ângulo  $\beta$  igual ao ângulo  $\alpha$ .

#### 4.2.2 Análise pelo MEF da aplicabilidade do ensaio de tração “*off-axis*” para madeira de *Eucalyptus citriodora*.

A malha escolhida para cada uma das simulações foi considerada após uma análise de convergência no qual para o plano *LR* foi utilizada uma malha com 2232 nós, para o plano *LT* foi considerada uma malha com 1662 nós e para o plano *RT* 1649 nós.

##### 4.2.2.1 Análise dos campos de tensão e deformação no plano *LR*.

A Figura 59 ilustra a malha do corpo de prova do ensaio “*off-axis*” no plano de ortotropia *LR*.

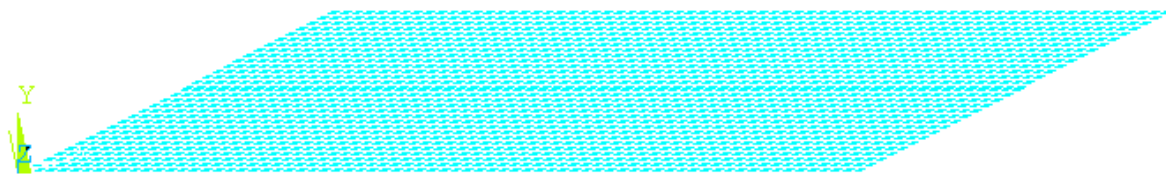


Figura 59 - Malha do corpo de prova “*off-axis*” no plano *LR*.

Os campos de deformação  $\varepsilon_x$  mostrados na Figura 69 são paralelos à inclinação  $\beta$  das placas oblíquas, demonstrando ter atingido o efeito esperado, com o seu uso. Já na Figura 70 são mostrados os campos de deformação  $\varepsilon_y$ , no qual se pode observar o paralelismo entre as linhas e campos de deformações iguais.

Pode-se concluir então, que existe em uma região considerável do corpo de prova a presença de deformações uniforme, principalmente no centro do corpo de prova, região esta onde o extensômetro é colado em uma análise em campo.

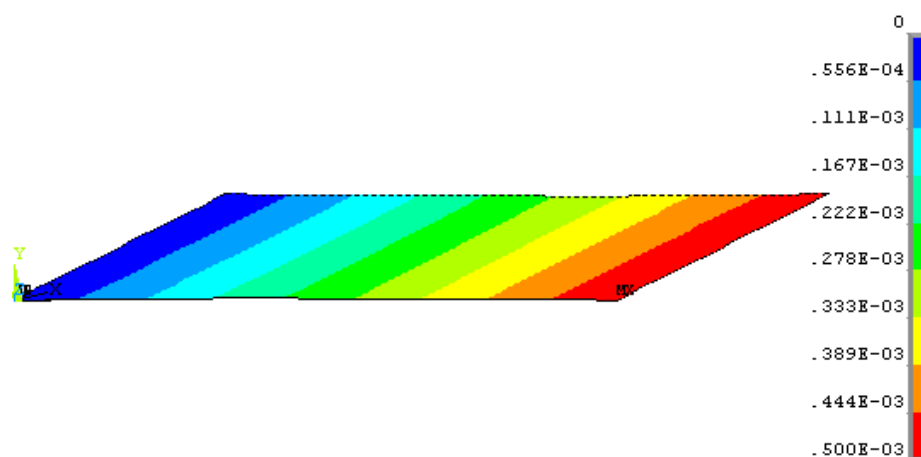


Figura 60 - Campo de deformações  $\varepsilon_x$  em metros, no corpo de prova no plano *LR*.

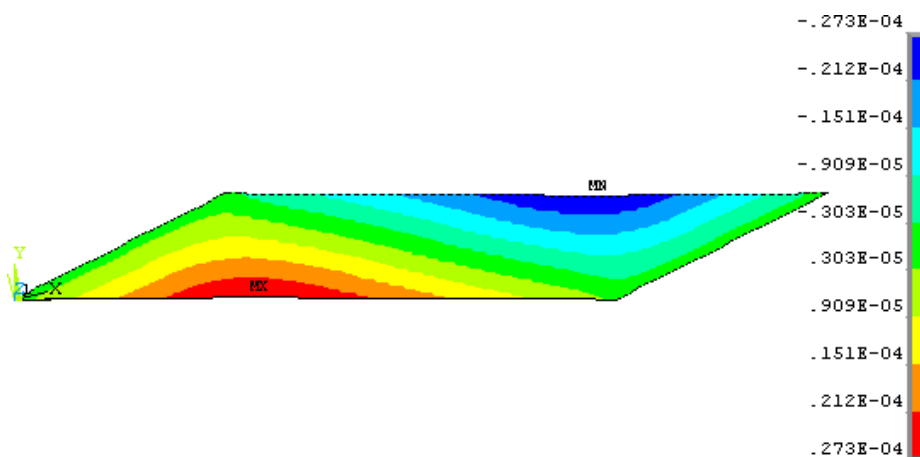


Figura 61 - Campo de deformações  $\varepsilon_y$  em metros, no corpo de prova no plano *LR*.

Nas Figuras 62, 63 e 64, é possível verificar os campos de tensões uniaxiais e homogêneos,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  praticamente em toda a extensão dos corpos de prova do modelo do corpo de prova no plano  $LR$ . Nas regiões das extremidades próximas às placas oblíquas é encontrada a intensificação das tensões, provavelmente pelas condições de contorno muito rígidas impostas ao modelo do corpo de prova. O símbolo MX corresponde ao valor máximo obtido e MN ao valor mínimo.

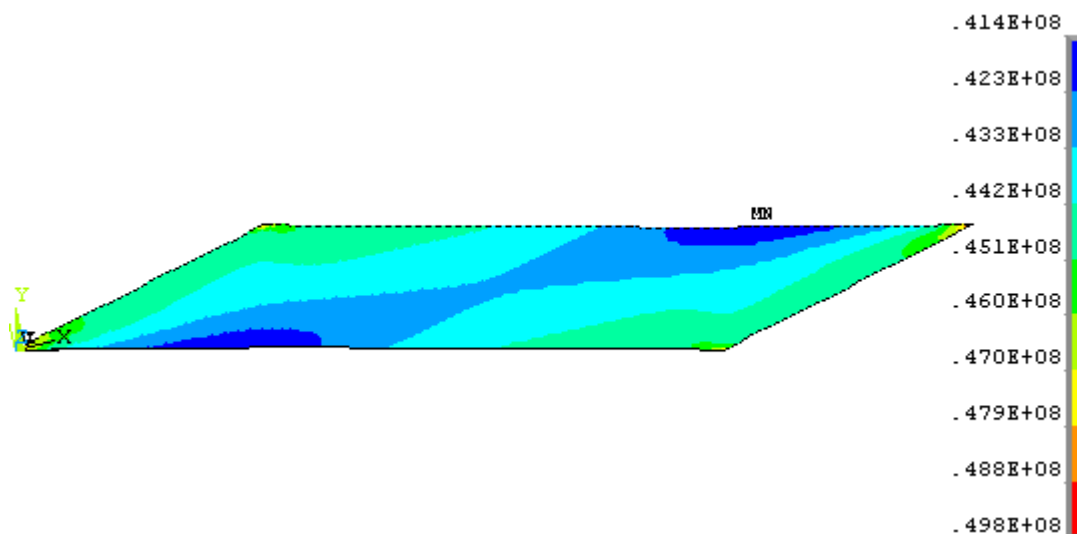


Figura 62 - Campo de tensões  $\sigma_x$  em Pascal, do corpo de prova no plano  $LR$ .

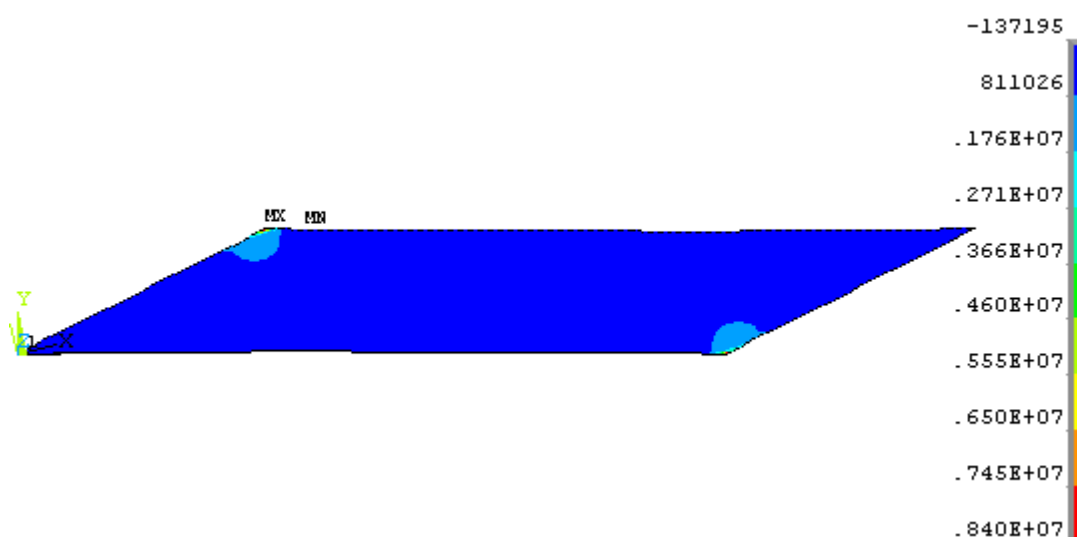


Figura 63 - Campo de tensões  $\sigma_x$  em Pascal, do modelo do corpo de prova  $LR$ .



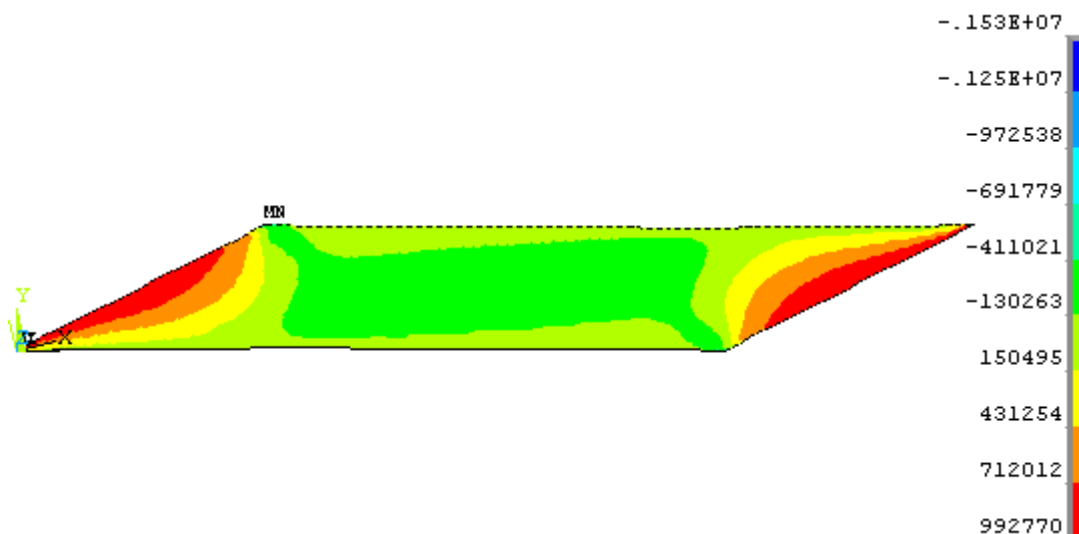


Figura 64 - Campo de tensões  $\sigma_y$ , em Pascal, do corpo de prova no plano  $LR$ .

A homogeneidade das tensões ao longo do corpo de prova, podem ser verificada com maior clareza e confirmada nos gráficos das Figuras 65 e 66. No gráfico da Figura 65, estão representadas as tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  normalizadas, apresentadas ao longo da região central horizontal do corpo de prova.

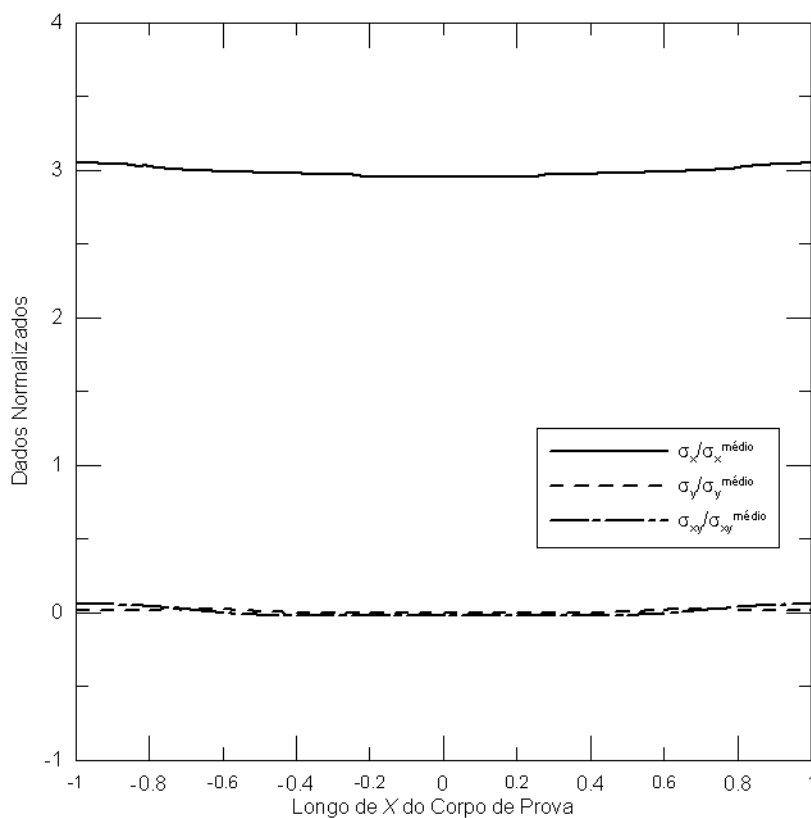


Figura 65 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central horizontal do corpo de prova no plano  $LR$ .

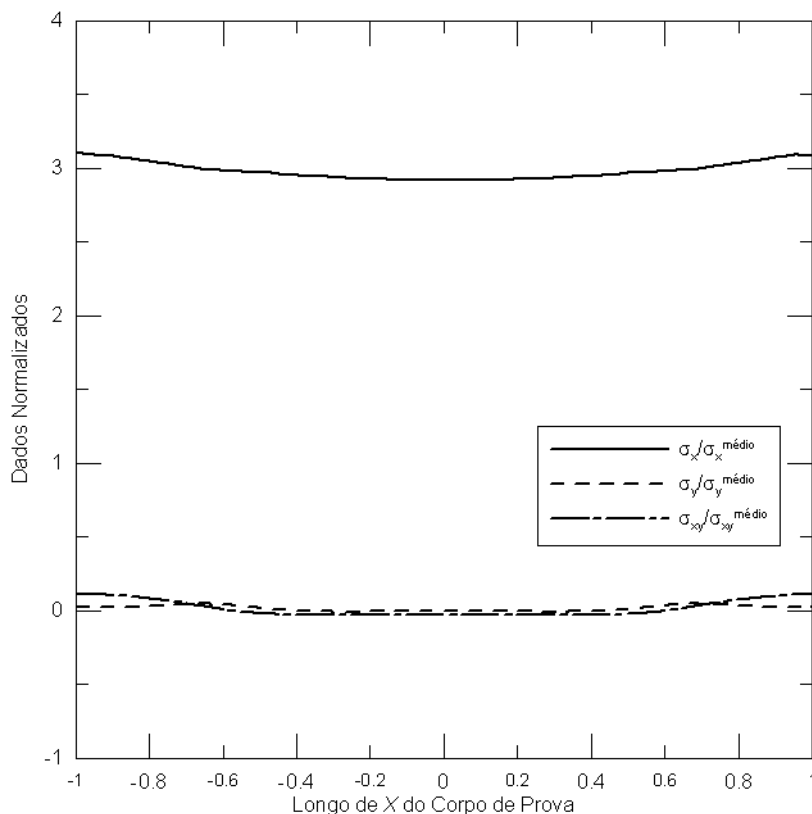


Figura 66 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central vertical do corpo de prova no plano  $LR$ .

#### 4.2.2.2 Análise dos campos de tensão deformação do corpo de prova no plano $LT$ .

A malha gerada para a análise pelo MEF do corpo de prova “*off-axis*” para o plano de ortotropia  $LT$ , pode ser verificado na Figura 67.

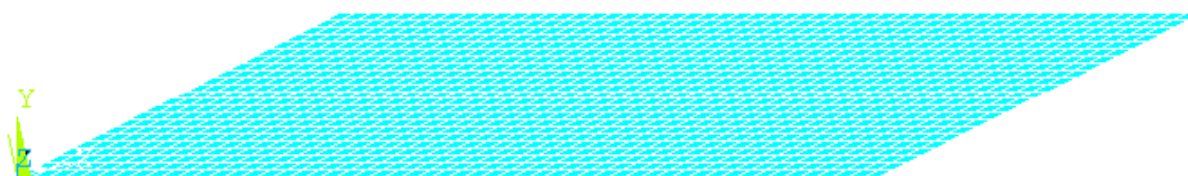


Figura 67 - Malha do modelo do corpo de prova “*off-axis*” no plano  $LT$ .

Os campos de deformação  $\varepsilon_x$  mostrados na Figura 68 são paralelos à inclinação  $\beta$  das placas oblíquas, demonstrando ter atingido o efeito esperado, com o seu uso, assim como os campos de deformações  $\varepsilon_y$  mostrados na Figura 78, na qual se pode observar o paralelismo entre as linhas e campos de deformações iguais. Pode-se então afirmar que o efeito encontrado no plano  $LT$  é o mesmo no plano  $LR$ , concluindo, que no corpo

de prova do plano  $LT$  também existe uma região considerável com a presença de deformações uniformes, principalmente no centro do corpo de prova, região onde o extensômetro é colado em uma análise em campo.

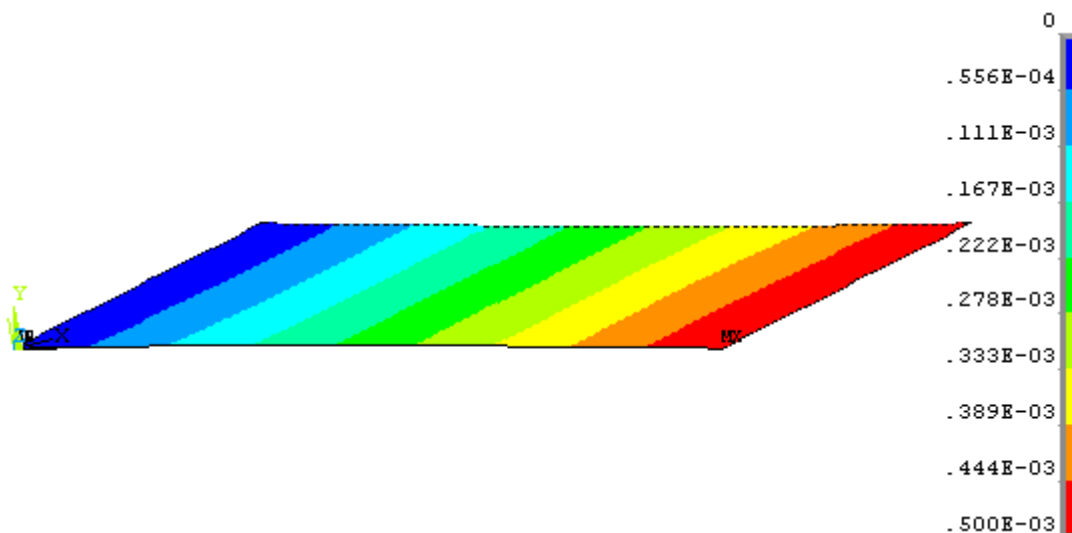


Figura 68 - Campo de deformações  $\epsilon_y$  em metros, do corpo de prova no plano  $LT$ .

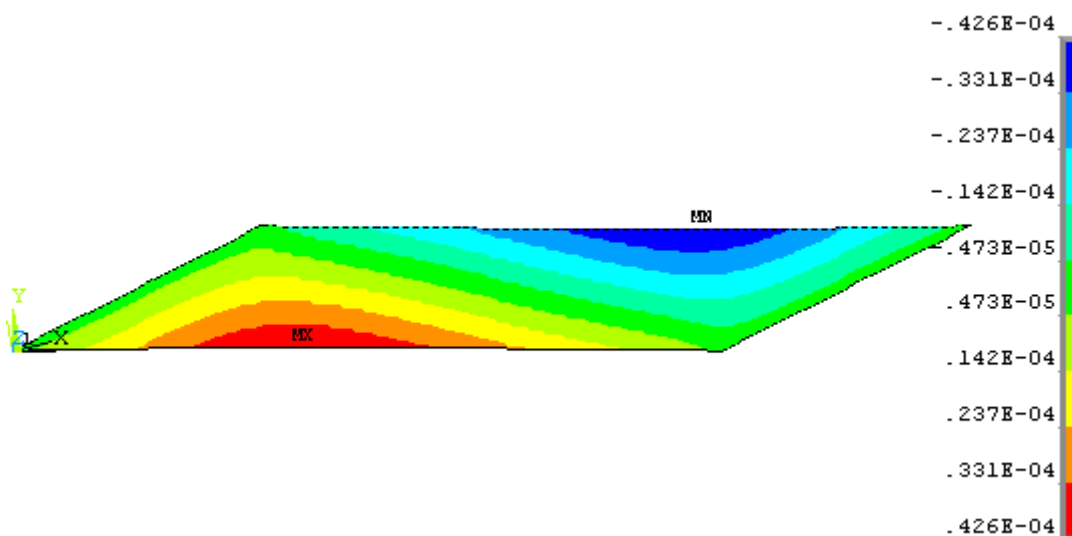


Figura 69 - Campo de deformações  $\epsilon_y$  em metros, do corpo de prova no plano  $LT$ .

Parecido com o efeito gerado no corpo de prova  $LR$ , os campos de tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  representados nas Figuras 70, 71 e 72 podem ser considerados uniaxiais e uniformes, ao longo do corpo de prova  $LT$ , sendo ainda reforçado com a leitura dos gráficos das Figuras 73 e 74.

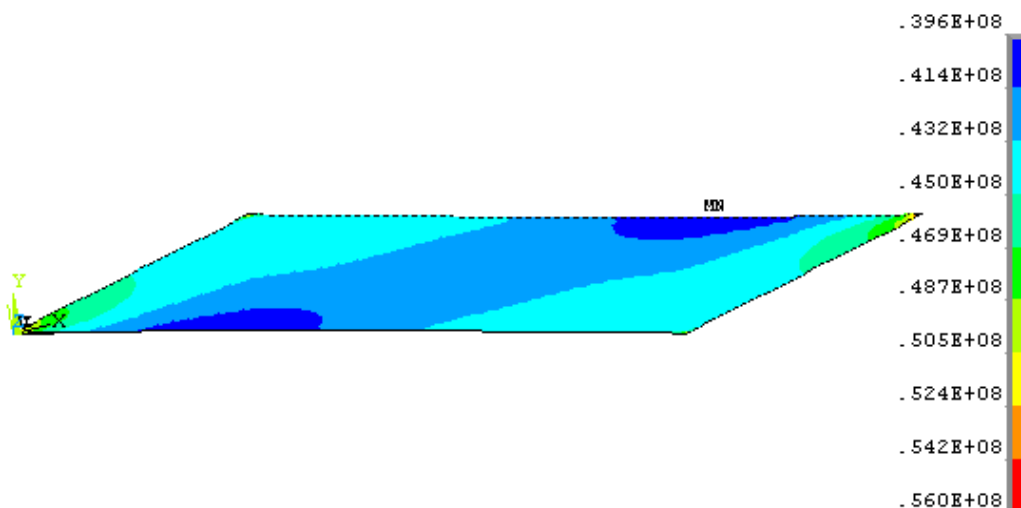


Figura 70 - Campo de tensões  $\sigma_x$ , em Pascal, do corpo de prova no plano  $LT$ .

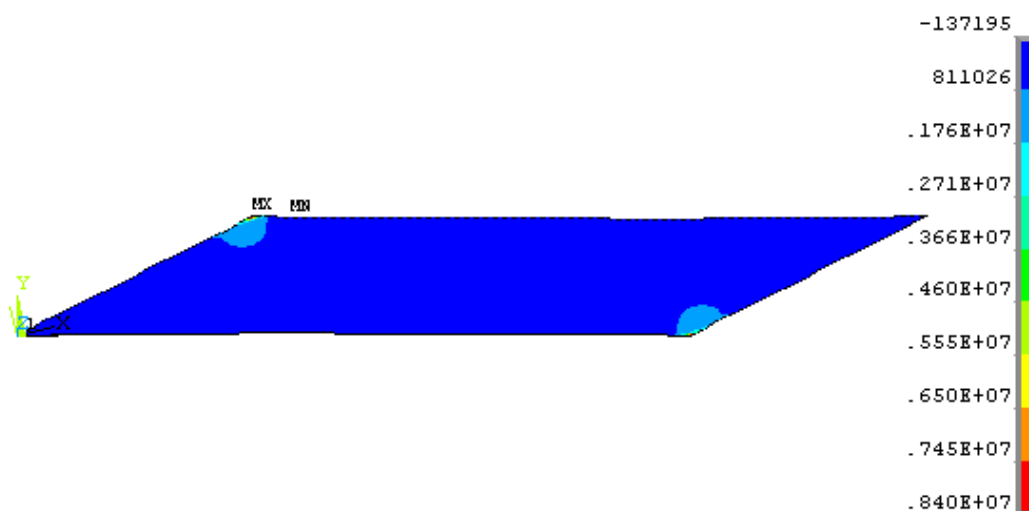


Figura 71 - Campo de tensões  $\sigma_y$ , em Pascal, do corpo de prova no plano  $LT$ .

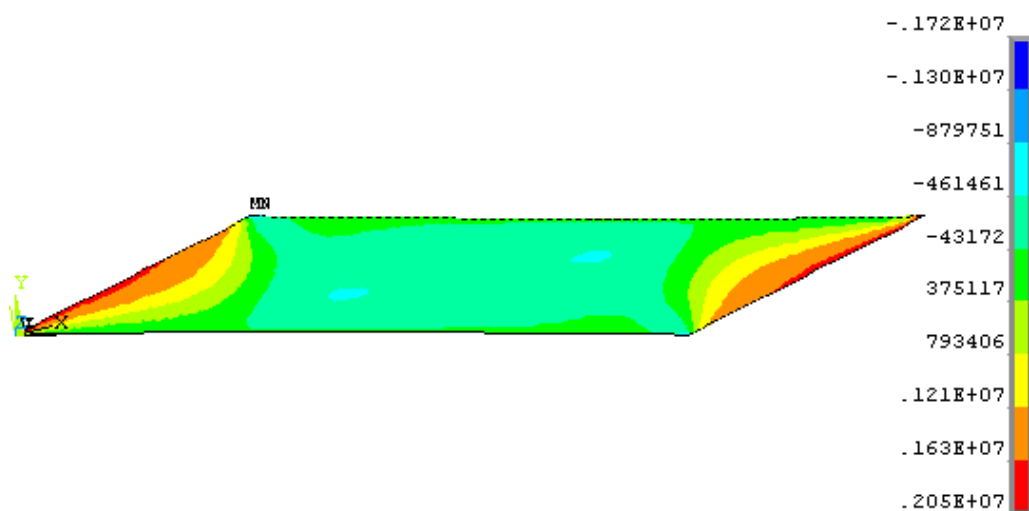


Figura 72 - Campo de tensões  $\sigma_{xy}$ , em Pascal, do corpo de prova no plano  $LT$ .

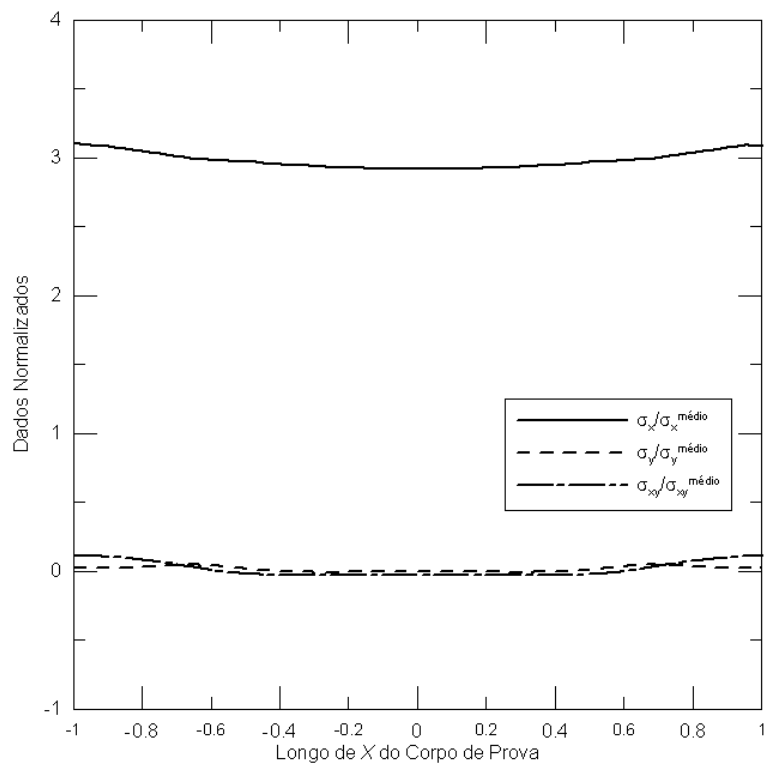


Figura 73 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central horizontal do corpo de prova *LT*.

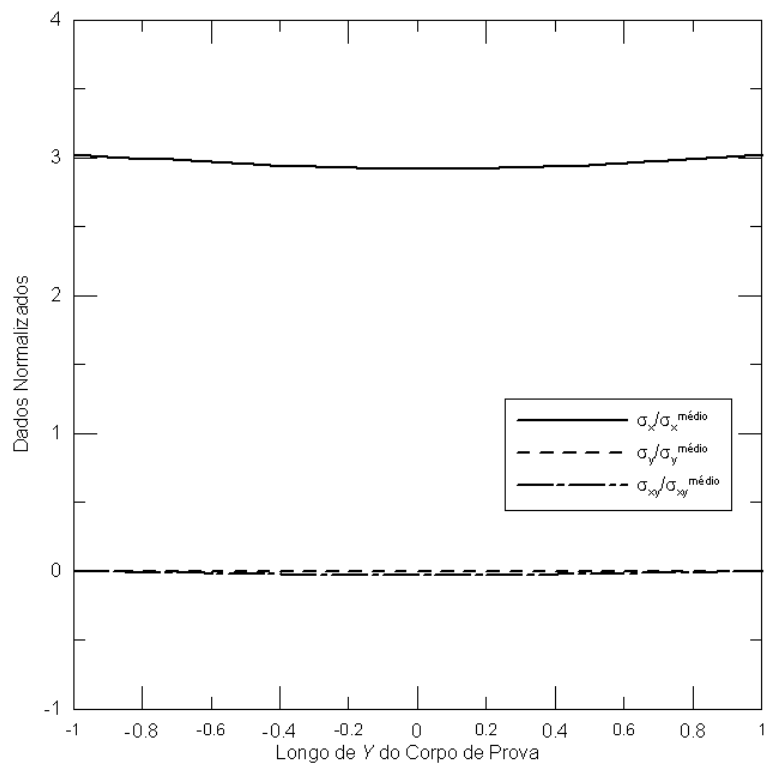


Figura 74 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central vertical do corpo de prova *LT*.

#### 4.2.2.3 Análise dos campos de tensão deformação do corpo de prova no plano *RT*.

A Figura 75 ilustra a malha no modelo do corpo de prova do ensaio “*off-axis*” no plano de *RT*.

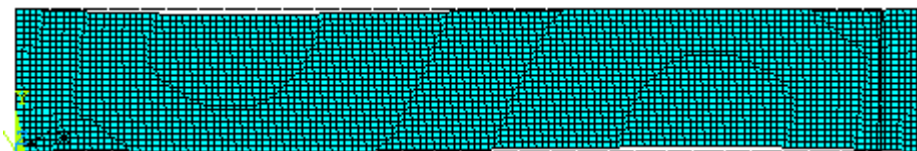


Figura 75 - Malha do modelo do corpo de prova “*off-axis*” no plano *RT*.

A Figura 76, mostra os campos de deformação no modelo do corpo de prova “*off-axis*” no plano *RT*, fica bem evidente que os campos de deslocamento  $\varepsilon_x$  não são paralelos assim como no plano *LR* e *LT*, assim como na Figura 77, os campos de deformação  $\varepsilon_y$  têm a típica deformada em “S” devido à configuração da geometria do corpo de prova. Podendo então concluir que as deformações no corpo de prova *RT* não podem ser consideradas uniformes.

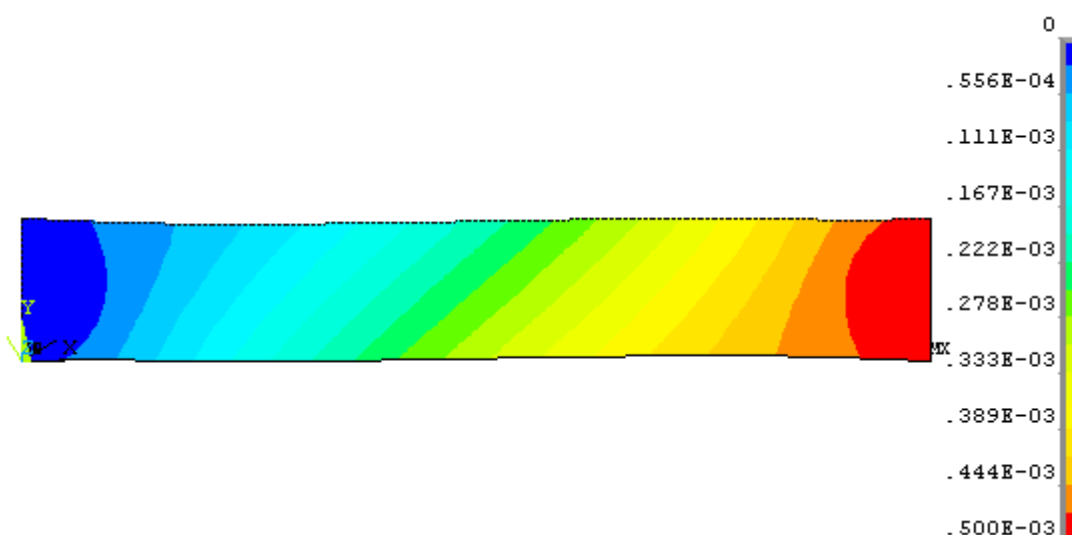


Figura 76 - Campo de deformações  $\varepsilon_x$  em metros, do corpo de prova no plano *RT*.

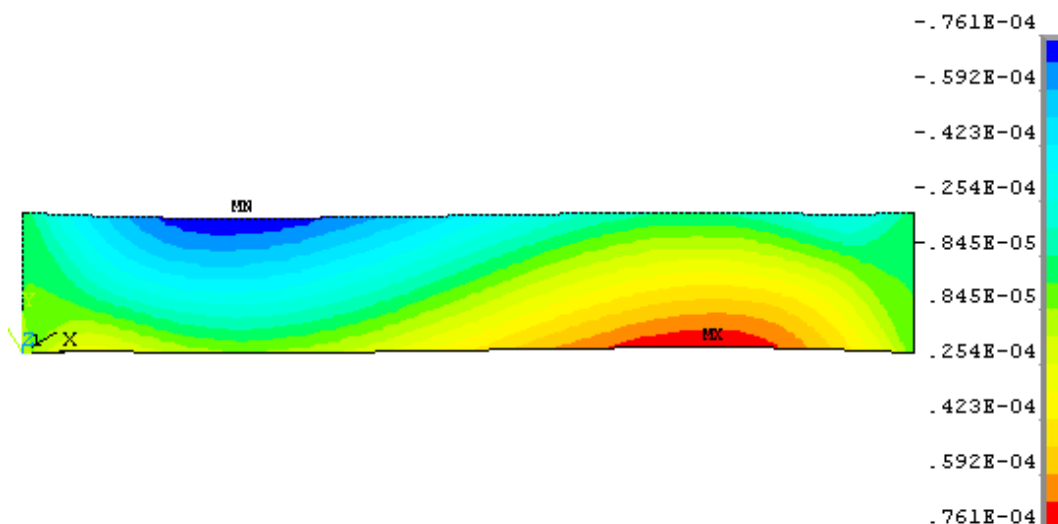


Figura 77 - Campo de deformações  $\varepsilon_y$  em metros, do corpo de prova no plano *RT*.

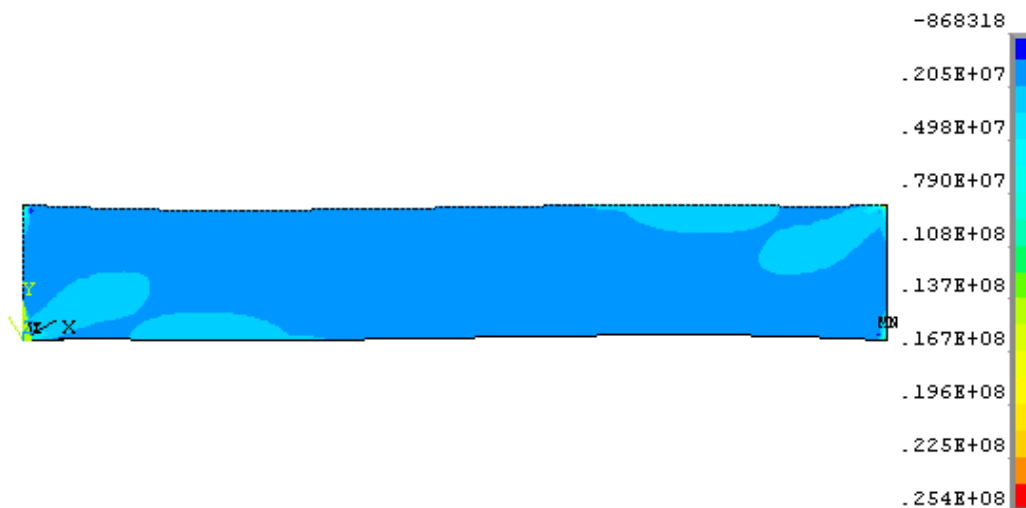


Figura 78 - Campo de tensões  $\sigma_x$  em Pascal, do corpo de prova no plano *RT*.

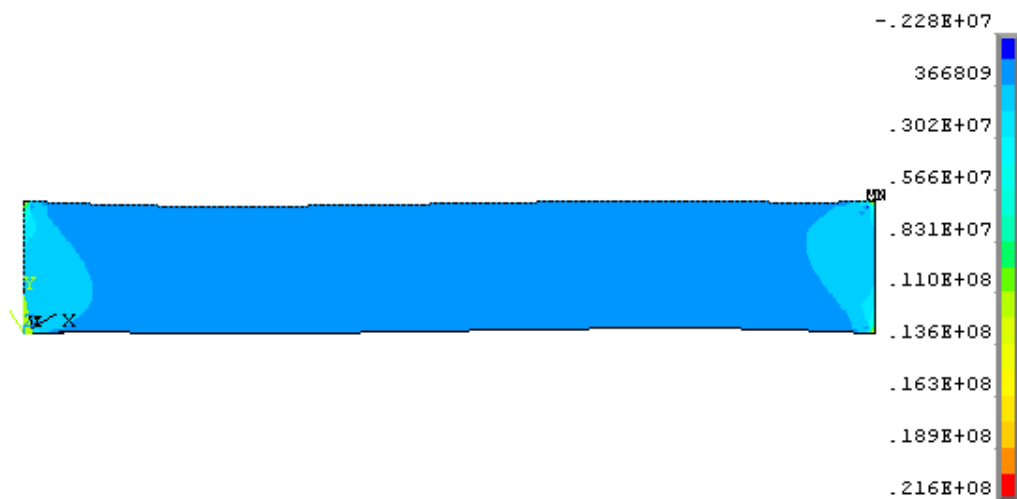


Figura 79 - Campo de tensões  $\sigma_y$  em Pascal, do corpo de prova no plano *RT*.

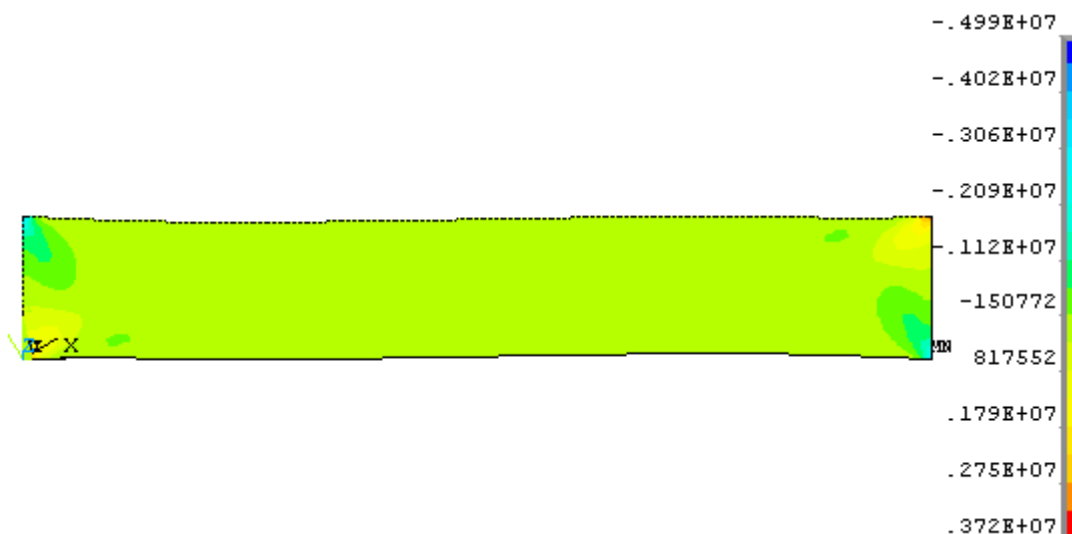


Figura 80 - Campo de tensões  $\sigma_{xy}$  em Pascal, do corpo de prova no plano  $RT$ .

Os campos de tensão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$ , presentes nas Figuras 78, 79 e 80, podem ser considerados homogêneos e uniformes, mas com o auxílio do gráfico da Figura 80, é possível detectar que nas extremidades do corpo de prova existe a intensificação das tensões, fato este que invalida o ensaio de tração “*off-axis*” para o plano  $RT$ , pois a possibilidade de ruptura do corpo de prova numa região que não seja a qual o extensômetro está colado é bastante grande.

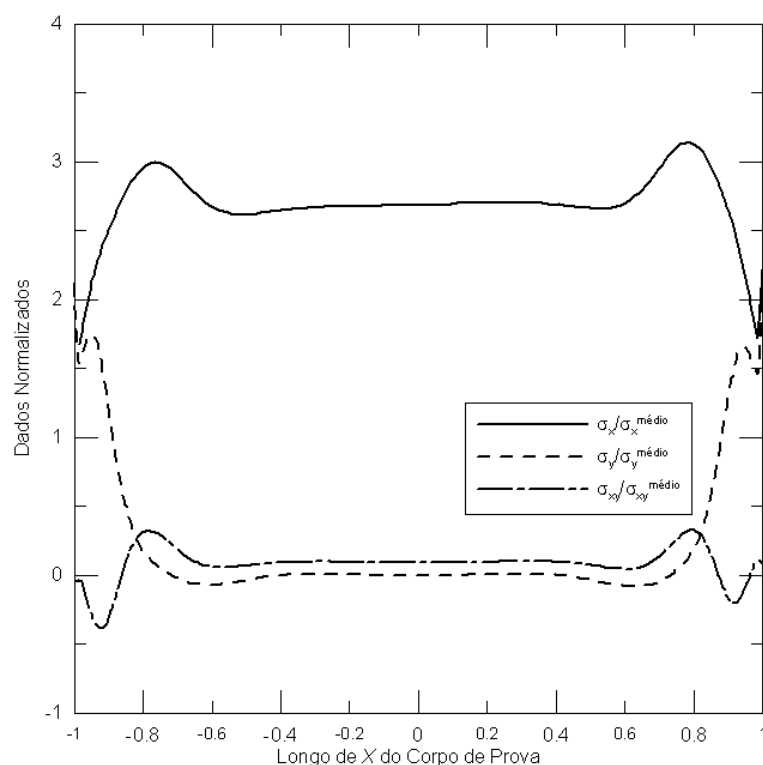


Figura 81 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central horizontal do corpo de prova  $RT$ .



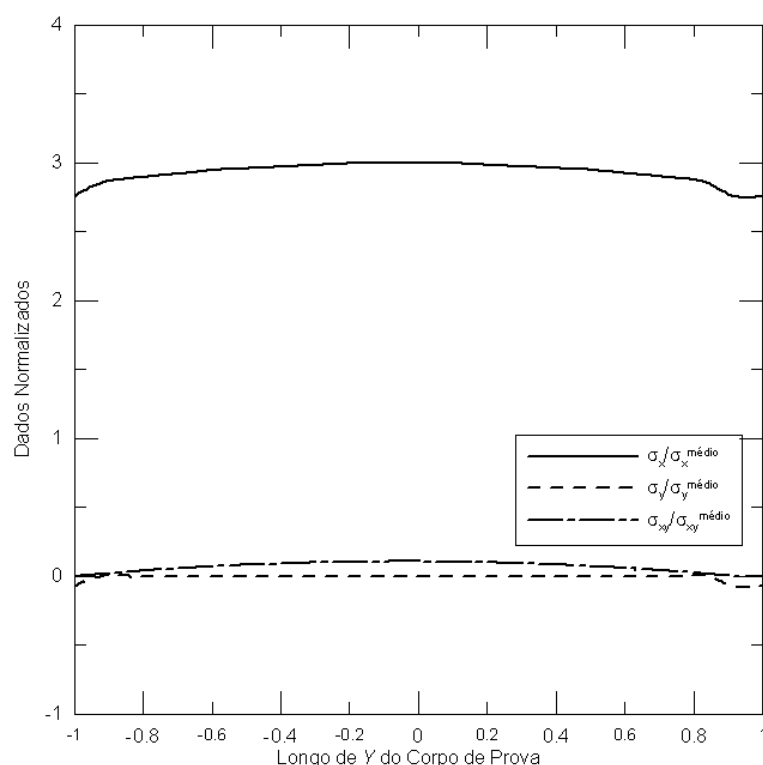


Figura 82 - Distribuição das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  ao longo da região central vertical do corpo de prova *RT*.

#### 4.3 Análise dos fatores de correção $C$ e $S$ .

Como visto na Seção anterior, as tensões no corpo de prova *LR* e *LT* são praticamente homogêneas podendo então determinar o módulo de cisalhamento direto pela Equação 64. No plano de *RT* por não se obter um estado de tensão homogêneo e uniforme, se faz necessário a utilização de fatores de correção analítica indicados na Seção 2.3.5.1 pelas Equações, 66, 67 e 68.

Os fatores de correção  $S$  e  $C$  foram determinados utilizando os dados fornecidos pelo método dos elementos finitos para a madeira de *Eucalyptus citriodora*, podendo ser verificado na Tabela 5.

Verifica-se que para os planos de simetria *LR* e *LT* os fatores de correção  $S$  e  $C$  são próximos de 1, evidenciando que o ensaio de tração “*off-axis*” pode ser considerado um método direto para a determinação do módulo de cisalhamento da madeira de *Eucalyptus citriodora*. Para o plano *RT*, verifica-se que os fatores de

correção analítica  $C$  e  $S$  estão distantes de 1 e a não utilização do fator de correção  $CS$  pode acarretar um erro de 13% na determinação do módulo de cisalhamento no plano  $RT$ .

Tabela 5 – Fatores de correção analíticos,  $C$ ,  $S$  e  $CS$ , determinados através do método dos elementos finitos.

	Plano $LR$	Plano $LT$	Plano $RT$
$C$	0,994	0,972	0,871
$S$	1,004	1,012	1,032
$CS$	0,998	0,983	0,899

A determinação do módulo de cisalhamento do plano  $RT$ , não é direta pelo fato de não ser possível a utilização das placas oblíquas de amortecimento, devido as dimensões do corpo de prova ser reduzidas e não permitir a implementação de tal método.

## 5 CONCLUSÕES

A simulação numérica pelo método dos elementos finitos do ensaio proposto pela NBR 7190 (1997) para a determinação da resistência ao cisalhamento no material madeira, demonstrou a não existência de campos de tensões homogêneos na área cisalhante, pois ficou claro que as tensões se sobrepõem e concentram-se nas regiões extremas da referida área, devido aos campos de deslocamento não uniforme, podendo causar ruptura do material nessas regiões, sendo assim o referido ensaio demonstra-se ser inadequado para a determinação das propriedades ao cisalhamento da madeira de *Eucalyptus citriodora*.

Na análise de comparação das placas de acoplamento entre as garras e o corpo de prova do ensaio de tração “*off-axis*”, a geometria proposta por Sun e Chung (1993) demonstrou ser a mais adequada pois provoca no corpo de prova um campo de tensão uniaxial e homogêneo e ainda deslocamentos uniformes ao longo de todo corpo de prova. Diferente do que ocorre com as outras geometrias analisadas neste trabalho.

Quanto à implementação do ensaio de tração “*off-axis*” para a madeira de *Eucalyptus citriodora* ficou evidente a aplicabilidade do ensaio para os planos de simetria *LR* e *LT* pois o ensaio provocou um estado de tensão homogêneo em uma região extensa do corpo de prova. Para o plano de simetria *RT* o ensaio de tração “*off-axis*” demonstrou ser inadequado, pois fica evidente a sobreposição de tensões em suas extremidades.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D143-94: **Standard methods of testing small clear specimens of timber**. Philadelphia, PA, USA, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D198-94: **Standard methods of static tests of lumber in structural sizes**. Philadelphia, PA, USA, 1994.

ANSYS, **Realease 11.0 instalation and overview**. 1. ed. Ontario, ANSYS Canada Ltda, 2006, 2602p.

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

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. **Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus Citriodora***. Revista Cerne, 9(1): 66-80, 2003.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed., Florida. Krieger Publishing Company, 1982, 712p.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CERVEIRA, R. L. P. Caracterização experiemntal do comportamento mecânico sob solicitação multiaxial em junções de chapas AA2024-T3 soldadas por fricção-mistura. 2008. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CHAMIS, C.C.; SINCLAIR, J.H. **Ten-deg off-axis test for shear properties in fiber composites**. Experimental Mechanics, 17(9):339-346, 1977.

DE CONTI, C. **Simulação Numérica Off Axis**. In: 10º EBRAMEM, 2006, São Pedro. 10º EBRAMEM. São Carlos : São Carlos, 2006.

EN 408. Timber structures - **Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties**. European Committee for Standardization, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2002.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Blücher, 2002. 293p.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1986. 1838p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY, **Wood Handbook-Wood as an Engineering Material**, U.S. Department of Agriculture, Madison, 1999, cap. 4.

GARRIDO, N.. **Identificação do comportamento ao corte da madeira, através do ensaio de tracção for a dos eixos de simetria material**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias de Engenharias) - Departamento de Engenharia de Madeiras da Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2004.

GOLDENBERG, N.; ARCAN, M.; NICOLAN, E. **On the most suitable specimen shape for testing shear strength of plastics**, Proceedings of International Symposium on Plastics Testing and Standard, ASTM STP 247, 115-121, 1958.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, 2000. 242p.

GONÇALVES, V. O; PARDINI, L. C.; GARCIA, K.; ANCELOTTI JUNIOR, A. C.; BEZERRA, E. M. **Iosipescu shear resistance in composites of carbon and glass fibers with epóxi resin**. Journal of Aerospace Technology and Management. 1(1): 49-53, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A. **IPT**. Madeira: Uso Sustentável na Construção Civil. São Paulo, 2009. 103p.

IOSIPESCU, N. **A new method of expressing and measuring the scaling ability of gasket materials.** Journal of Materials, 2(3):567-580, 1967.

LIU, J.Y.; ROSS R.J.; RAMMER D. R.. **Improved arcan shear test for wood.** New Orleans: Gopu, 1996.

LIU J.Y. **Effects of shear coupling on shear properties of wood.** Wood and Fiber Science, 32(4):458-465, 2001.

LIU J.Y. **Analysis of off-axis tension test of wood specimens.** Wood and Fiber Science, 34(2):205-211, 2002.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira.** Curitiba: UFPR, 2007. 168p.

NICOLAS, E. A. **Estudo de critério de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira.** 2006. 257 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

OLIVEIRA, J. M. Q. **Aplicação do ensaio de arcan na determinação do comportamento ao corte da madeira de pinus pinaster ait.** 2004. 190 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias das Engenharias) – Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2004.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 223p.

PINDERA, M. J.; HERAKOVICK, C.T. **Shear characterization of unidirectional off-axis composite specimens.** Experimental Mechanics, 26:103-112, 1986.

RAMMER, D. R.; SOLTIS L. A. **Experimental shear strength of glued-laminated beams.** Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest product Laboratory, 1994. 527p.

SANTOS, J. A. **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. 2007. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

SUN, C.T.; CHUNG, I. **An oblique end-tab design for testing off-axis composite specimens**. Journal of Composites Materials, 24(8):619-623, 1993.

SUN C.T.; BERRETH, S. P. **A new end tab design for off-axis tension test of composite materials**. Journal of Composite Materials, 22:766-779, 1988.

TODESCHINI, R. **Ensaio uniaxiais e biaxiais para a avaliação de critério de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

XAVIER, J. M. C. **Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio iosipescu**. 2003. 269 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias das Engenharias) – Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2003.

YOSHIHARA, H.; A. FUKUDA. **Influence of loading point on the static bending test of wood**. Journal of Wood Science, 44:473-481, 1998.

YOSHIHARA H.; OHTA M. **Estimation of the shear strength of wood by uniaxial-tension tests of off-axis specimens**. Journal of Wood Science, 46(2):159-163, 2000.

YOSHIHARA, H. **Prediction of the off-axis stress-strain relation of wood under compression loading**. European Journal Wood Products, 67: 183-188, 2009.

WANGAARD, F. F. **Wood: its structure and properties**. Madison, EUA: USDA 1979.

## GLOSSÁRIO

**Angiospermas.** Grupo sistemático de plantas superiores, uma subdivisão do reino vegetal (FERREIRA, 1986).

**Biodeterioração.** Diz-se a substancia que sofreu decomposição por microrganismos ou intempéries (FERREIRA, 1986).

**Bioma.** Conjunto de seres vivos de uma área (FERREIRA, 1986).

**Cretáceo.** Período histórico, em que, na fauna, aparecem os primeiros mamíferos, de pequeno porte, e na flora, se nota o progresso dos gimnospermos (FERREIRA, 1986).

**Dicotiledôneas.** Classe de angiosperma que se caracteriza pelo embrião provido de dois cotilédones, e ainda pelos seguintes caracteres principais: raiz axial, estrutura secundária, feixes vasculares em círculos, folhas pecioladas com nervação penada. Divide-se em duas subclasses: arquiclamídeas e metaclamídeas (FERREIRA, 1986).

**Exótico.** Que não é indígena, estrangeiro (FERREIRA, 1986).

**Fuste.** Porção compreendida, numa árvore, entre o solo e as primeiras ramificações, e que é manipulada pela indústria madeireira; tronco (FERREIRA, 1986).

**Gimnosperma.** Grupo de vegetais, geralmente uma subdivisão dos sistemas modernos, que se define pelos óvulos e semente a descoberto (FERREIRA, 1986).

**Helicoidal.** Que tem a forma semelhante a uma hélice; em caracol (FERREIRA, 1986).

**Intempérie.** Rigores das variações das condições atmosféricas (chuvas, ventos, temperaturas, umidade) (FERREIRA, 1986).

**Jurássico.** Período histórico, que se caracteriza pelo aparecimento de animais de transição entre repteis e aves (FERREIRA, 1986).

**Latifoliado.** Dotado de folhas largas (FERREIRA, 1986).

**Meristema.** Tecido caracterizado pela ativa divisão de suas células, e que produz as novas células necessárias ao crescimento da planta (FERREIRA, 1986).

**Microfibrila.** Pequenas fibras (FERREIRA, 1986).



**Monocotiledôneas.** Classe de plantas angiospérmicas, caracterizada pela existência de um só cotilédone no embrião. Outros caracteres: ausência de raiz primária; nervuras paralelas; flores trímeras; folhas invaginantes ou completas; caule sem estrutura secundária, com feixes vasculares dispersos (FERREIRA, 1986).

**Monopodial.** Ramificação lateral em que o eixo principal mantém a hegemonia, gerando ramos menores que ele, e o tronco se mostra retilíneo e uniforme (FERREIRA, 1986).

**Parênquima.** Tecido constituído de células isodiamétricas ou paralelepipedais, que contém pontoações simples. Relaciona-se principalmente com a armazenagem e distribuição de substâncias nutritivas (FERREIRA, 1986).

**Simpodial.** Ramificação lateral em que o eixo não prevalece, sendo substituído por outro ramo, o qual a seu turno, será pouco depois deslocado por outro, e assim sucessivamente, mostrando-se o tronco, neste caso, mais irregular do que a ramificação monopodial (FERREIRA, 1986).

**Traqueíde.** Célula de lenho não perfurada, com pontoações areoladas junto aos elemento congêneres (FERREIRA, 1986).

**Uniaxial.** Que tem um só eixo (FERREIRA, 1986).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)