



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

ALÉXIA BRANDÃO RIBEIRO

**SOBRE O CISALHAMENTO NA INTERFACE
MADEIRA E COMPÓSITO EM VIGAS LAMINADAS
COLADAS DE MADEIRA REFORÇADAS POR
FIBRAS**

CAMPINAS
2018

ALÉXIA BRANDÃO RIBEIRO

**SOBRE O CISALHAMENTO NA INTERFACE
MADEIRA E COMPÓSITO EM VIGAS LAMINADAS
COLADAS DE MADEIRA REFORÇADAS POR
FIBRAS**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador(a): Prof. Dr. NILSON TADEU MASCIA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA ALÉXIA BRANDÃO RIBEIRO E ORIENTADA PELO PROF. DR. NILSON TADEU MASCIA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2018**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

R354s Ribeiro, Aléxia Brandão, 1992-
Sobre o cisalhamento na interface madeira e compósito em vigas laminadas coladas de madeira reforçada por fibras / Aléxia Brandão Ribeiro. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Nilson Tadeu Mascia.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Madeira. 2. Fibras. 3. Adesivos. 4. Cisalhamento. I. Mascia, Nilson Tadeu, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Shear stress at the interface wood and composite for glued laminated timber (GLULAM) with fiber reinforcement

Palavras-chave em inglês:

Wood

Fibers

Resin

Shear

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Nilson Tadeu Mascia [Orientador]

Jorge Luís Nunes de Góes

Isaías Vizotto

Data de defesa: 04-09-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**SOBRE O CISALHAMENTO NA INTERFACE
MADEIRA E COMPÓSITO EM VIGAS LAMINADAS
COLADAS DE MADEIRA REFORÇADAS POR
FIBRAS**

ALÉXIA BRANDÃO RIBEIRO

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
Presidente e Orientador(a)/Universidade Estadual de Campinas**

**Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná**

**Prof. Dr. Isaías Vizotto
Universidade Estadual de Campinas**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 04 de setembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia pela oportunidade, orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido que tornou possível a realização deste trabalho.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, ao Laboratório de Estruturas da FEC, ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-LME), ao Laboratório do Instituto de Artes da UNICAMP, ao IVALSA (*Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, Sesto Fiorentino, Florença, Itália*) e aos técnicos destes laboratórios por disponibilizar os recursos necessários para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A caracterização da resistência ao cisalhamento na linha de adesivo em peças de madeira vem sendo estudada no Brasil e no mundo, porém, há ainda muita controvérsia nos métodos de ensaio para esta caracterização e na confiabilidade dos mesmos. Esta problemática torna-se ainda mais complexa quando é aplicado o reforço com fibras, pois adiciona-se mais um material com propriedades de rigidez e resistência distintas da madeira e da resina, aumentando a heterogeneidade do material. Nesse cenário, este trabalho teve como objetivo, estudar o cisalhamento em corpos de prova padronizados a fim de propor um procedimento para a aplicação na avaliação da resistência ao cisalhamento em madeira de peças laminadas coladas com reforço de fibras para fins de verificação ou dimensionamento ao cisalhamento em projeto associados a tais peças. Três tipos de corpos de prova foram avaliados numericamente e experimentalmente. Dois tipos de madeira foram utilizados *Picea abies* e *Pinus ellioti*, reforçadas com dois tipos de fibras, Vectran e Sisal e coladas com três tipos de resina epóxi, poliuretano e emulsão polimérica de isocianato. Para análise numérica utilizou-se modelagens no software ANSYS no pacote *static structural* baseado em elementos finitos. Foram estudadas as tensões de cisalhamento e tensões normais atuantes no plano de cisalhamento nos corpos de provas estudados para as condições de ensaio. Adicionalmente foram realizados ensaios experimentais e apresenta-se estudos analíticos e estatísticos dos mesmos. Os resultados numéricos indicam que a tensão de cisalhamento não é constante no plano, havendo uma concentração de tensão nas extremidades e tensões menores que a teórica ao centro. Para os corpos de prova estudados, observa-se que há a ocorrência de tensões normais devido à um binário de reação. Por outro lado, a tensão de cisalhamento tende a ficar constante na parte central do corpo de prova e a tensão normal é considerada pequena em comparação à cisalhante não influenciando os resultados advindo dos ensaios. As constatações experimentais confirmam estes resultados podendo-se observar o tipo de ruptura característico ao cisalhamento. Finalmente, recomendações de ensaio são feitas e coeficientes de modificação são calculados e recomendados na aplicação do dimensionamento ao cisalhamento de peças de madeira laminada colada com reforços de fibras.

Palavras-Chave: Madeira; Fibra; Adesivo; Cisalhamento.

ABSTRACT

The glue line shear strength characterization for wood composites has been studied in Brazil, and as well worldwide, however, there is still much controversy about the test methods and their reliability. The problematic becomes even more complex when the fibers reinforcement is applied, because when the fiber is added to the wood and the resin, that is another material with different stiffness and strength properties, it increases the material heterogeneity. In this scenario, these dissertation's objective is to study shear strength characterization in standardized test specimens in order to propose a procedure for the characterization of shear strength in laminated wood beams reinforced with fiber to be applied in verification and design related of these structural pieces. Three specimen types were evaluated numerically and experimentally. Two wood species were used *Picea abies* and *Pinus ellioti*, reinforced with two fibers, Vectran and Sisal and bonded with three resin types, epoxy, polyurethane and isocyanate polymer emulsion. For the numerical analysis, the ANSYS software was used in the static structural package, which is based on the method of finite elements. The shear stresses and normal stresses acting on the shear plane in the specimens were studied for the test conditions. In addition, experimental studies were performed, and then statistical and analytical studies were carried out. The numerical results indicate that the shear stress is not constant in the plane, that have concentrations of shear stress at the borders and these is approximately constant at the center, therefore, it is smaller than the theoretical shear stress. For the specimens studied, it is observed that are normal stresses acting due to a reaction torque. On the other hand, the shear stress tends to be constant in the central part of the specimen and the normal stresses observed is considered small in comparison to the shear stresses, in this way, it do not interfir the test results. The experimental finds confirm this results; it is possible to observe that the rupture mode observed is characteristic to the shear failure mode. Finally, test recommendations are made and modification coefficients are calculated and recommended for the application in shear design for glued laminated timber with fiber reinforcements.

Keywords: Wood; Fibers; Resin; Shear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Viga em flexão simples.....	16
Figura 2. Tipos de falhas em estruturas de madeira	17
Figura 3. Região de máximos esforços cortantes	17
Figura 4. Rupturas por cisalhamento próximas a furos ou diminuições de seção	18
Figura 5. Direções ortotrópicas da madeira.....	20
Figura 6. Tensões	20
Figura 7. Tipos de cisalhamento (a) vertical (b) horizontal (c) paralelo.....	21
Figura 8. Corpo de Prova NBR 7190 (Dimensões em cm).....	22
Figura 9. Corpo de prova ASTM - D 143 (Dimensões em cm).....	23
Figura 10. Corpo de prova linha do adesivo NBR 7190 (Dimensões em cm).....	23
Figura 11. Corpo de prova ASTM D905	24
Figura 12. Corpo de prova ASTM D3931 (Dimensões em cm).....	24
Figura 13. Corpo de Prova ISO 6238	25
Figura 14. Representação 3D da geometria e dimensões do corpo de prova da ISO 6238.....	25
Figura 15. Corpo de prova europeu.....	26
Figura 16. Aparato e corpo de prova ASTM D4255	27
Figura 17. Aparato e corpo de prova ASTM D 5379	27
Figura 18. a) Aparato Arcan 1. Partes esquerda e direita do aparato; 2. Ajustador; 3. Corpo de prova; 4. Chapa de contenção; 5. Molde. b) corpos de prova nas direções LT e LR. c) corpo de prova na direção RT	28
Figura 19. Configurações do ensaio a) tração; c) cisalhamento; b) e d) tração + cisalhamento	28
Figura 20. Corpo de prova e aparato de ensaio	29
Figura 21. Corpo de prova MD <i>Block Shear</i>	29
Figura 22. Aparato de ensaio MD <i>Block Shear</i>	30
Figura 23. LEE/Ufsc (Dimensões em mm)	30
Figura 24. LEE/Ufsc Modificado (Dimensões em mm).....	30
Figura 25. Corpo de prova adotado pelo IPT.....	31
Figura 26. Corpo de prova para ligações metálicas	31
Figura 27. Corpos de prova baseados na EN 302-1	32
Figura 28. Corpos de prova baseados na ASTM D 3931 ou D 905	32
Figura 29. Ensaio do compósito	33
Figura 30. Ensaio da madeira	34
Figura 31. Malha utilizada por Santos Neto a) NBR b) LEE c) LEE modificado (1999).....	35
Figura 32. Distribuição da tensão de cisalhamento NRB 7190	36
Figura 33. Distribuição da tensão de cisalhamento LEE	36
Figura 34. Distribuição da tensão de cisalhamento LEE Modificado	37
Figura 35. Distribuição da Tensão Normal em x NBR 7190.....	37
Figura 36. Esforços em função da presença do Binário.....	38

Figura 37. Distribuição da Tensão normal em z NBR	38
Figura 38. Distribuição da Tensão normal em z LEE	39
Figura 39. Distribuição da Tensão normal em z LEE modificado	39
Figura 40. Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da espessura dos corpos de prova	40
Figura 41. Estado deformado do EN 302-1 (fator de aplicação de 10x)	42
Figura 42. Distribuição de tensões para EN 302-1, à esquerda estado elástico linear e à direita no máximo carregamento. Linha sólida indica tensão cisalhante e tracejada tensão normal.	42
Figura 43. Distribuição de tensões para ASTM D905, à esquerda estado elástico linear e à direita no máximo carregamento. Linha sólida indica tensão cisalhante e tracejada tensão normal.	43
Figura 44. Distribuição das Deformações por cisalhamento: A) PRF Numérico; B) PUR Numérico; C) PRF ESPI; D) PUR ESPI; E) ESPI PRF (vermelho) PUR (azul); F) Numérico PRF (vermelho) PUR (azul).....	45
Figura 45. A) vetores de deformações; B) vetores de deformações por cisalhamento	46
Figura 46. Corpo de prova estrutural	46
Figura 47. Distribuição dos esforços no ensaio de cisalhamento.....	48
Figura 48. Von-misses para a) $\beta = 35$; b) $\beta = 140$; c) $\beta = 35$ d) $\beta = 140$	49
Figura 49. Corpo de prova para ligação Fulcrun-Madeira	50
Figura 50. Corpo de prova de madeira maciça.....	50
Figura 51. Resistência ao cisalhamento	51
Figura 52. Resistência ao cisalhamento	52
Figura 53. Produtos com fibra Vectran®	58
Figura 54. Tecido de Vectran®	59
Figura 55. Sisal, fibras de sisal estendidas para secagem e fio <i>Baler Twine</i>	59
Figura 56. Tecido de sisal	60
Figura 57. Nomenclatura dos Corpos de Prova	61
Figura 58. Geometria corpo de prova IVALSA madeira (esquerda) compósito (direita)	62
Figura 59. Geometria corpo de prova NBR (esquerda) e ASTM (direita)	63
Figura 60. Carregamento	65
Figura 61. Vinculações.....	66
Figura 62. SOLID 186	67
Figura 63. TARGE170 e CONTA174	68
Figura 64. SURF154	68
Figura 65. Discretização “ <i>Bias factor</i> ” na direção do eixo z – IVALSA.....	69
Figura 66. Discretização “ <i>Bias factor</i> ” na direção do eixo z – ASTM	69
Figura 67. Discretização “ <i>Bias factor</i> ” na direção do eixo z – NBR.....	69
Figura 68. Discretização no plano xy	70
Figura 69. Discretização no plano a) 0,5 mm; b) 1 mm; c) 2 mm	72
Figura 70. (a) Equipamento de ensaio, (b) Aparato de ensaio para corpo de prova de cisalhamento à compressão.....	75

Figura 71. Configuração do ensaio de cisalhamento CP-NBR.....	76
Figura 72. Configuração do ensaio de cisalhamento CP- ASTM	76
Figura 73. Tensão de cisalhamento no plano, na madeira a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR.....	80
Figura 74. Tensão de cisalhamento no plano, na resina a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR.....	81
Figura 75. Tensão normal no plano, na madeira a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR Fonte: Própria.....	82
Figura 76. Tensão normal no plano, na resina a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR	83
Figura 77. Eixo orientado no centro do plano de cisalhamento.....	84
Figura 78. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) I.E; b) I.P; c) I.E.S; d) I.P.S; e) I.E.V; f) I.P.V; g) I	85
Figura 79. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) I.E; b) I.P; c) I.E.S; d) I.P.S; e) I.E.V; f) I.P.V ; g) I	86
Figura 80. Módulo de elasticidade x Tensão média	87
Figura 81. Espessura do compósito x Tensão no centro do vão.....	88
Figura 82. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) N; b) N.EPI; c) N.EPI.S; d) N.P.S; e) N.EPI.V; f) N.P.V	89
Figura 83. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) N; b) N.EPI; c) N.EPI.S; d) N.P.S; e) N.EPI.V; f) N.P.V	90
Figura 84. Módulo de elasticidade x Tensão no centro do vão	91
Figura 85. Espessura do compósito x Tensão máxima.....	91
Figura 86. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) A; b) A.EPI; c) A.EPI.S; d) A.P.S; e) A.EPI.V; f) A.P.V	92
Figura 87. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) A; b) A.EPI; c) A.EPI.S; d) A.P.S; e) A.EPI.V; f) A.P.V	93
Figura 88. Espessura x Tensão Média	94
Figura 89. Corpos de prova após ensaio.....	96
Figura 90. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA	97
Figura 91. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E e I.P)	99
Figura 92. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA	99
Figura 93. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E.S e I.P.S)	101
Figura 94. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA	102
Figura 95. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E.V e I.P.V)	103
Figura 96. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR	104
Figura 97. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR	105
Figura 98. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR	106
Figura 99. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM.....	107
Figura 100. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM.....	108

Figura 101. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resistência ao Cisalhamento	44
Tabela 2. Resistência ao cisalhamento (MPa)	47
Tabela 3. Resistência Relativa para cada tipo de ensaio.....	47
Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas C24	55
Tabela 5. Propriedades físico-mecânicas da madeira <i>Pinus elliotti</i> – Valores médios.	56
Tabela 6. Informações Técnicas <i>Mapei Mapewood Gel 120</i>	56
Tabela 7. Informações Técnicas ReacTITE EP-925.	57
Tabela 8. Propriedades Vectran® HT	58
Tabela 9. Propriedades dos adesivos e das fibras	60
Tabela 10. Siglas	62
Tabela 11. Corpos de Prova IVALSA	63
Tabela 12. Corpos de Prova NBR e ASTM	64
Tabela 13. Carregamentos aplicados para cada corpo de prova.....	64
Tabela 14. Resultados da análise GCI	72
Tabela 15. Propriedades ortotrópicas da madeira para modelagem	73
Tabela 16. Fração de Fibra por Volume	74
Tabela 17. Propriedades Isotrópicas dos adesivos e dos compósitos.....	74
Tabela 18. Tensão cisalhante	87
Tabela 19. Tensão cisalhante	90
Tabela 20. Tensão cisalhante	94
Tabela 21. Fatores de correção	95
Tabela 22. Fatores de correção simplificado	95
Tabela 23. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira colada com Epóxi e da madeira maciça e a relação entre elas	98
Tabela 24. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira colada com PU e da madeira maciça e a relação entre elas	98
Tabela 25. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-epóxi-sisal	100
Tabela 26. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-poliuretano-sisal	100
Tabela 27. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-epóxi-Vectran	102
Tabela 28. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-poliuretano-Vectran	103
Tabela 29. Tensão cisalhante resistente	104
Tabela 30. Tensão cisalhante resistente nos corpos de Sisal CP-NBR.....	105
Tabela 31. Tensão cisalhante resistente nos corpos de Vectran CP-NBR	106
Tabela 32. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira CP-ASTM.....	107
Tabela 33. Tensão cisalhante resistente nos corpos de Sisal CP-ASTM	108
Tabela 34. Tensão cisalhante resistente nos corpos de Vectran CP-ASTM.....	109
Tabela 35. Comparações estatística entre as médias.....	110
Tabela 36. <i>Two sample T</i> for I.M.E vs I.E.....	120

Tabela 37. <i>Two sample</i> T for I.M.P vs I.P.....	120
Tabela 38. <i>Two sample</i> T for I.M.E.S vs I.E.S.....	120
Tabela 39. <i>Two sample</i> T for I.M.E.S vs I.E.S.....	121
Tabela 40. <i>Two sample</i> T for I.M.E.V vs I.E.V.....	121
Tabela 41. <i>Two sample</i> T for I.M.P.V vs I.P.V.....	122
Tabela 42. <i>Two sample</i> T for N vs N.EPI.....	122
Tabela 43. <i>Two sample</i> T for N vs N.EPI.S.....	122
Tabela 44. <i>Two sample</i> T for N vs N.P.S.....	123
Tabela 45. <i>Two sample</i> T for N vs N.EPI.V.....	123
Tabela 46. <i>Two sample</i> T for N vs N.P.V.....	124
Tabela 47. <i>Two sample</i> T for A vs A.EPI.....	124
Tabela 48. <i>Two sample</i> T for A vs A.EPI.S.....	124
Tabela 49. <i>Two sample</i> T for A vs A.P.S.....	125
Tabela 50. <i>Two sample</i> T for A vs A.EPI.V.....	125
Tabela 51. <i>Two sample</i> T for A vs A.P.V.....	126
Tabela 52. <i>Two sample</i> T for I.E vs I.P.....	126
Tabela 53. <i>Two sample</i> T for I.E.S vs I.P.S.....	126
Tabela 54. <i>Two sample</i> T for I.E.V vs I.P.V.....	127
Tabela 55. <i>Two sample</i> T for N.EPI.V vs N.P.S.....	127
Tabela 56. <i>Two sample</i> T for N.EPI.V vs N.P.V.....	128
Tabela 57. <i>Two sample</i> T for A.EPI.S vs A.P.S.....	128
Tabela 58. <i>Two sample</i> T for A.EPI.V vs A.P.V.....	128
Tabela 59. <i>Two sample</i> T for N.EPI vs A.EPI.....	129
Tabela 60. <i>Two sample</i> T for N.EPI.S vs A.EPI.S.....	129
Tabela 61. <i>Two sample</i> T for N.P.S vs A.P.S.....	130
Tabela 62. <i>Two sample</i> T for N.EPI.V vs A.EPI.V.....	130
Tabela 63. <i>Two sample</i> T for N.P.S vs A.P.S.....	130

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
2.1. CISALHAMENTO NAS PEÇAS FLETIDAS DE MADEIRA	20
2.2. CORPOS DE PROVA PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	22
2.2.1. Normas técnicas: NBR 7190, ASTM D143, ASTM D905, ASTM D3931 e ISO 6238	
22	
2.2.2. EN 302-1	25
2.2.3. Outros Corpos de Prova	26
2.2.4. Corpo de prova IVALSA.....	32
3. ESTADO DA ARTE.....	35
3.1.1. Cisalhamento na madeira	35
3.1.2. Cisalhamento na linha de adesivo	40
3.1.3. Cisalhamento na linha de adesivo com reforço	49
4. OBJETIVOS	53
4.1. OBJETIVO GERAL	53
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	53
5. MATERIAIS E MÉTODOS	54
5.1. MATERIAIS	54
5.1.1. Madeira	54
5.1.2. Adesivos.....	56
5.1.3. Fibras	58
5.1.4. Compósitos	60
5.2. CORPOS DE PROVA	61
5.3. MODELAGEM NUMÉRICA	64
5.3.1. Considerações de Vinculação e Carregamento	64
5.3.2. Malha.....	67
5.3.3. Propriedades dos materiais	73
5.4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	75
5.4.1. Estudo analítico dos resultados de ensaio	76
5.4.2. Comparação estatística	77
6. RESULTADOS.....	80
6.1. NUMÉRICO.....	80
6.1.1. Corpo de prova IVALSA.....	84
6.1.2. Corpo de prova NBR.....	88
6.1.3. Corpo de prova ASTM	91

6.1.4. Fatores de correção	94
6.2. EXPERIMENTAIS	96
6.2.1. Corpo de prova IVALSA	97
6.2.2. Corpo de prova NBR	104
6.2.3. Corpo de prova ASTM	106
6.2.4. Comparação estatística entre as médias	109
7. CONCLUSÕES	112
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE I – RESULTADOS ESTATÍSTICOS MINITAB	120

1. INTRODUÇÃO

Segundo Ritter (1992), há, predominantemente, quatro tipos de solicitações podem ser observados quando uma viga de madeira é submetida à flexão simples: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, compressão normal às fibras nas regiões dos apoios e o cisalhamento horizontal (Figura 1).

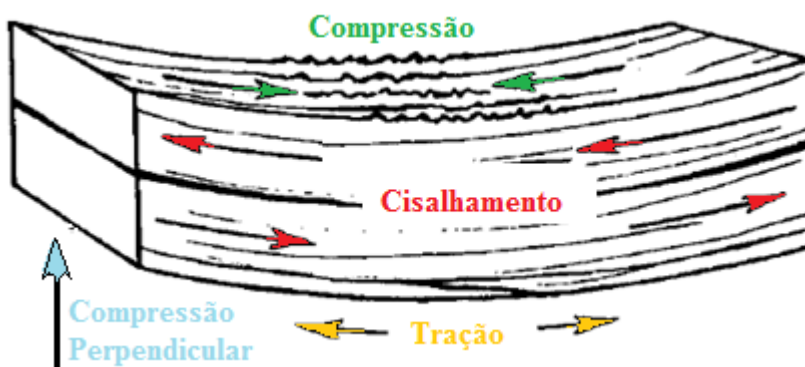


Figura 1. Viga em flexão simples
Fonte: Adaptado de Ritter (1992)

No caso de vigas de madeira submetidas a momentos fletores positivos, devido ao fato da madeira ter resistências à tração e à compressão muito próximas, muitas vezes a ruptura ocorre à tração, que no caso da madeira é uma ruptura frágil e não desejável para a segurança das estruturas.

Desta forma, a aplicação de fibras na região inferior, onde há tensões de tração, vem sendo implementada na engenharia de estruturas a fim de modificar este modo de ruptura de tração para compressão, dúctil, e assim obter maior segurança estrutural, no caso, por exemplo, em uma situação de evacuação de uma construção em ocorrência de falha estrutural. Além disso, com a aplicação de fibras com altos módulos de elasticidade e alta resistência à tração propõe-se melhorar a eficiência do elemento estrutural como um todo, reduzindo-se deslocamentos e aumentando-se a resistência última.

Nesse sentido, diversos estudos de vigas submetidas à flexão e reforçadas por fibras naturais e sintéticas têm demonstrado melhores desempenhos no Estado Limite de Serviço (ELS) em decorrência das altas propriedades de rigidez e no Estado Limite Último (ELU) em decorrência da alta resistência à tração destas fibras, aproveitando-se melhor as propriedades dos materiais envolvidos e mais importante, evitando a ruptura frágil da região tracionada da madeira, e, assim, melhorando a

segurança das estruturas (FIORELLI e DIAS, 2011; GARCIA *et. al.*, 2013; BERTOLINE, 2015; RAFTERY e RODD, 2015; DONADON, 2016).

Paralelamente, na Alemanha, foram realizadas inspeções em 428 estruturas em madeira com um total de 550 danos, conforme a Figura 2 que ilustra a estatística de falhas em estruturas de madeira naquele país. Nota-se que o cisalhamento obteve uma parcela importante das falhas, com 6% dos casos observados (FRESE e BLASS, 2011).

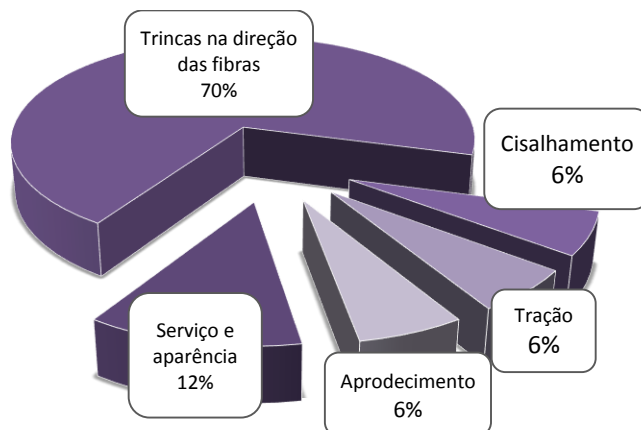


Figura 2. Tipos de falhas em estruturas de madeira
Fonte: Adaptado de Frese e Blass (2011)

Tendo em vista estes estudos, a caracterização da resistência ao cisalhamento da madeira e o correto dimensionamento para esta solicitação são aspectos importantes nos projetos de peças fletidas.

Em aplicações de projeto, a principal região de interesse para o dimensionamento ao cisalhamento é próxima os apoios onde os esforços cortantes atingem seus máximos valores (Figura 3).

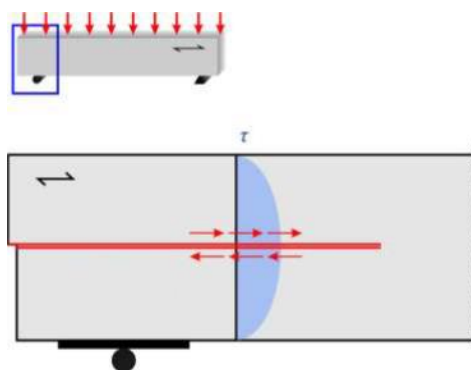


Figura 3. Região de máximos esforços cortantes
Fonte: Franke *et al.* (2015)

O dimensionamento ao cisalhamento torna-se ainda mais crítica quando há furos e reduções de seção próximos aos apoios (Figura 4).



Figura 4. Rupturas por cisalhamento próximas a furos ou diminuições de seção
Fonte: Franke *et al.* (2015)

Adicionalmente, as madeiras laminadas coladas (MLC) reforçadas por fibras (FRP) necessitam além do estudo da resistência ao cisalhamento da madeira, da resistência ao cisalhamento da ligação entre laminas madeira-madeira e da ligação madeira-reforço-madeira.

No dimensionamento de vigas de madeira laminada colada considera-se que as lâminas têm perfeita aderência, fazendo com que todas as lâminas trabalhem em conjunto como uma seção transversal contínua. Porém não é suficiente tal afirmação sem um teste padronizado e sem uma comparação consistente desta resistência.

Para a caracterização da resistência ao cisalhamento da linha do adesivo, ou entre madeira e reforço com fibra, é necessário que se faça uma comparação desta com a resistência ao cisalhamento da própria madeira estudada. Para Ritter (1992), a madeira laminada colada é fabricada com adesivos estruturais que desenvolvem uma resistência ao cisalhamento superior à resistência ao cisalhamento da madeira. Ou seja, $f_{gv} > f_{v0}$. E também, segundo a norma brasileira NBR 7190 “a resistência da junta colada dever ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira” (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1997, p. 32).

No entanto, atualmente, os testes normatizados para a caracterização ao cisalhamento refletem incertezas quanto à confiabilidade dos resultados. Segundo Adams *et al.* (2003) a maior deficiência de todos os testes de cisalhamento existentes recai na não ocorrência de cisalhamento puro e constante ao longo da seção

estudada. Para a aplicação de reforço de fibras, um agravante é que a distribuição das tensões no plano de cisalhamento pode variar para materiais com diferentes módulos de elasticidade e para diferentes espessuras de juntas.

E ainda, segundo Okkonen e River (1989), não se pode usar esse tipo de ensaio para se obter a resistência ao cisalhamento real da madeira maciça ou da colada, o que se obtém é a resistência ao cisalhamento aparente, referindo-se ao modelo da norma americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D143 (ASTM, 2003) e que é muito semelhante ao adotado pela norma brasileira de estruturas de madeira NBR 7190 (ABNT, 1997) e da ASTM D905 (ASTM, 2014).

Nesse cenário, o objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de corpos de prova padronizados e práticos (Modelo IVALSA; Modelo ASTM D905 e Modelo NBR 7190) para a caracterização da resistência ao cisalhamento de madeira laminada colada com reforço de fibras sintética e natural.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Cisalhamento nas peças fletidas de madeira

A madeira tem a característica intrínseca de ter propriedades distintas em diferentes direções, aproximando-se do comportamento de um material ortotrópico com direções definidas como na Figura 5 em longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T).

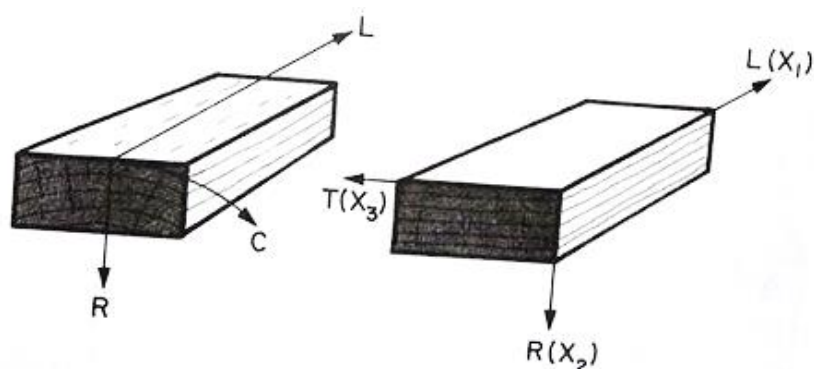


Figura 5. Direções ortotrópicas da madeira
Fonte: Bodig e Jayne (1982)

Pode-se definir todas as tensões que atuam em um corpo em três planos perpendiculares entre si (Figura 6). Desta forma, se obtém três tensões normais aos planos e seis tensões de cisalhamento. Utiliza-se a nomenclatura padronizada das tensões (σ_{ij}) em que para $i \neq j$ tem-se tensões tangenciais ou de cisalhamento, sendo que o primeiro índice “i” indica a direção normal a um plano e segundo índice “j” a direção tangencial a este plano, e para $i=j$ tem-se tensões normais em relação a um plano.

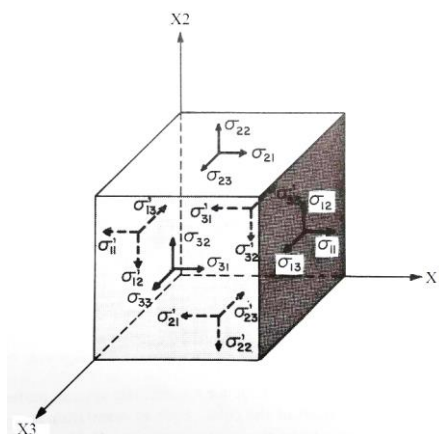
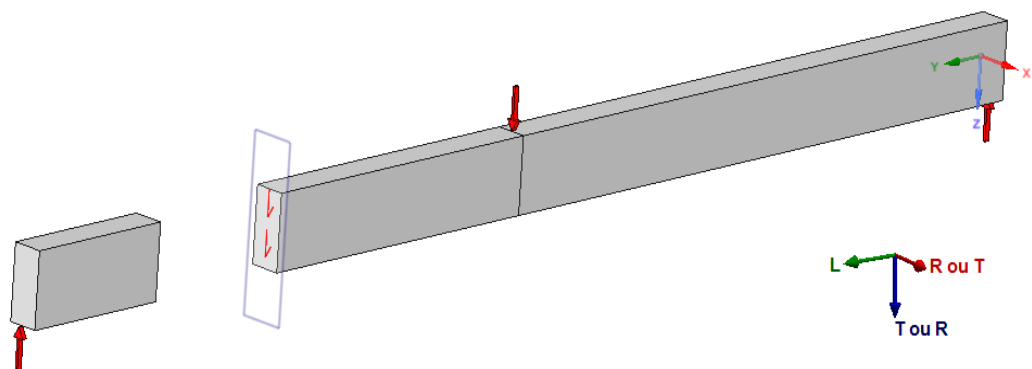
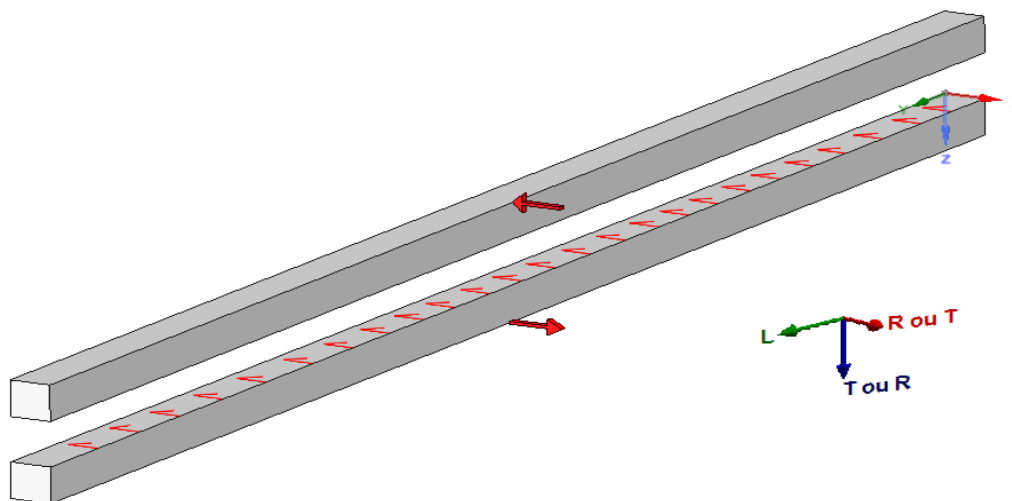


Figura 6. Tensões
Fonte: Bodig e Jayne (1982)

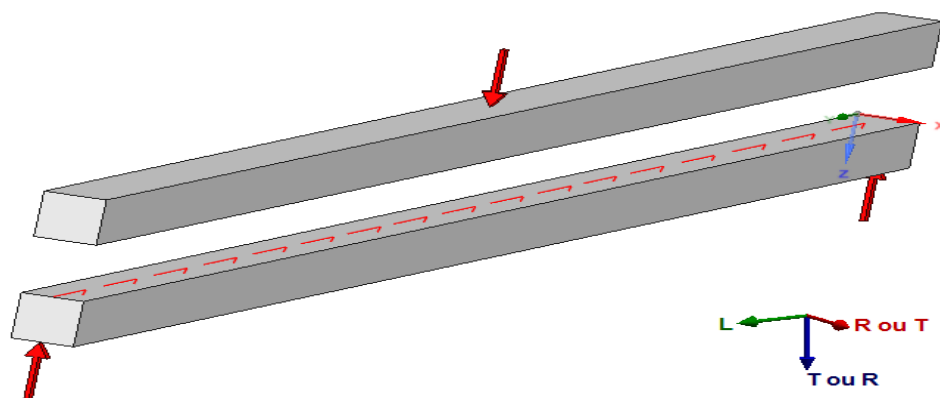
Destas seis parcelas de tensões cisalhantes, nas peças de madeira, existem três tipos de rupturas por cisalhamento que podem ocorrer, vertical (Figura 7 (a)), paralelo ou “rolling” (Figura 7 (b)) e horizontal (Figura 7 (c)).



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Tipos de cisalhamento (a) vertical (b) horizontal (c) paralelo
Fonte: Própria

No cisalhamento vertical, quando uma força atua na direção indicada na Figura 7(a), perpendicular à direção longitudinal das fibras (σ_{LT} ou σ_{LR}), a ruptura ocorre precocemente por compressão perpendicular, fazendo com que a madeira não atinja este tipo de ruptura. No cisalhamento paralelo ou “rolling” (σ_{TR} ou σ_{RT}) (Figura 7(b)) que produz a tendência das fibras escorregarem uma sobre as outras, geralmente é desconsiderado porque em condições usuais esse tipo de sollicitação não ocorre, decorrente da geometria da viga, sendo o sentido longitudinal das vigas coincidente com o sentido longitudinal das fibras da madeira. Sendo assim, o cisalhamento vertical e o paralelo normalmente não são considerados, sendo predominante o cisalhamento horizontal (σ_{TL} ou σ_{RL}) (Figura 7(c)) (RITTER, 1992).

Desta maneira, a direção de interesse para a caracterização é a que forneçam as resistências ao cisalhamento horizontal (σ_{TL} ou σ_{RL}).

2.2. Corpos de Prova para caracterização da resistência ao cisalhamento

2.2.1. Normas técnicas: NBR 7190, ASTM D143, ASTM D905, ASTM D3931 e ISO 6238

A norma Brasileira de projetos de estruturas de madeiras NBR 7190 (ABNT, 1997) propõe um corpo de prova para caracterização da resistência ao cisalhamento da madeira (Figura 8), similar ao da norma americana ASTM D143 (Figura 9) para caracterização da madeira maciça com corpos de prova pequenos (ASTM, 2014).

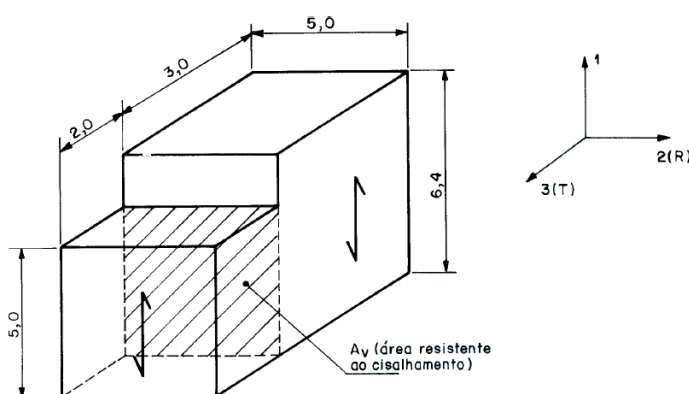


Figura 8. Corpo de Prova NBR 7190 (Dimensões em cm)
Fonte: ABNT (1997)

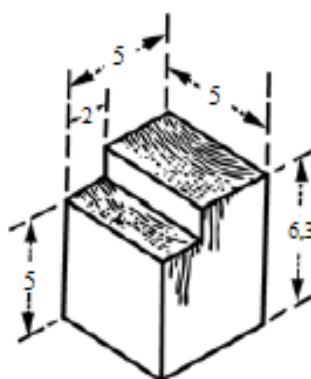


Figura 9. Corpo de prova ASTM - D 143 (Dimensões em cm)
 Fonte: Adaptado de ASTM (2014)

Ainda na norma brasileira, o mesmo corpo de prova é proposto para a caracterização da linha de adesivo, com a única troca da área resistente ao cisalhamento pela linha de adesivo (Figura 10).

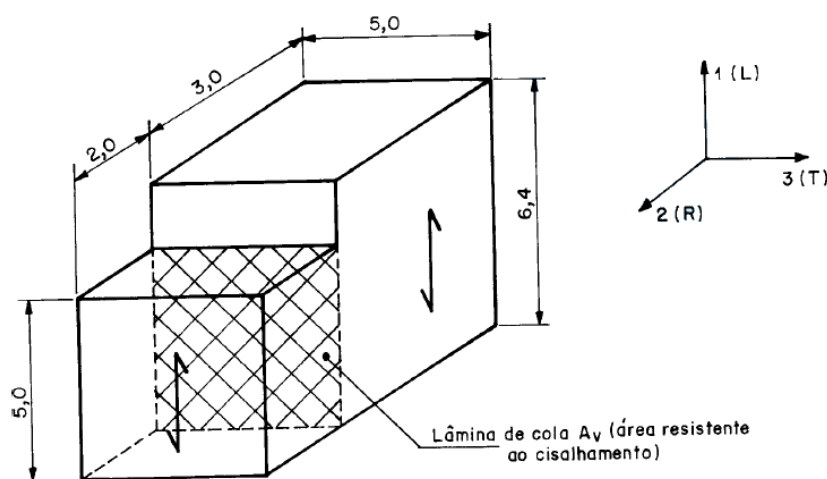


Figura 10. Corpo de prova linha do adesivo NBR 7190 (Dimensões em cm)
 Fonte: ABNT (1997)

Por outro lado, nos Estados Unidos há duas normas específicas para a caracterização da resistência ao cisalhamento. Para a caracterização das ligações com juntas finas, a ASTM D905, e com juntas grossas, a ASTM D3931, que continua sendo uma caracterização ao cisalhamento na compressão, porém adota uma geometria diferente da do corpo de prova para a caracterização da madeira (Figura 11 e 12) (ASTM, 2003; ASTM, 2008).

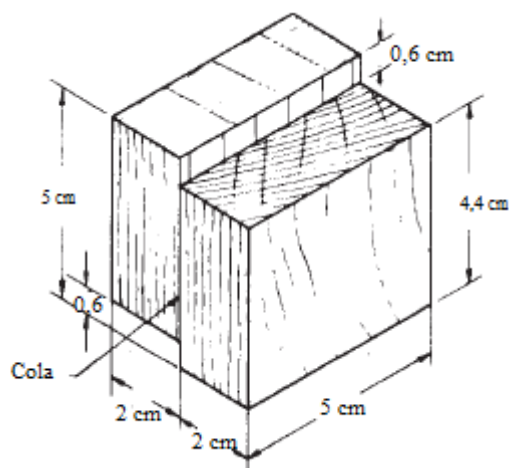


Figura 11. Corpo de prova ASTM D905
 Fonte: Adaptado de ASTM (2003)

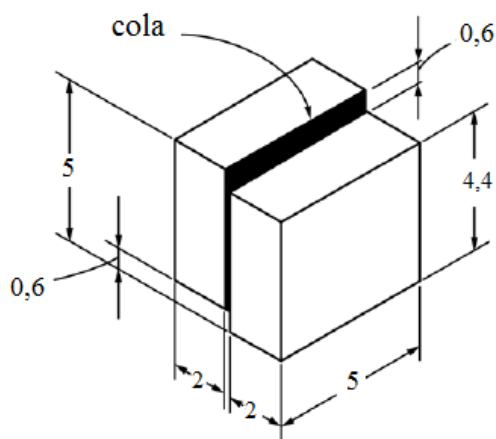


Figura 12. Corpo de prova ASTM D3931 (Dimensões em cm)
 Fonte: Adaptado de ASTM (2008)

O corpo de prova proposto pela ISO (*International Organization for Standardization*) 6238 segue os mesmos padrões da normativa americana com diferenças nas dimensões e com duas opções de tamanho: o normal e o reduzido. Na Figura 13, “a” representa a direção das fibras, a norma apresenta duas dimensões possíveis para o corpo de prova as duas com o T igual a 20 mm, uma com $L \times W = 40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ou uma versão reduzida de $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (Figura 14) (ISO, 2001).

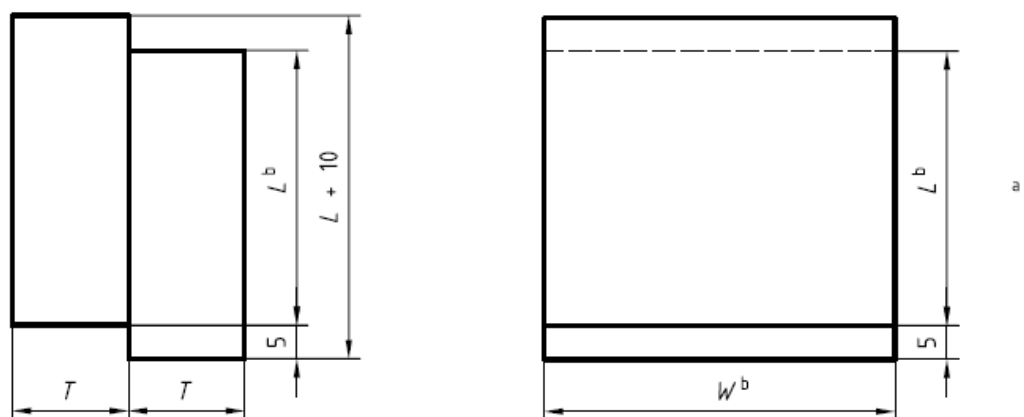


Figura 13. Corpo de Prova ISO 6238
Fonte: ISO (2001)

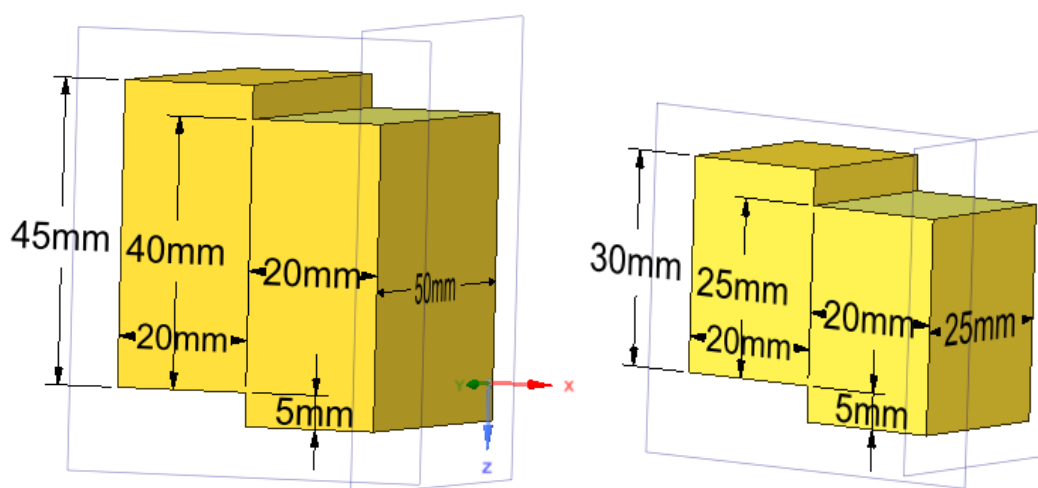


Figura 14. Representação 3D da geometria e dimensões do corpo de prova da ISO 6238
Fonte: Própria

2.2.2. EN 302-1

Em contraste aos corpos de prova de cisalhamento por compressão dos Estados Unidos e Brasil, o corpo de prova para caracterização ao cisalhamento na linha do adesivo da norma europeia EN 302-1 (Figura 15) se trata de cisalhamento em um corpo de prova à tração (European Committee for Standardization (CEN), 2004). A Figura 15 a) se refere a compósitos finas e a Figura 15 b) a compósitos espessos.

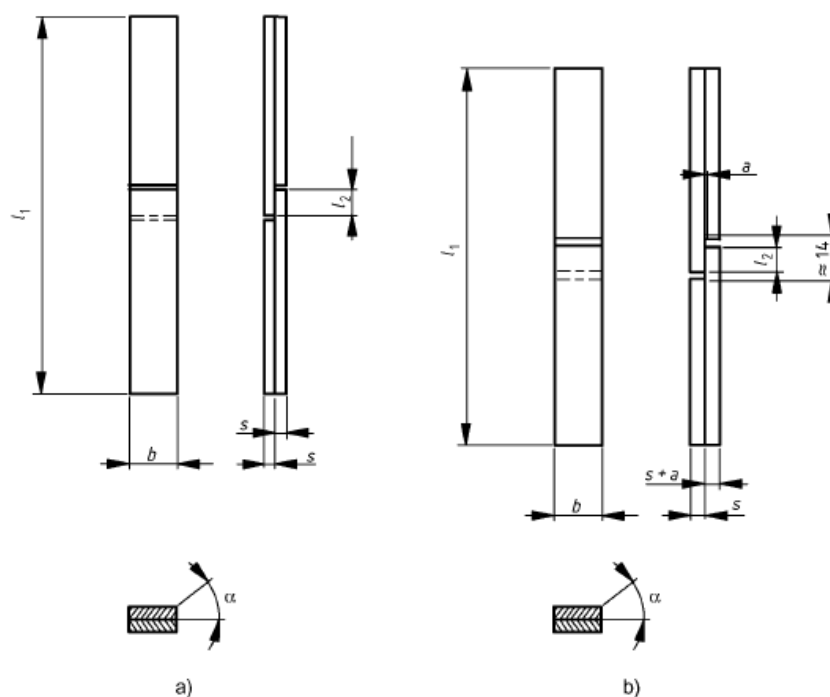


Figura 15. Corpo de prova europeu
Fonte: CEN (2004)

Onde:

$l_1 = (150 \pm 5)$ mm, longitudinal as fibras;

$b = (20 \pm 0,1)$ mm;

$l_2 = (10 \pm 0,1)$ mm;

$s = (5 \pm 0,1)$ mm;

$\alpha = 30^\circ$ à 90° , anéis de crescimento;

$a = (1 \pm 0,1)$ mm.

2.2.3. Outros Corpos de Prova

Existem alguns modelos que foram desenvolvidos para a caracterização ao cisalhamento de matérias compósitos por apresentarem distribuição de cisalhamento constante no plano de cisalhamento. Estes tipos de corpos de prova apresentam melhores resultados para a resistência ao cisalhamento, e em alguns também é possível aferir as deformações, porém são menos utilizados para compósitos de madeira pela complexidade de realização em laboratório. São exemplos, a ASTM D4255 (Figura 16), o ASTM D 5379 (Figura 17) também chamado de Iosipescu, nome de seu criador, o Arcan (Figura 18) e o Arcan Modificado (Figura 19).

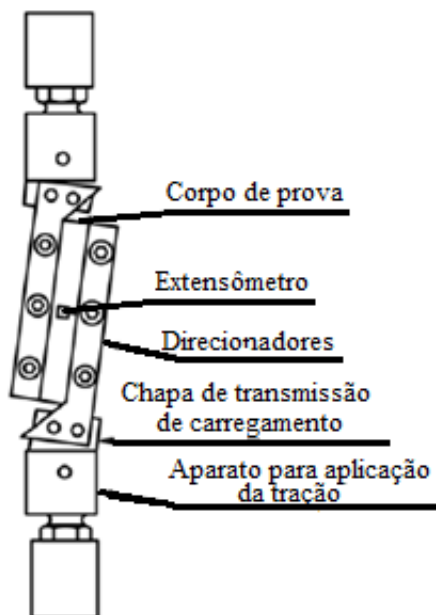


Figura 16. Aparato e corpo de prova ASTM D4255
Fonte: ASTM (2015)

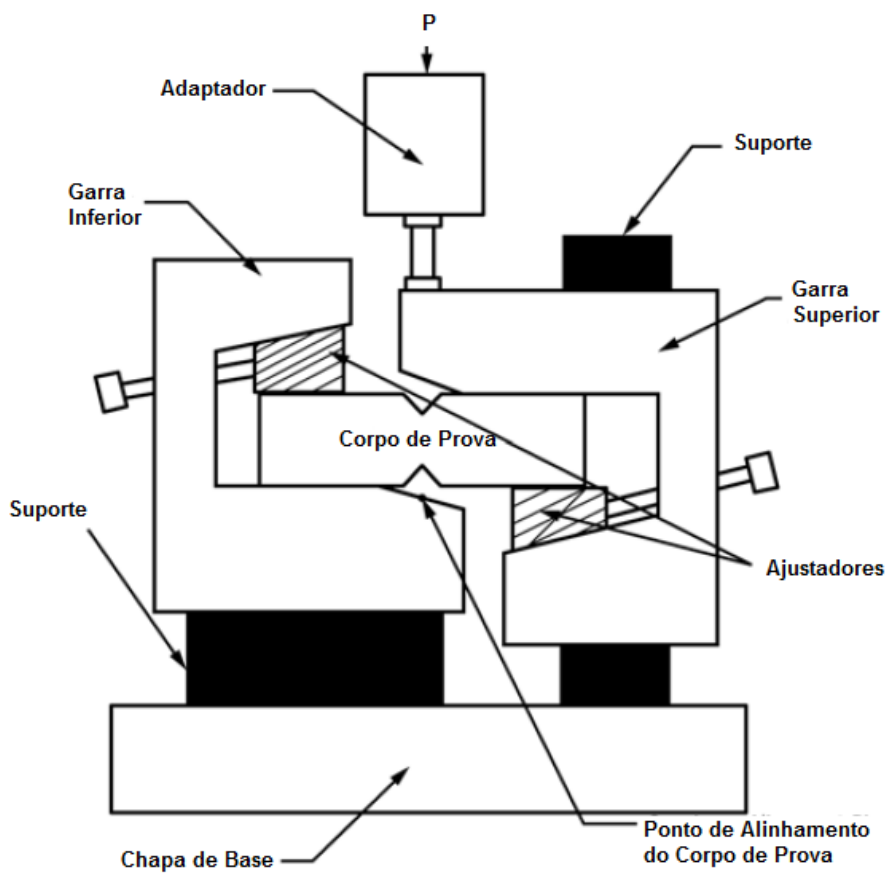


Figura 17. Aparato e corpo de prova ASTM D 5379
Fonte: Adaptado de ASTM (2012)

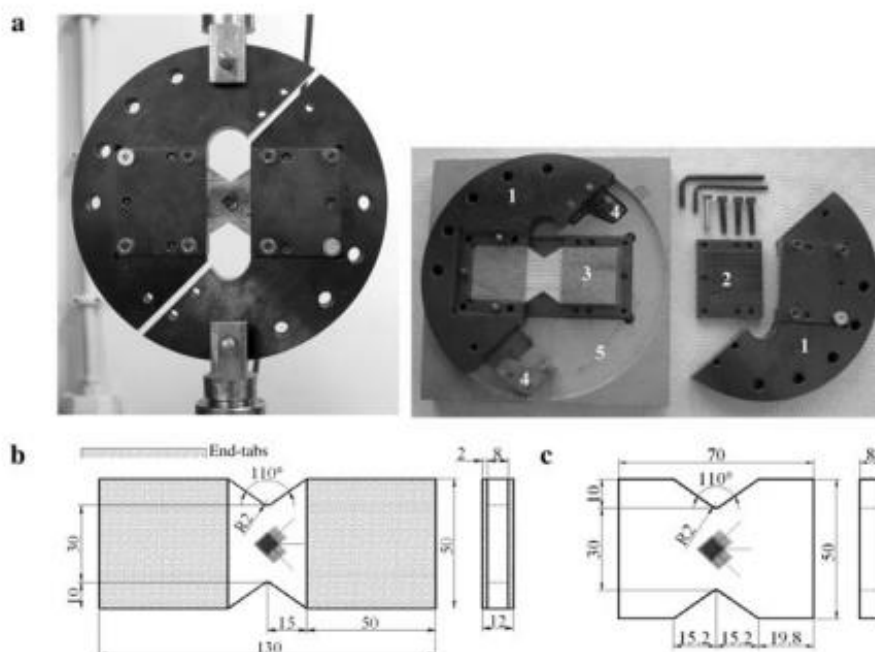


Figura 18. a) Aparato Arcan 1. Partes esquerda e direita do aparato; 2. Ajustador; 3. Corpo de prova; 4. Chapa de contenção; 5. Molde. b) corpos de prova nas direções LT e LR. c) corpo de prova na direção RT
Fonte: Xavier *et al.* (2008)

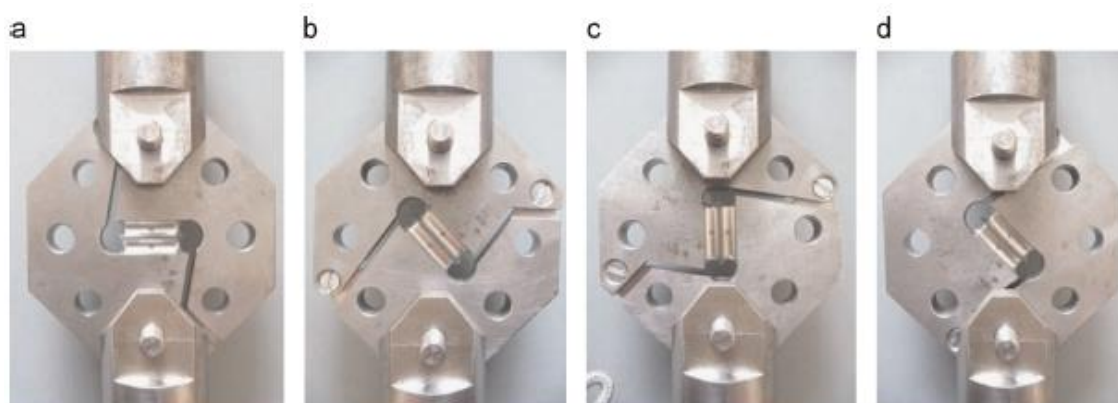


Figura 19. Configurações do ensaio a) tração; c) cisalhamento; b) e d) tração + cisalhamento
Fonte: Créac'hcadec *et al.* (2015)

Nogueira (2017) propõe um ensaio de cisalhamento para o controle de qualidade da madeira laminada colada. O procedimento tem como referência a normativa EN 392 (CEN, 1997). A intenção é verificar a resistência ao cisalhamento em cada uma das lâminas da madeira laminada colada (Figura 20).

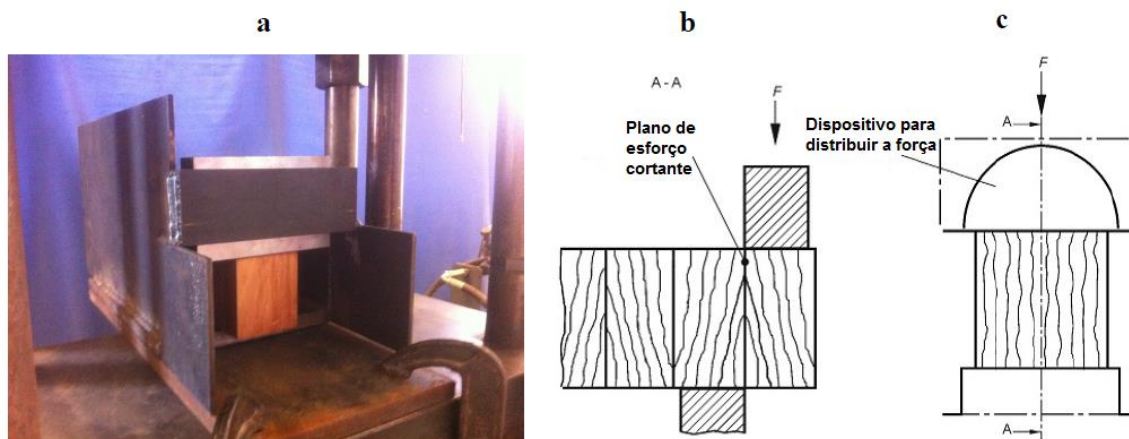


Figura 20. Corpo de prova e aparato de ensaio
Fonte: Nogueira (2017)

Derikvand e Pangh (2016) observaram que os corpos de prova mais utilizados para a caracterização da resistência ao cisalhamento da linha do adesivo (o proposto na ASTM D905 e o da EN-302-1) conferem muitos erros dimensionais em suas confecções gerados pela necessidade dos cortes. Então, os autores sugeriram outro formato de corpo de prova o MD *Block shear*, utilizando uma peça menor colada, o corpo de prova estaria pronto para ensaio sem a necessidade de cortes (Figura 21), o aparato de ensaio também é proposto pelos autores (Figura 22).

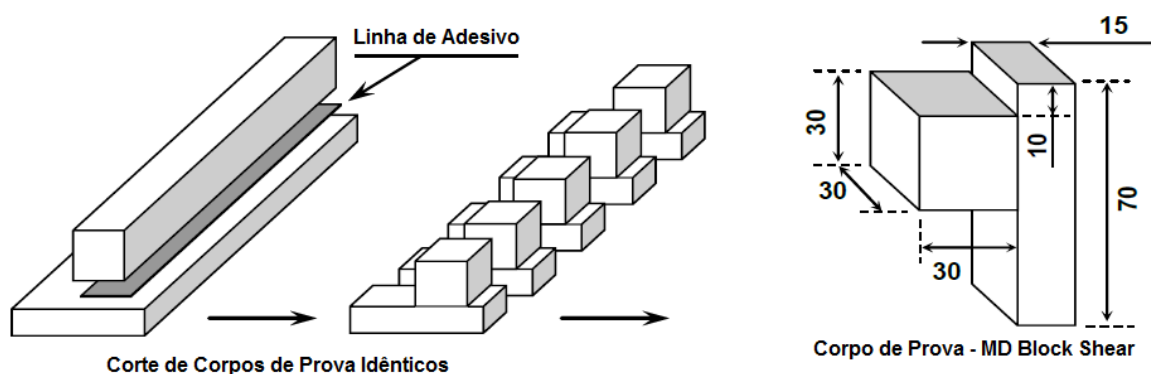


Figura 21. Corpo de prova MD *Block Shear*
Fonte: Derikvand e Pangh (2016)

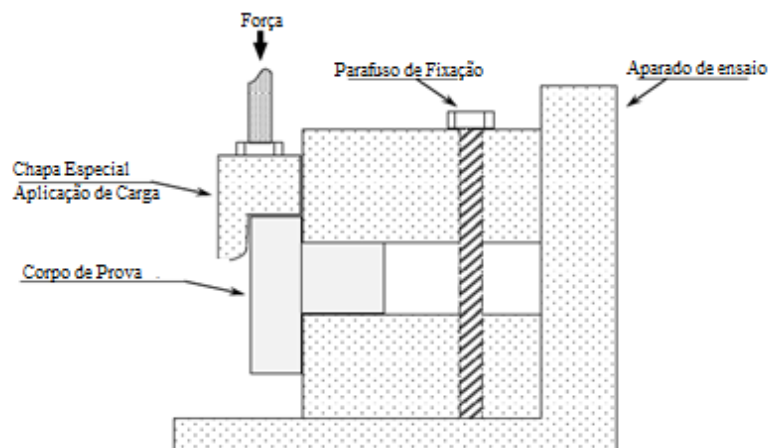


Figura 22. Aparato de ensaio MD *Block Shear*
Fonte: Derikvand e Pangh (2016)

No LEE (Laboratório de Experimentação em Estruturas) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) desenvolveu-se um corpo de prova para a caracterização da resistência ao cisalhamento da madeira baseado em uma norma francesa (Figura 23) e posteriormente adicionou-se extremidades circulares nos entalhes (Figura 24) (SANTOS NETO, 1999).

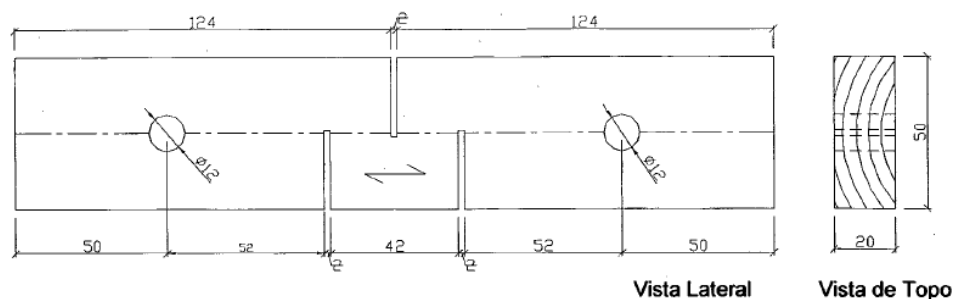


Figura 23. LEE/Ufsc (Dimensões em mm)
Fonte: Santos Neto (1999)

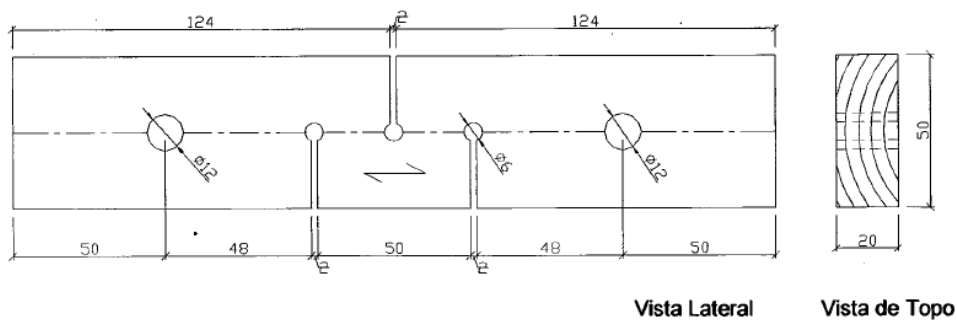


Figura 24. LEE/Ufsc Modificado (Dimensões em mm)
Fonte: Santos Neto (1999)

Observa-se também em trabalhos experimentais a adoção de um corpo de prova com duplo plano de cisalhamento, similar ao corpo de prova para ligações metálicas da NBR 7190 (Figura 26) (ABNT, 1997), que era adotado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) antigamente chamado de corpo de prova estrutural (Figura 25) (SANTOS NETO, 1999).

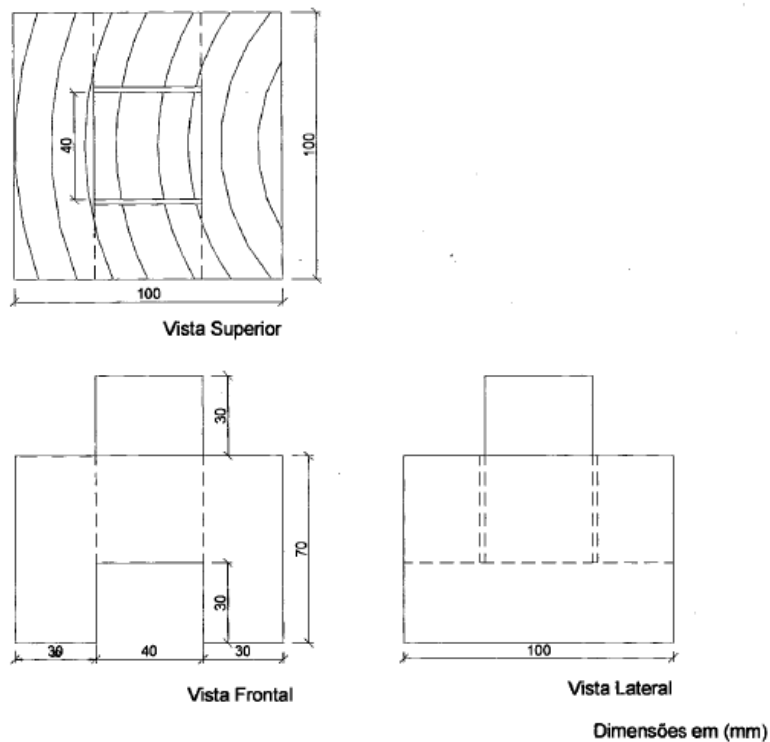


Figura 25. Corpo de prova adotado pelo IPT
Fonte: Santos Neto (1999)

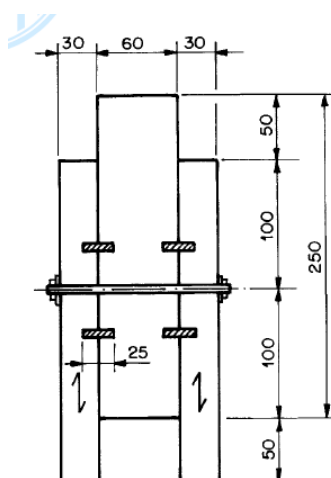


Figura 26. Corpo de prova para ligações metálicas
Fonte: ABNT (1997)

2.2.4. Corpo de prova IVALSA

Lavisci *et al.* (2001) propôs uma metodologia de ensaio a fim de avaliar a eficácia das colagens usadas para a consolidação de madeiras antigas no processo de recuperação dos antigos edifícios europeus. Segundo eles, por se tratar de aplicação em loco dos adesivos, a espessura de colagem não era tão fina quanto às produzidas em fábrica para a produção das madeiras laminadas coladas, por esse motivo, as normativas EN 301 e EN 302 ou ASTM D 2559 não atendiam esse tipo de aplicação.

Os autores testaram corpos de prova à tração (Figura 27) e à compressão (Figura 28) em três diferentes configurações (A) assimétrico com carga em um lado, (B) simétrico com carga no adesivo (C) simétrico com carga fora do adesivo.

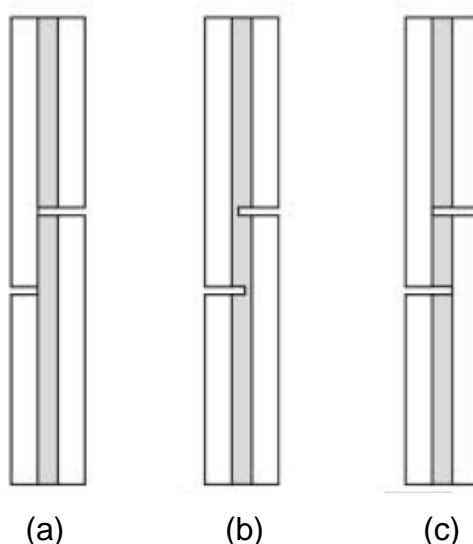


Figura 27. Corpos de prova baseados na EN 302-1
Fonte: Lavisci *et al.* (2001)

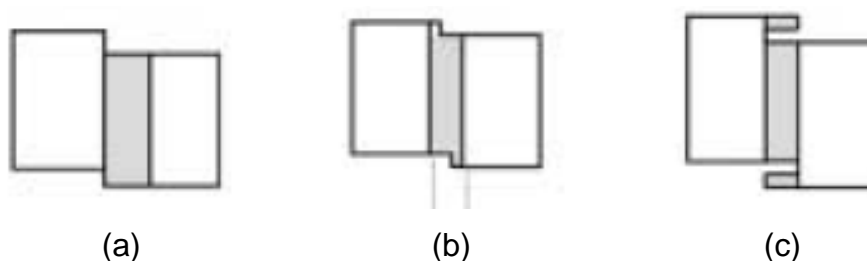


Figura 28. Corpos de prova baseados na ASTM D 3931 ou D 905
Fonte: Lavisci *et al.* (2001)

Primeiramente, os autores verificaram que os corpos de prova ensaiados à tração apresentaram resistência inferior aos corpos de prova a compressão, uma

teoria é que eles foram mais influenciados por tensões normais atuando no plano de cisalhamento, observado anteriormente por Strickler (1968) apud Levisci *et al.* (2001).

Em seguida, dentre os corpos de prova à compressão foi observado que considerando os tipos de ruptura a configuração C apresentou os melhores resultados, na configuração A o número de corpos de prova com ruptura cruzando a linha de adesivo é o maior, enquanto na configuração B foi observada uma tendência do deslocamento da ruptura para a parte inferior da superfície cisalhante, o que pode resultar em uma área maior. Por fim, na configuração C observou-se rupturas mais claras próximas à uma das duas interfaces sugerindo uma mais correta distribuição do carregamento.

Continuando este estudo, Pizzo *et al.* (2003a), modifica um pouco o corpo de prova, para um corpo de prova, dois em um, ensaia-se primeiro a linha de adesivo e depois se ensaia um dos lados a madeira.

O objetivo dessa nova metodologia é diminuir a interferência da variabilidade da madeira, aferindo, em um mesmo corpo de prova a resistência da linha de adesivo (Figura 29) e posteriormente da madeira (Figura 30).

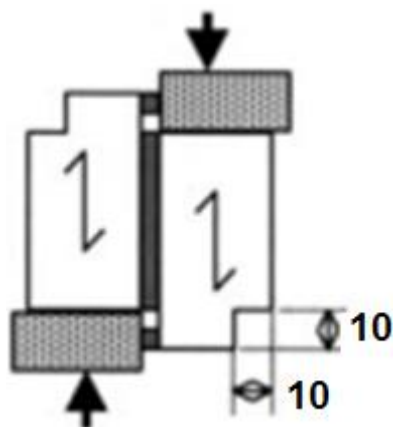


Figura 29. Ensaio do compósito
Fonte: Pizzo *et al.* (2003a)

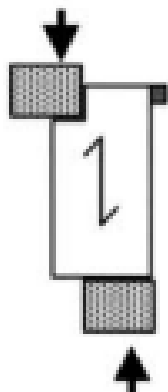


Figura 30. Ensaio da madeira
Fonte: Pizzo et al. (2003a)

Como este corpo de prova foi desenvolvido em conjunto por pesquisadores do CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*) - IVALSA (*Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, Sesto Fiorentino, Florença, Itália*), por esta razão foi intitulado IVALSA neste trabalho.

3. ESTADO DA ARTE

3.1.1. Cisalhamento na madeira

Santos Neto (1999) estudou experimentalmente e numericamente o corpo de prova da norma brasileira da NBR 7190 (ABNT, 1997) para ensaio da madeira maciça, o corpo de prova do LEE e o LEE modificado (Figura 31) sendo que as espécies de madeira ensaiadas foram *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Foram confeccionados corpos de prova com cisalhamento nas direções LT e LR para conseguir observar possíveis diferenças no comportamento nessas direções.

Para o modelo numérico foi utilizado o programa comercial SAP 2000, o elemento escolhido foi o elemento sólido de 8 nós. A madeira foi modelada como um material ortotrópico, considerando-se o comportamento elástico linear.

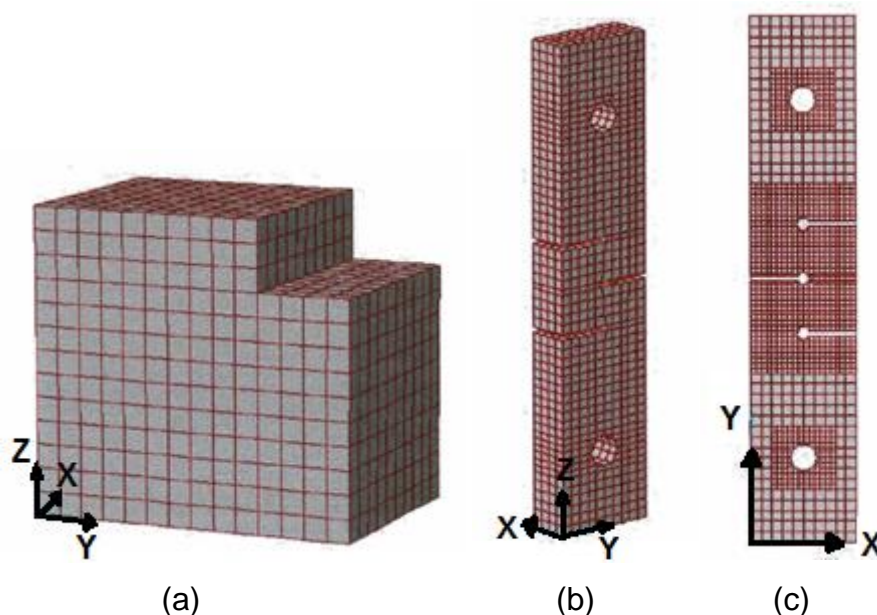


Figura 31. Malha utilizada por Santos Neto a) NBR b) LEE c) LEE modificado (1999)
Fonte: Neto (1999)

O carregamento foi aplicado à todos os corpos de prova de forma a desenvolver uma tensão cisalhante teórica constante no plano de 6 MPa, relativa ao valor médio de ruptura obtida nos ensaios experimentais. Nas Figuras 32, 33 e 34, apresentam-se a distribuição da tensão cisalhante para este nível de sollicitação em regime elástico-linear ao longo do plano para os três corpos de prova estudados.

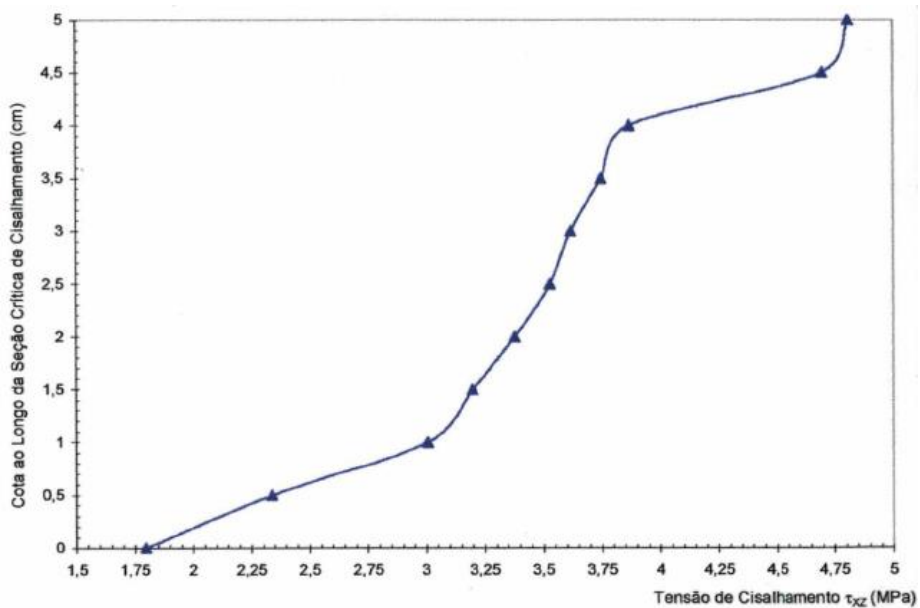


Figura 32. Distribuição da tensão de cisalhamento NRB 7190
Fonte: Santos Neto, 1999

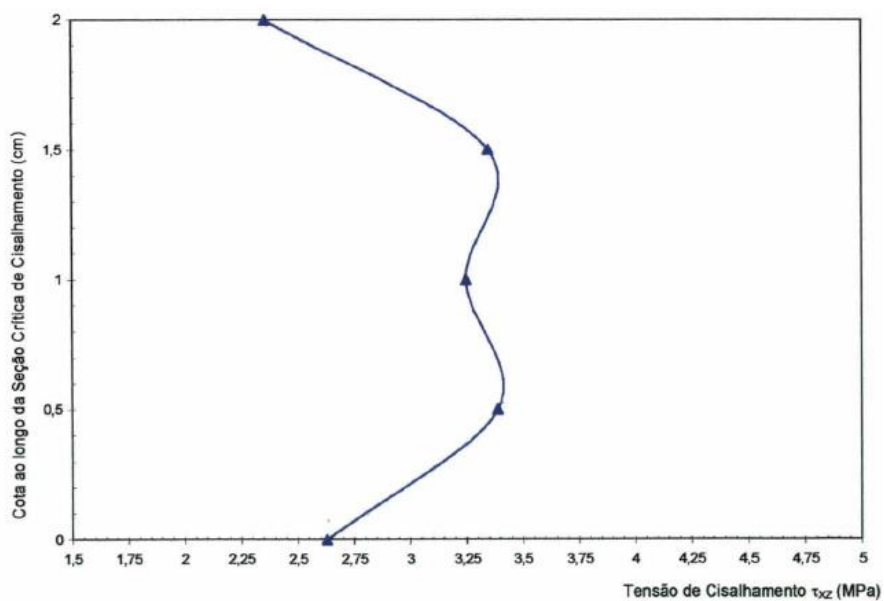


Figura 33. Distribuição da tensão de cisalhamento LEE
Fonte: Santos Neto, 1999

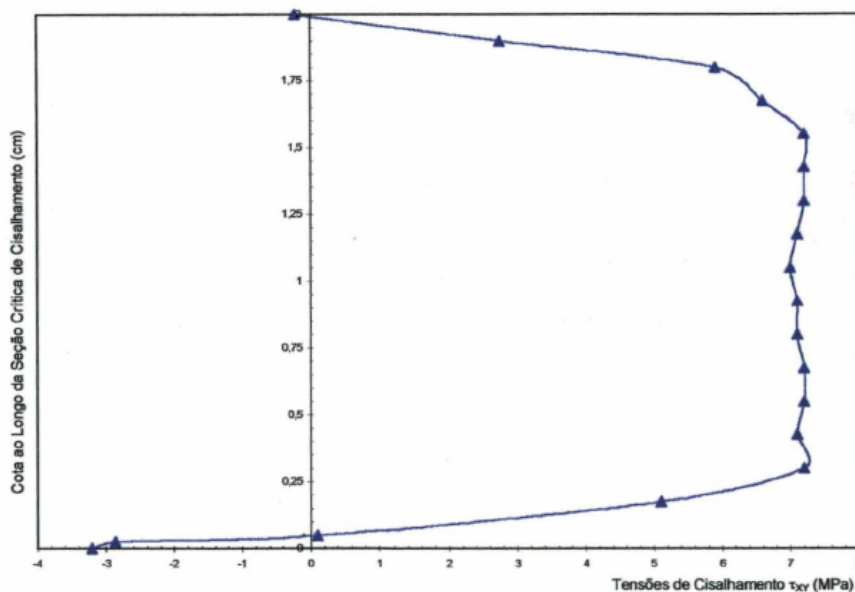


Figura 34. Distribuição da tensão de cisalhamento LEE Modificado
Fonte: Santos Neto (1999)

Foi observado que o corpo de prova que obteve um melhor desempenho quanto à uniformidade da tensão cisalhante no plano de cisalhamento foi o corpo de prova LEE-Modificado, porém, ressalta-se que essa diferença possa ter ocorrido em função da diferença entre as malhas.

Para o corpo de prova da norma brasileira aparece de forma expressiva uma tensão normal perpendicular ao plano de cisalhamento, de tração na região superior e compressão na região inferior do corpo de prova (Figura 35).

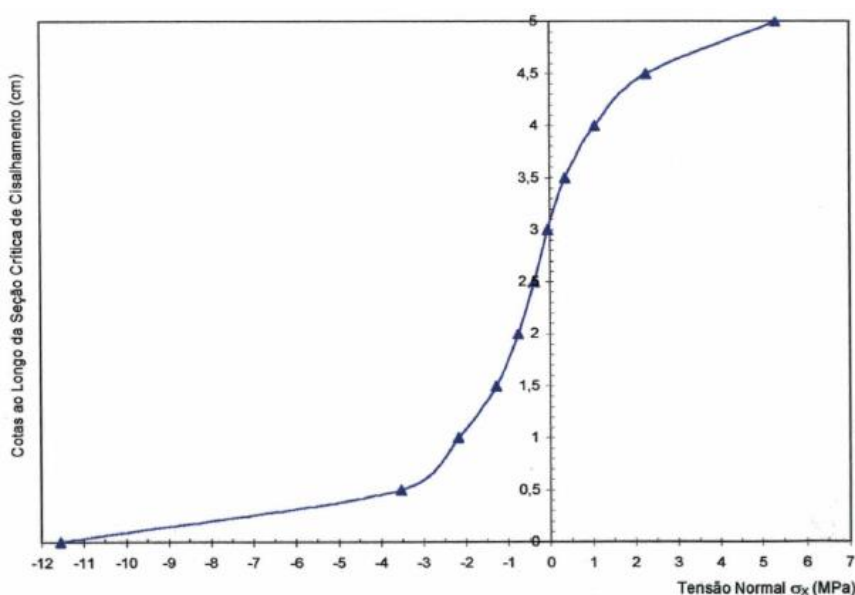


Figura 35. Distribuição da Tensão Normal em x NBR 7190
Fonte: Santos Neto (1999)

Esse fenômeno é gerado pelo binário gerado devido à excentricidade da aplicação do carregamento (Figura 36). Enquanto, os corpos de prova LEE e LEE-Modificado não apresentam este comportamento.

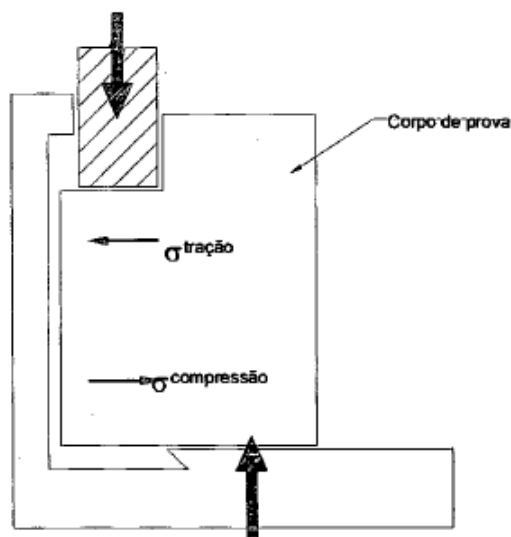


Figura 36. Esforços em função da presença do Binário
Fonte: Mendes (1984) *apud.* Santos Neto (1999)

Por outro lado, os corpos de prova LEE apresentaram maiores concentrações de tensões de tração na direção de aplicação da força, que podem gerar rupturas por tração. Por esse motivo foi desenvolvido o corpo de prova LEE-Modificado, com furos, apresentando uma minoração significativa desses esforços. As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os resultados para cada um dos três corpos de prova.

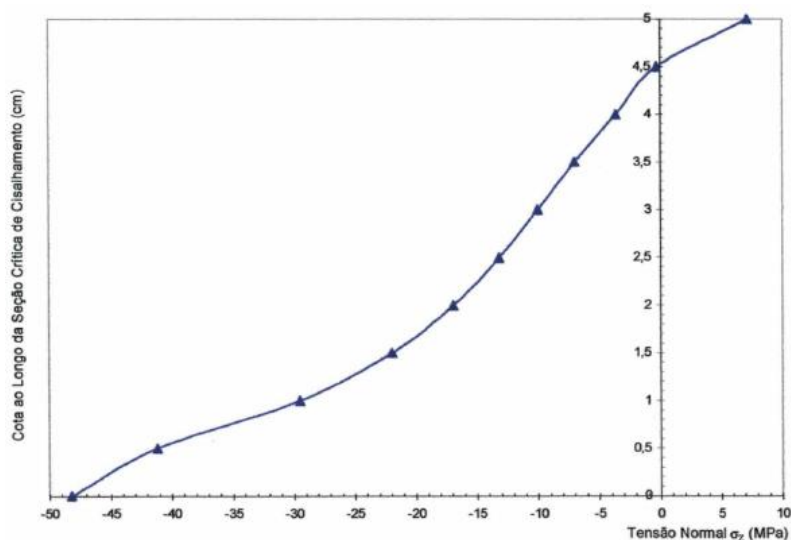


Figura 37. Distribuição da Tensão normal em z NBR
Fonte: Santos Neto, 1999

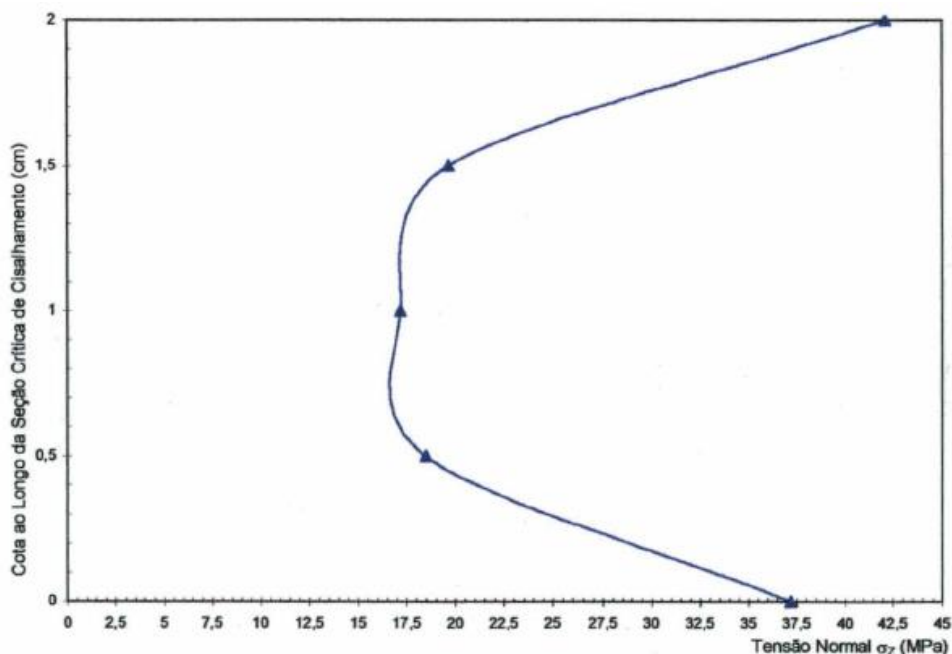


Figura 38. Distribuição da Tensão normal em z LEE
Fonte: Santos Neto, 1999

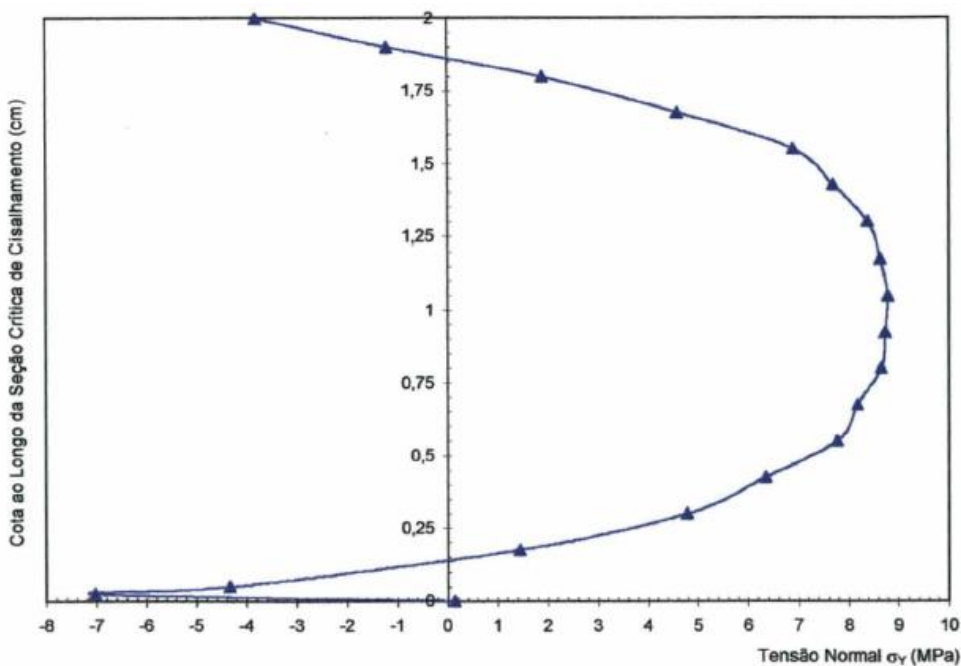


Figura 39. Distribuição da Tensão normal em z LEE modificado
Fonte: Santos Neto, 1999

Sretenovic *et al.* (2004) compararam resultados experimentais com modelagem numérica utilizando duas espécies de madeira (*Norway spruce* e *European larch*) e dois tipos de ensaio, o proposto na ASTM 143 (Figura 9) e o proposto na ASTM 4255 (Figura 16).

O modelo numérico proposto pelos autores foi 3D no *software* comercial ABACUS®. Para a modelagem numérica foi considerado comportamento linear e elástico do material, justificado pela ocorrência de ruptura frágil no cisalhamento, sem uma deformação plástica considerável. As diferenças de uma análise não-linear para linear de carregamento foram de 3% para ASTM D143 e de 5% para ASTM 4255, no entanto, para ambos os casos a simulação foi linear.

Os autores concluíram que o corpo de prova da ASTM D143 apresenta das influências mais expressivas devido aos esforços normais. Estas tensões normais provocam uma diminuição na tensão de cisalhamento e resulta em resultados superiores de resistência. Pelo mesmo motivo, o corpo de prova da ASTM D143 apresenta uma distribuição da tensão cisalhante no plano menos homogêneo e mais distante da teórica. Por esse motivo, os autores consideram o corpo de prova da ASTM D4255 mais adequado em relação ao corpo de prova da ASTM D143 (Figura 40).

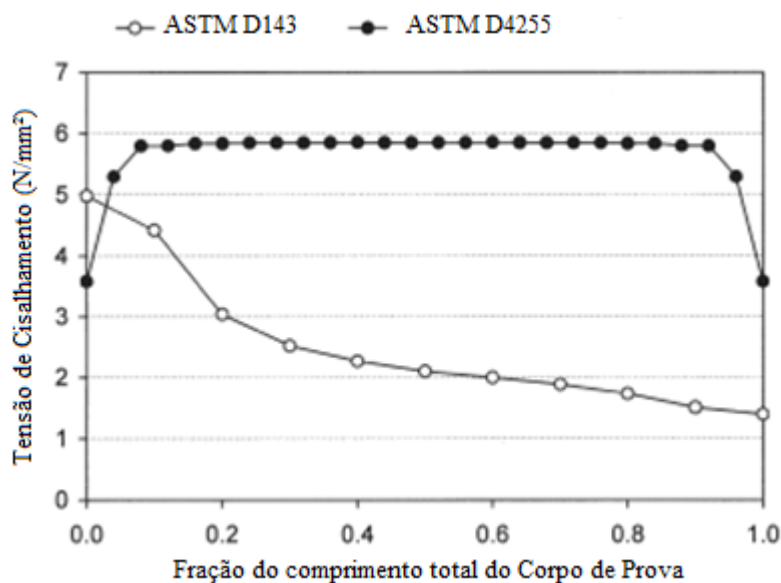


Figura 40. Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da espessura dos corpos de prova
Fonte: Adaptado de Sretenovic *et al.* (2004)

3.1.2. Cisalhamento na linha de adesivo

Okkonen e River (1989) estudaram os corpos de prova propostos pela ASTM D143 (madeira maciça), ASTM D905 (colada) e uma versão reduzida da ASTM

D905. Os ensaios foram realizados em quatro espécies de madeira: *Southern Pine*, *Douglas-fir*, *White oak* e *Hard Maple*.

Após a análise estatística dos dados, os autores concluíram que não se pode usar esse tipo de ensaios (tanto o proposto pela ASTM D143, quanto pela ASTM D905 e também pela ASTM D905) para se obter a resistência ao cisalhamento real da madeira maciça ou da colada, o que se obtém é a resistência ao cisalhamento aparente.

Os fatores tamanho do corpo de prova e tipo do corpo de prova foi um dos fatores que influenciaram na resistência ao cisalhamento, portanto eles recomendam que, se a comparação entre a madeira colada e a madeira sólida é necessária, deve-se usar para ambos ensaios o corpo de prova com duplo dente, proposta pela ASTM D905, com as mesmas dimensões, entendendo que com o uso do corpo de prova reduzido serão obtidas resistências superiores.

Serrano (2004) realizou um estudo numérico com modelagem em NLFM (*Non Linear Fracture Mechanics*), o *software* utilizado foi o ABACUS®. Para a modelagem foi considerada a propagação da fratura e chegou-se a uma força de ruptura para cada um dos adesivos e corpos de prova estudados. Os corpos de prova estudados foram os EN 302-1, ASTM D905, já citados anteriormente e ainda, o ASTM D4680 que é similar ao D905, mas com diferenças no procedimento de ensaio e o ASTM D3535 que é um corpo de prova com múltiplas áreas de cisalhamento. Para cada corpo de prova foram considerados “erros” como excentricidades e angulações que podem ocorrer na prática laboratorial. Os adesivos considerados foram fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), Poliuretano (PUR) e formulações à base de acetato de polivinilo (PVA).

A resistência local (resistência ao cisalhamento do adesivo), a energia de fratura no cisalhamento, a ductilidade do adesivo e as curvas tensão x deslizamento de cada adesivo para cisalhamento e normal foram adotadas de acordo com trabalhos anteriores.

Concluiu-se que o corpo de prova da ASTM D905 subestima a resistência de adesivos com comportamento mais frágil como o PRF e faz com que os resultados para as resistências da ligação sejam muito inferiores à resistência local da resina. Por isso, aconselha o uso da EN 302-1. No entanto, Serrano (2004) evidência a influência da tração normal deste corpo de prova (Figura 41). Alguns resultados para

resistência e a resistência normalizada podem ser encontrados na Tabela 1. As distribuições de tensões podem ser observadas nas Figuras 42 e 43.

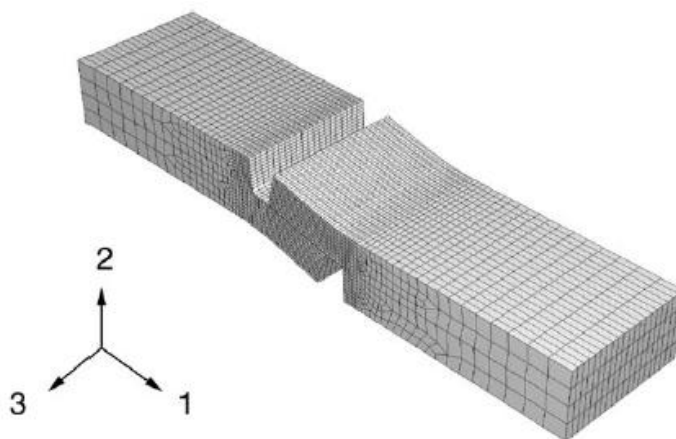


Figura 41. Estado deformado do EN 302-1 (fator de aplicação de 10x)
Fonte: Serrano (2004)

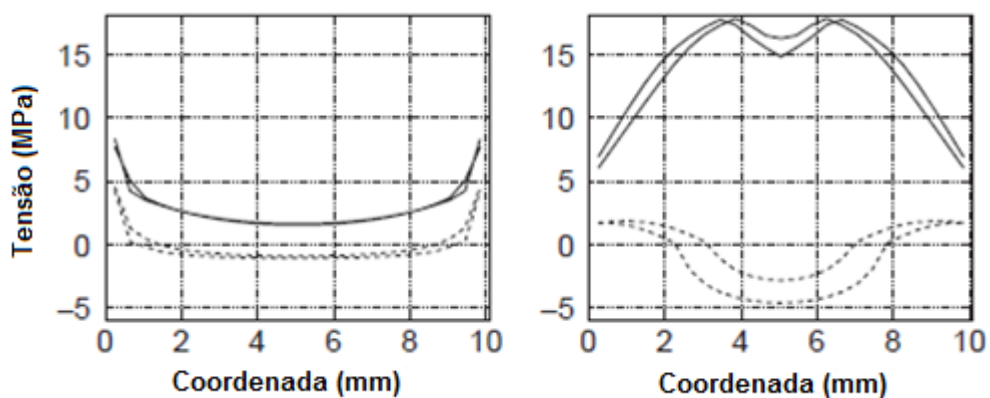


Figura 42. Distribuição de tensões para EN 302-1, à esquerda estado elástico linear e à direita no máximo carregamento. Linha sólida indica tensão cisalhante e tracejada tensão normal.
Fonte: Adaptado de Serrano (2004)

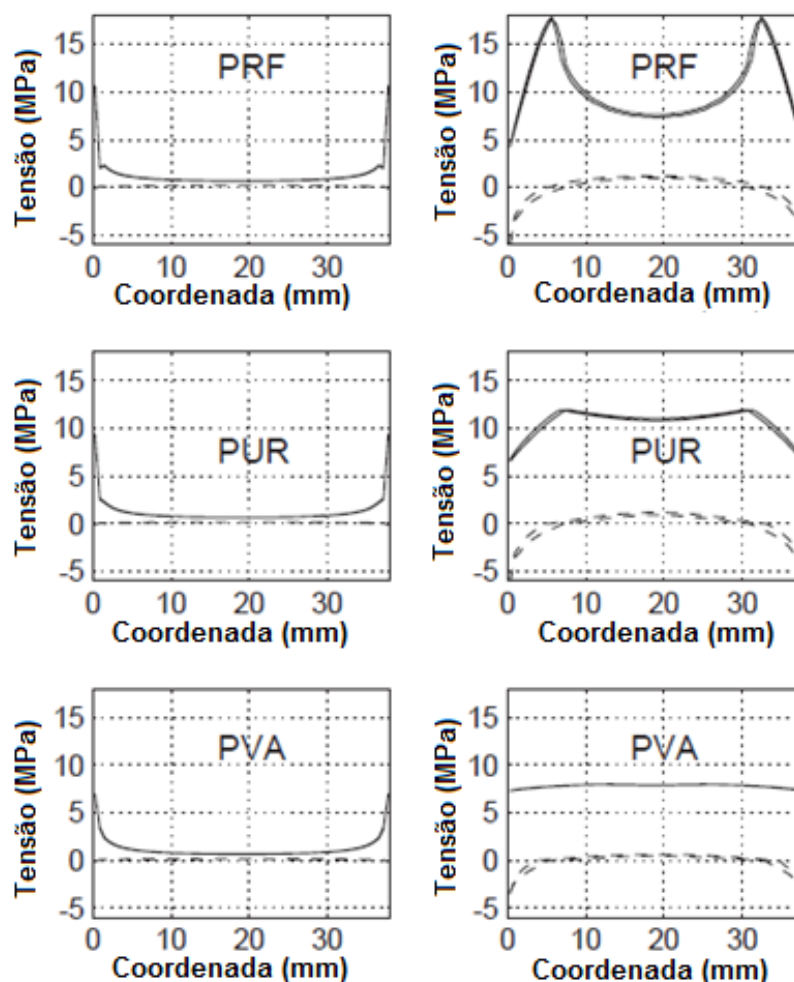


Figura 43. Distribuição de tensões para ASTM D905, à esquerda estado elástico linear e à direita no máximo carregamento. Linha sólida indica tensão cisalhante e tracejada tensão normal.
Fonte: Adaptado de Serrano (2004)

Ainda, segundo o autor, a resistência da ligação é dependente da resistência do adesivo, mas não somente deste parâmetro, outros fatores influenciam nesta resistência, como o tamanho da área cisalhante, a energia de fratura, a rigidez do aderente e a curva tensão x deslocamento.

Neste sentido, para comparar a resistência da ligação com a resistência local, criou-se a resistência normalizada, que se trata da razão da ligação macroscópica em relação à resistência local do adesivo. Foram também aferidos duas resistências locais, uma calculada pela média dos resultados numéricos no plano e a outra correspondente à razão entre a força de ruptura e a área de cisalhamento. Alguns destes resultados, podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Resistência ao Cisalhamento

Situação	Adesivo	τ (MPa)	τ^*
D905 com atrito ($\mu = 0,3$)	PRF	10,2	0,57
	PUR	10,6	0,88
	PVA	7,8	0,98
D905 sem influências	PRF	8,61	0,47
	PUR	9,41	0,79
	PVA	7,47	0,96
D905 com excentricidade de 4 mm	PRF	8,46	0,47
	PUR	9,50	0,79
	PVA	7,71	0,96
EN 302-1 sem influências	PRF	13,66	0,76
	PUR	11,20	0,93
	PVA	7,86	0,98
EN302-1 com excentricidade de 4 mm em uma das direções	PRF	7,81	0,43
	PUR	6,78	0,57
	PVA	5,20	0,65

τ = tensão média no plano de cisalhamento do resultado numérico

τ^* = tensão normalizada

Fonte: Adaptado de Serrano (2004)

Muller *et al.* (2005) estudou a distribuição da deformação em ensaio de cisalhamento com o corpo de prova EN-302-1 para a ligação de madeira (*Beech wood*) com duas resinas: uma PRF e uma PUR pelo método *electronic speckle pattern interferometry* (ESPI) com validação por modelagem numérica (Figura 44).

Para o modelo numérico foi utilizado o *software* comercial Abacus® com maior discretização da malha nos extremos da área de cisalhamento onde se espera maiores concentração de deformações.

Concluiu-se que os modelos em ESPI puderam ser validados pelos resultados numéricos. Para ambos os métodos o adesivo PU (com módulo de elasticidade de 0,5 GPa) apresentou maiores concentrações de deformações com máxima de 9×10^{-3} se comparado com o adesivo PRF (com módulo de elasticidade de 20 GPa) chegando somente a $5,5 \times 10^{-3}$. Relativamente, pela relação tensão x deformação, concluiu-se que o adesivo PRF com o maior módulo de elasticidade, apresenta uma maior concentração de tensões. Os resultados de distribuição de deformações encontrados podem encontrar na Figura 44.

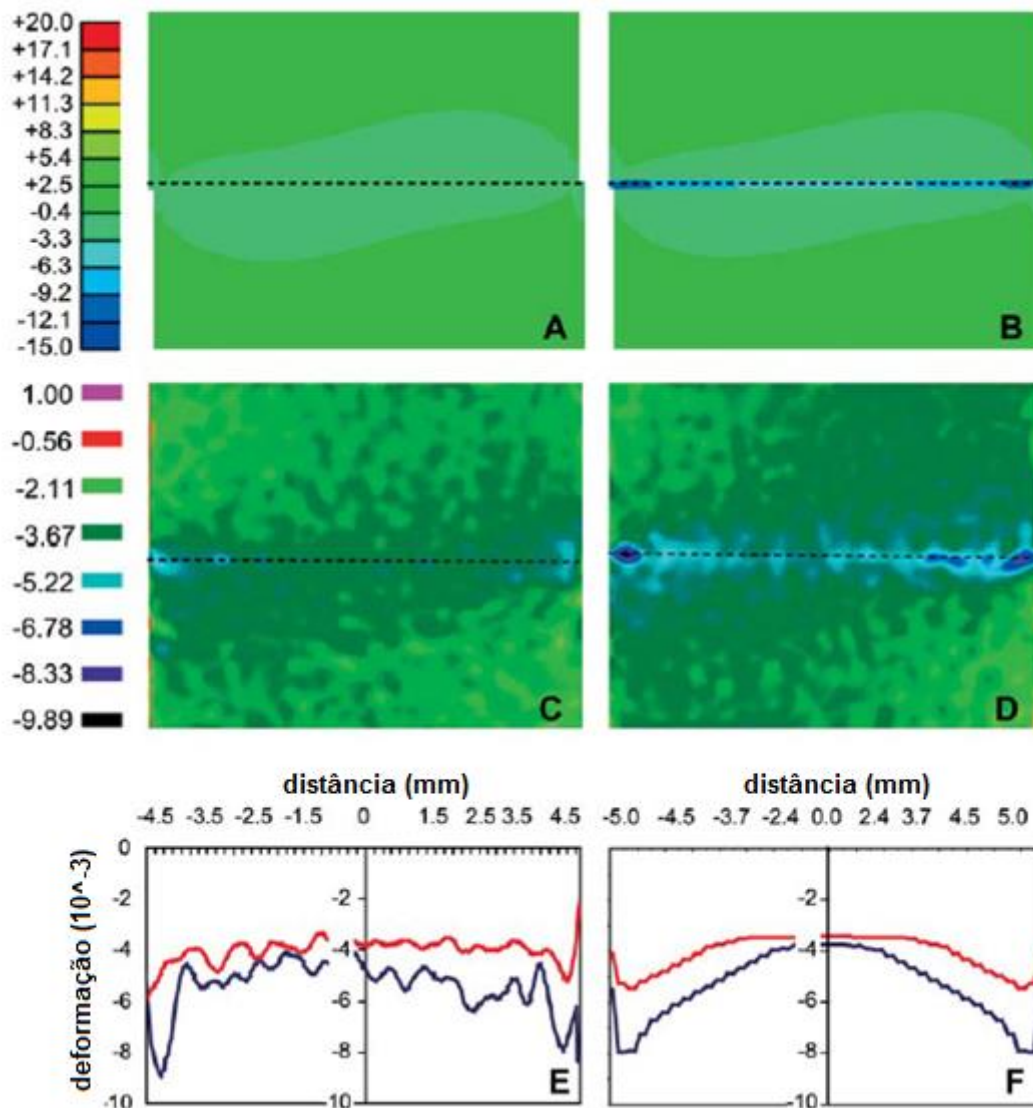


Figura 44. Distribuição das Deformações por cisalhamento: A) PRF Numérico; B) PUR Numérico; C) PRF ESPI; D) PUR ESPI; E) ESPI PRF (vermelho) PUR (azul); F) Numérico PRF (vermelho) PUR (azul).
Fonte: Adaptado de Muller *et al.* (2005)

Foi observado também nas imagens por ESPI que há uma alta tendência de rotação do corpo de prova e consideráveis deformações por flexão foram observadas (Figura 45).

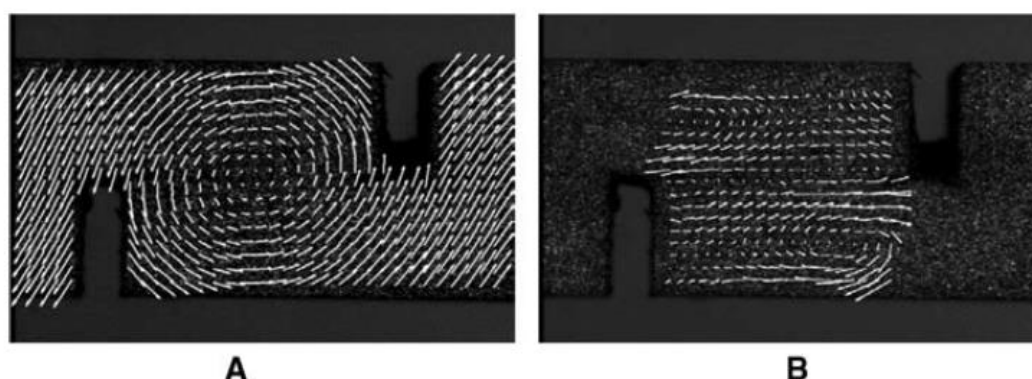


Figura 45. A) vetores de deformações; B) vetores de deformações por cisalhamento
Fonte: Muller *et al.* (2005)

Segundinho *et al.* (2015) apresenta a resistência ao cisalhamento da linha de adesivo entre três espécies de madeira (*Tectona grandis*, *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus sp.*) e o adesivo melamina-ureia-formaldeído (MUF). Os corpos de prova utilizados foram os propostos pela NBR 7190 (ABNT, 1997), e corpos de prova estruturais (Figura 46) cujas dimensões são da seção transversal da viga que foram inspirados em Fangi *et al.* (2004).

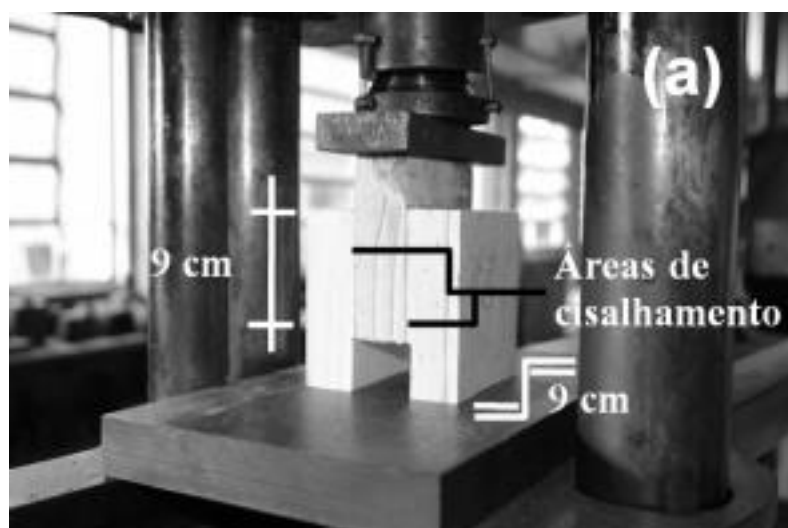


Figura 46. Corpo de prova estrutural
Fonte: Segundinho *et al.* (2015)

Os resultados encontrados pelos autores podem ser observados na Tabela 2, para cada espécie e para os quatro tipos diferentes de ensaio, sendo o tipo I – Madeira CP da NBR 7190; II – Linha de adesivo em condição de equilíbrio CP da NBR 7190; III – Linha de adesivo em condição de equilíbrio CP estrutural.

Tabela 2. Resistência ao cisalhamento (MPa)

Ensaio	<i>Tectona Grandis</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Eucalyptus sp</i>
I	10,01	8,01	11,49
II	8,61	7,57	8,47
III	6,09	5,24	6,44

Fonte: Segundinho *et al.* (2015)

As resistências relativas foram também calculadas pelos autores, fazendo-se a razão entre a resistência da linha de adesivo e a resistência da própria madeira (Tabela 3), valores inferiores a 1 tendo sido encontradas.

Os autores observaram que o corpo de prova estrutural não foi eficiente para a caracterização da resistência ao cisalhamento, provavelmente, os corpos de prova foram ensaiados de forma inadequada, apresentando uma ruptura precoce a carregamentos inferiores, iniciada pela abertura da lamina central. Esse fenômeno foi atribuído pelos autores a presença de um momento fletor ou outro tipo de solicitação que levou a esta abertura na parte inferior do corpo de prova, evidenciando a não ocorrência de cisalhamento puro e uniforme.

Tabela 3. Resistência Relativa para cada tipo de ensaio

Ensaio	Resistência Relativa		
	<i>Tectona grandis</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Eucalyptus sp.</i>
II/I	0,86	0,95	0,74
III/I	0,61	0,65	0,56

Fonte: Segundinho *et al.* (2015)

Créac'hcadec *et al.* (2015) estudou a distribuição dos esforços do corpo de prova Arcan Modificado (Figura 47), onde SMXY é a tensão de cisalhamento, SMXX a tensão normal na direção do eixo x e SMYY a tensão normal na direção do eixo y.

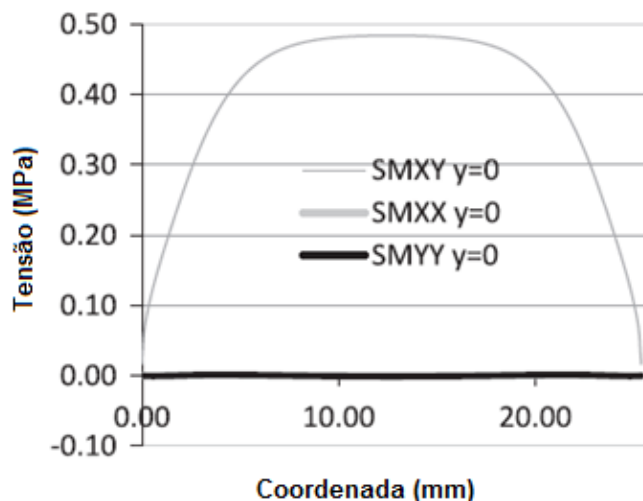


Figura 47. Distribuição dos esforços no ensaio de cisalhamento
Fonte: Adaptado de Créac'hcadec *et al.* (2015)

Os autores definiram uma relação (Equação 1) para relacionar as influências do efeito de borda com os módulos de elasticidade do substrato e do adesivo.

$$\beta = \frac{E_s}{E_a} \quad (1)$$

Onde:

E_s = Módulo de elasticidade do substrato

E_a = Módulo de elasticidade do adesivo

A Figura 48 mostra a distribuição da tensão cisalhante de corpos de prova de materiais com diferentes módulos de elasticidade. Nas figuras 48 b e d são destacadas em vermelho as diferenças entre as distribuições da tensão na extremidade do adesivo e na seção no meio da espessura do adesivo. Os autores sugerem que o limite para existir uma concentração de tensões constante na espessura do adesivo é $\beta = 35$ e o limite para a máxima tensão na interface gerada pelo efeito de borda ser igual a máxima tensão no centro é $\beta = 150$ para o ensaio de cisalhamento.

Eles observam também que o efeito de borda é menos influenciado pela espessura do adesivo do que pela relação entre os módulos de elasticidade.

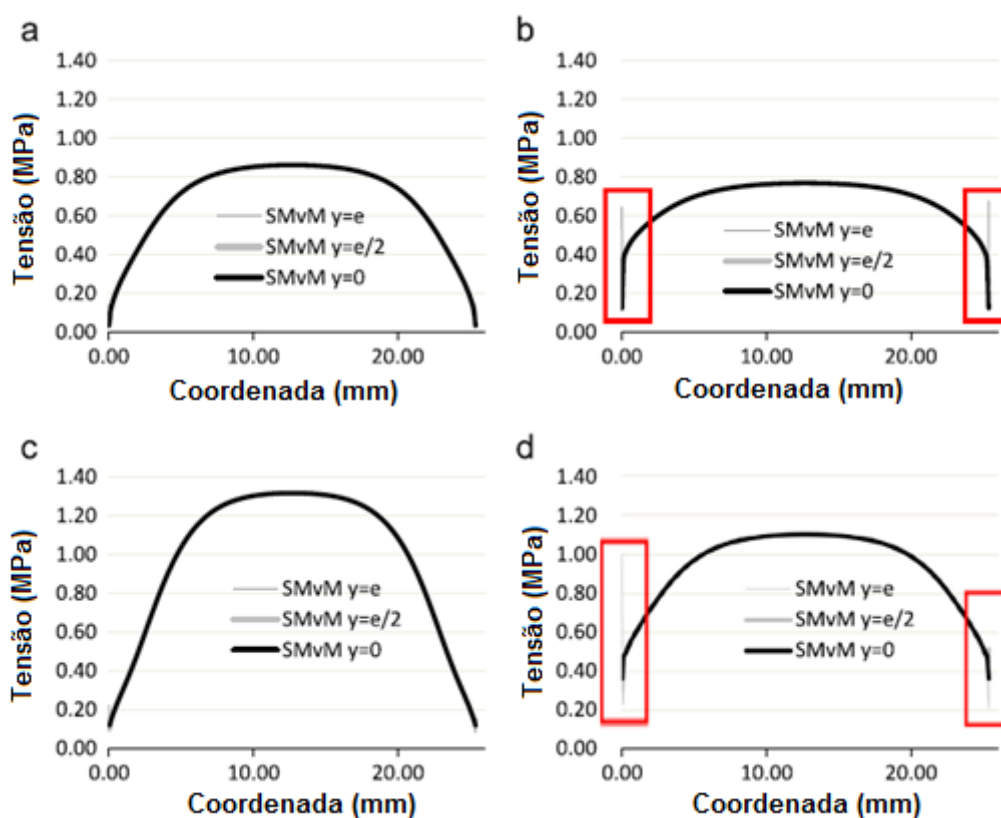


Figura 48. Von-mises para a) $\beta = 35$; b) $\beta = 140$; c) $\beta = 35$ d) $\beta = 140$
 Fonte: Adaptado de Créac'hcadec *et al.* (2015)

3.1.3. Cisalhamento na linha de adesivo com reforço

Rafferty *et al.* (2009a) e Rafferty *et al.* (2009b) estudaram a resistência ao cisalhamento da madeira *Stika Spruce* com reforço das fibras, *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) ou fibra de vidro e um compósito formado por fibra de vidro e resina poliuretano chamada de *Fulcrum* produzida pela *Rotafix*.

Estes reforços foram colados com diferentes resinas epóxi, de diferentes fabricantes, denominadas Epóxi 1, Epóxi 2 e Epóxi 3 no primeiro trabalho e com diferentes resinas no segundo, dentre elas, poliuretano e EPI.

Os corpos de prova ensaiados foram baseados na ISO 6238 e seguindo as recomendações de Okkonen e River (1989) os corpos de prova de madeira maciça foram ensaiados com o mesmo corpo de prova com 10 mm de diferença na espessura em decorrência da disponibilidade de material (Figura 49 e 50).

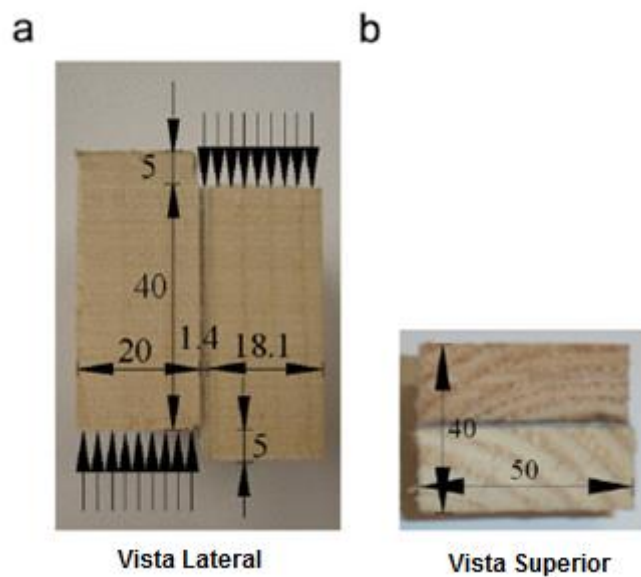


Figura 49. Corpo de prova para ligação Fulcrun-Madeira
Fonte: Adaptado de Raftery *et al.* (2009a)

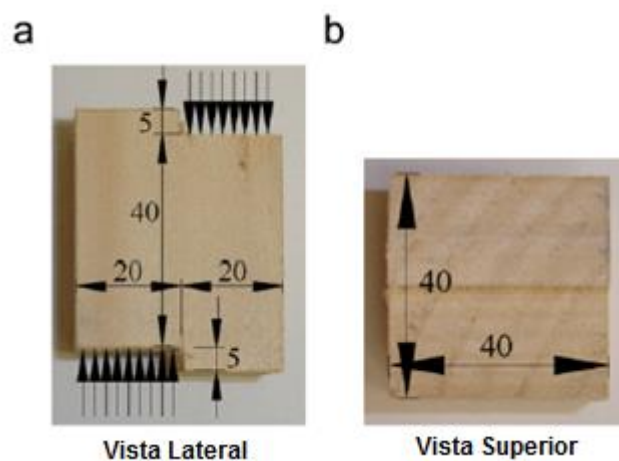


Figura 50. Corpo de prova de madeira maciça
Fonte: Adaptado de Raftery *et al.* (2009a)

Os gráficos nas Figura 51 e 52 ilustram os resultados encontrados por Raftery *et al.* (2009a), onde:

- A – Resistência da madeira;
- B – Resistência da ligação madeira-madeira;
- C – Resistencia da ligação madeira-reforço;
- D - Resistencia da ligação madeira-reforço após ciclo de envelhecimento.

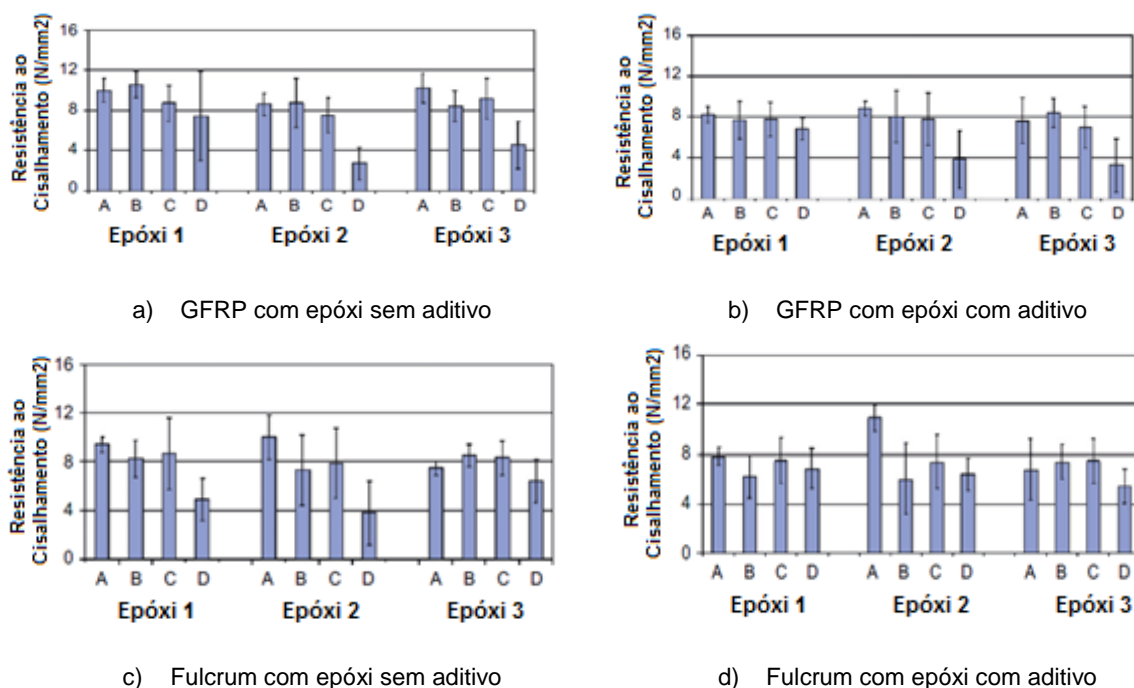


Figura 51. Resistência ao cisalhamento
Fonte: Adaptado de Raftery et al. (2009a)

Analisando-se as barras B e C que representam a resistência na ligação madeira-madeira e a resistência na ligação madeira-reforço, observa-se que na aplicação do reforço do tipo GFPR há queda na resistência da madeira-madeira para a madeira-reforço para colagem com as resinas Epóxi 1 e Epóxi 2 (Figura 51 (a)), e que com a aplicação do aditivo isso não ocorre (Figura 51 (b)). Por outro lado, na aplicação do GFRP com o adesivo Epóxi 3 observa-se um ganho de resistência na ligação madeira-reforço nos corpos de prova sem a aplicação do aditivo e a perda com a aplicação.

Em oposição, para a aplicação do reforço de *Fulcrum* apresenta-se ganhos na resistência madeira-reforço sem a aplicação de aditivos para os adesivos Epóxi 1 e Epóxi 2 e com a aplicação do aditivo este comportamento persiste. Já para o adesivo Epóxi 3 há a perda de resistência madeira-reforço e com a aplicação do aditivo ela se iguala com a ligação madeira-madeira.

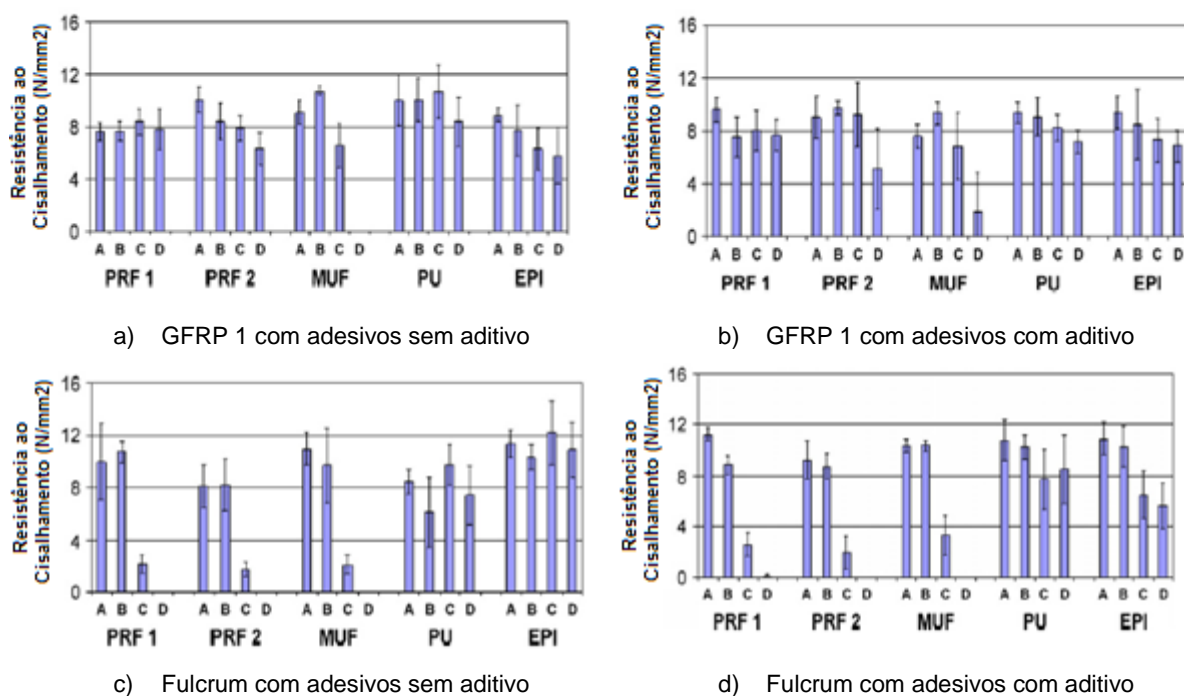


Figura 52. Resistência ao cisalhamento
 Fonte: Raftery et al. (2009b)

Analisando-se as Figuras 52 (c) e (d) observa-se claramente que as resinas PRF1, PRF2 e MUF não apresentam bom desempenho na colagem do reforço do tipo Fulcrum, perdendo consideravelmente sua capacidade resistente.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a aplicação de corpos de prova padronizados e práticos (Modelo IVALSA; Modelo ASTM D905 e Modelo NBR 7190) para a caracterização da resistência ao cisalhamento de madeira laminada colada com reforço de fibras sintética e natural.

4.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Analisar numericamente a distribuição de tensões de cisalhamento e normais no plano teórico de cisalhamento dos corpos de prova estudados;
- Avaliar numericamente a interferência das propriedades dos compósitos envolvidos, principalmente, módulo de elasticidade e espessuras de junta, na distribuição de tensões cisalhantes e normais;
- Avaliar experimentalmente as resistências ao cisalhamento nas ligações, dos adesivos e da composição adesivo e reforços estudados;
- Comparar a resistência das ligações estudadas com a resistência ao cisalhamento da madeira maciça;
- Propor a utilização do corpo de prova mais adequado, dentre os estudados, para caracterização da resistência ao cisalhamento da ligação entre reforço e madeira.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram estudados três diferentes corpos de prova: o proposto pela NBR 7190; o proposto pela ASTM D 905 ou ASTM D 3931; e o proposto por Pizzo *et al.* (2003). Por simplicidade, refere-se, neste trabalho cada um dos corpos de prova de NBR, ASTM e IVALSA respectivamente.

Este trabalho foi desenvolvido em duas frentes, uma numérica e uma experimental, correlacionadas através da geometria dos corpos de prova.

Para a modelagem numérica utilizou-se o *software* comercial baseado em elementos finitos ANSYS®.

Os ensaios experimentais dos corpos de prova NBR 7190 e ASTM D 905/ D 3931 foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-LME) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Os resultados experimentais dos corpos de prova IVALSA foram obtidos no laboratório do CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*) - IVALSA (*Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, Sesto Fiorentino, Florença, Itália*) por Mascia (2016) em colaboração com os pesquisadores Pizzo, B. e BURATO, P.

5.1. Materiais

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizadas duas espécies de madeira, três tipos de resinas e dois tipos de reforços, cada um deles serão tratados separadamente neste capítulo.

5.1.1. Madeira

Foram utilizadas duas espécies de madeiras: *Picea abies* ou Spruce para os ensaios realizados no IVALSA e *Pinus elliottii* ou Pinus para os ensaios realizados na UNICAMP.

5.1.1.1. *Picea Abies*

A madeira Spruce (*Picea abies*) é uma espécie italiana de grande utilização em madeira laminada colada e em CLT (*Cross laminated timber*). Pode ser comparada em termos de propriedades físicas e mecânicas à espécie Pinus do Brasil.

Segundo Pizzo *et al.* (2003), a resistência média ao cisalhamento calculada a partir de ensaios em mais de 150 corpos de prova cortados de diferentes pranchas é de 8,2 MPa com coeficiente de variação (CV) de 17%, sendo que os valores variaram de um mínimo de 4 MPa à um máximo de 14 MPa (95% destes valores estando entre 5 e 10,5 MPa).

Esta espécie é classificada como C24 na EN 338 (Tabela 4). No Brasil pela NBR 7190 se enquadraria em relação às classes de resistência entre C20 e C25, e para propriedade de elasticidade entre C25 e C30 (CEN, 2009; ABNT, 1997).

Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas C24

Propriedades	
Resistência Tração Paralela Característica (MPa)	14,00
Resistência Tração Perpendicular Característica (MPa)	0,40
Resistência Compressão Paralela Característica (MPa)	21,00
Resistência Compressão Perpendicular Característica (MPa)	2,50
Resistência ao Cisalhamento Característica (MPa)	4,00
Módulo de Resistência à Flexão Característica (MPa)	24,00
Módulo de Elasticidade Longitudinal Média (GPa)	11,00
Módulo de Elasticidade Transversal Média (GPa)	0,69
Densidade Característica (kg/m ³)	350,00
Densidade Média (kg/m ³)	420,00

Madeira em situação de equilíbrio com temperatura de 20°C e 65% de umidade do ar.
Fonte: Adaptado de EN 338 (CEN, 2009)

5.1.1.2. *Pinus Elliottii*

A madeira *Pinus elliottii* é um pinheiro de crescimento rápido, nativo para terreno úmido e pantanoso, mas cresce bem em uma variedade de locais. Foi introduzido no Brasil como madeira de reflorestamento e é encontrado nos seguintes estados: Amapá, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Esta árvore cresce de 22 a 30 metros de altura com um diâmetro de tronco de 60 centímetros.

No Brasil a NBR 7190 traz valores médios das propriedades física desta espécie aferidos em amostra de 21 corpos de prova, listadas na Tabela 5 (ABNT, 1997).

Tabela 5. Propriedades físico-mecânicas da madeira *Pinus elliotti* – Valores médios.

Propriedades	
Densidade (kg/m ³)	560
Resistência Tração Paralela (MPa)	66
Resistência Tração Perpendicular (MPa)	2,5
Resistência Compressão Paralela (MPa)	40,4
Resistência Compressão Perpendicular (MPa)	2,5
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	7,4
Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	11

Fonte: Adaptado de ABNT (1997)

5.1.2. Adesivos

Quanto aos adesivos, utilizou-se na totalidade três, sendo o poliuretano comum para todos os ensaios e, o epóxi exclusivo dos ensaios no IVALSA e a Emulsão Polimérica de Isocianato (EPI) exclusivo nos ensaios na UNICAMP.

5.1.2.1. Epóxi

O primeiro adesivo utilizado foi o *Mapei Mapewood Gel 120*, um adesivo epoxídico isento de solvente com consistência de gelatina composta de dois componentes que devem ser misturadas antes da utilização (Parte A = resina e Parte B = endurecedor), a Tabela 6 apresenta suas principais propriedades mecânicas (MAPEI, 2010).

**Tabela 6. Informações Técnicas *Mapei Mapewood Gel 120*
Propriedades (valores típicos)**

Densidade (kg/m ³)	1010
Cisalhamento à compressão (MPa)	9
Resistência à tração (MPa)	30
Resistência à compressão (MPa)	65
Módulo de resistência à flexão (MPa)	60
Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	2
Módulo de elasticidade na compressão (GPa)	5

Fonte: Mapei (2010)

5.1.2.2. Poliuretano

O segundo adesivo utilizado foi o PURBOND® HB S609, um adesivo poliuretano monocomponente. Os adesivos de poliuretano monocomponente (1C

PUR) são classificados como adesivos reativos. A cura destes produtos - a formação de uma ligação forte capaz de suportar as cargas requeridas - envolve uma reação química. A vantagem de utilizar-se um adesivo monocomponente é que o segundo componente é a umidade, e a umidade está normalmente presente em quantidade adequada na atmosfera e particularmente na madeira.

A tecnologia de poliuretano para a construção de painéis termo-portantes foi desenvolvida por Purbond, na Suíça e foi considerada pioneira na década de 1980. O primeiro adesivo PUR para a produção de elementos estruturais em painéis laminados foi aprovada pela Purbond em 1994 na Alemanha. É um adesivo novo para aplicação estrutural se comparado com as resinas epóxi, mas está ganhando mercado na Europa e propõe maior sustentabilidade (HENKEL AG & CO, 2017).

Obucina e Gondzic (2014) realizaram ensaios com este adesivo e chegaram aos valores médios para a resistência ao cisalhamento de 2,51 MPa, 4,92 MPa e 3,7MPa em peças confeccionadas nas pressões de 12MPa, 14MPa e 16MPa, respectivamente.

5.1.2.3. Emulsão Polimérica de Isocianato

Foi também utilizado o ReactITE EP-925, um adesivo bi-componente de Emulsão Polimérica de Isocianato (EPI), algumas propriedades podem ser encontradas na Tabela 7 (FRANKLIN, 2015).

Tabela 7. Informações Técnicas ReactITE EP-925.
Propriedades

Densidade (kg/m ³)	1280
Resistência (MPa)	13,4
Módulo de Elasticidade (GPa)	4
Gramatura indicada (g/m ²)	200

Fonte: Franklin (2015)

5.1.3. Fibras

5.1.3.1. Vectran

A fibra sintética utilizada para reforço foi o Vectran®HT que é um fio de multifilamento de alto desempenho fabricado a partir de polímero de cristais líquidos (LCP) e é a única fibra de LCP fabricada no mercado disponível no mundo. Esta fibra exhibe várias propriedades únicas, tais como excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à abrasão. Ela é produzida em diversos formatos para variadas aplicações, como cordas de alta resistência (Figura 53).



Figura 53. Produtos com fibra Vectran®
Fonte: KURARAY (2015)

Algumas propriedades deste material fornecidas em manual da fabricante são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades Vectran® HT	
Propriedades	
Densidade (kg/m ³)	1400
Módulo de Elasticidade (GPa)	75
Gramatura (g/m ²)	408
Resistência à tração (MPa)	3200

Fonte: KURARAY (2015)

Especificamente para esse estudo, foi preparado, por empresa contratada, um tecido com esses fios (Figura 54), para facilitar a colagem entre as lâminas da viga.

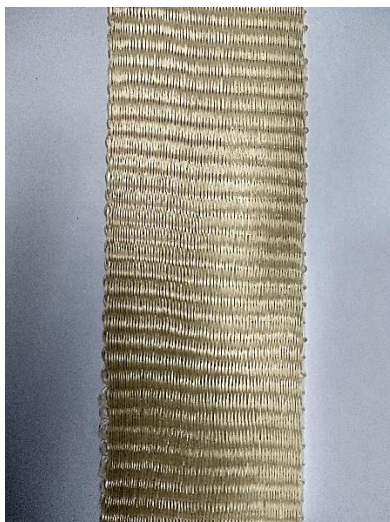


Figura 54. Tecido de Vectran®
Fonte: Própria

5.1.3.2. Sisal

As fibras de sisal (*Agave Sisalana Perrini*) pertencem à classe das fibras naturais duras, sendo a principal fibra natural de aplicação comercial atualmente, e estima-se que mais da metade de fibras naturais utilizadas atualmente seja representada pelo sisal. O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, estas fibras são industrializadas e fornecidas ao mercado na forma de cordas (fio *Baler Twine*), tecidos, tapetes, sacos e artesanato o que propicia seu uso em diversos setores (Figura 55) (EMBRAPA, 2008).



Figura 55. Sisal, fibras de sisal estendidas para secagem e fio *Baler Twine*
Fonte: EMBRAPA (2013)

Segundo Mascia *et. al.* (2010) as propriedades mecânicas médias do sisal ficam em torno de 347 a 378 MPA de resistência à tração e módulo de elasticidade de 35 GPa.

Para aplicação como reforço das vigas de madeira laminada colada fabricou-se, em empresa contratada, um tecido deste material (Figura 56).



Figura 56. Tecido de sisal
Fonte: Própria

5.1.4. Compósitos

Para calcular as propriedades dos compósitos, formadas a partir da mistura do adesivo com a fibra foi considerado as propriedades destes materiais encontrado em Mascia (2016), Mapei (2010a), Mapei (2010b), Purbond (2010) e Donadon (2016), resumidas na Tabela 9.

Tabela 9. Propriedades dos adesivos e das fibras

		Gramatura (g/m ²)	ρ (kg/m ³)	E (GPa)
Madeiras	Spruce	-	420	11
	Pinus	-	560	11
Adesivos	Epóxi	300	1010	5
	Poliuretano	260	1160	1,5
	EPI	200	1280	4
Fibras	Sisal	1393	1370	37,39
	Vectran	408	1400	75

Fonte: Própria

Em posse da gramatura utilizada e da área do corpo de prova, obtém-se a massa de material utilizado. E o volume de fibras pode ser calculado pela Equação 2 (CAMPBELL, 2010).

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + W_m/\rho_m} \quad (2)$$

Então, para se determinar o módulo de elasticidade da mistura, a lei das misturas, é aplicada (Equação 3) (CAMPBELL, 2010).

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

Onde:

V_f = Volume de fibra

W_f = Massa de fibra

ρ_f = Massa específica da fibra

V_m = Volume da matriz (adesivo)

W_m = Massa de adesivo

ρ_m = Massa específica do adesivo

E_c = Módulo de elasticidade do compósito

E_f = Módulo de elasticidade da fibra

E_m = Módulo de elasticidade da matriz

5.2. Corpos de prova

Os corpos de prova foram nomeados por siglas, de acordo com o modelo adotado, seguido pelo adesivo utilizado, se aplicável e seguido pela fibra utilizada, se aplicável, seguindo o modelo da Figura 57.

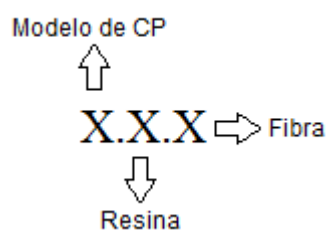


Figura 57. Nomenclatura dos Corpos de Prova
 Fonte: Própria

A Tabela 10, a seguir, contém o significado de cada uma das siglas utilizadas para compor a nomenclatura dos corpos de prova.

Tabela 10. Siglas

	Sigla	Significado
Modelo do CP	I	Corpo de prova baseado no modelo do IVALSA
	N	Corpo de prova baseado na norma NBR 7190 (ABNT, 1997)
	A	Corpo de prova baseado na norma ASTM D 3931 (ASTM, 2008)
Adesivos	E	Adesivo Epóxi
	P	Adesivo Poliuretano
	EPI	Adesivo EPI
Fibras	S	Fibra de Sisal
	V	Fibra de Vectran

Fonte: Própria

Para o corpo de prova IVALSA foram ensaiados e modelados o corpo de prova de madeira e seis tipos de compósitos (Figura 58).

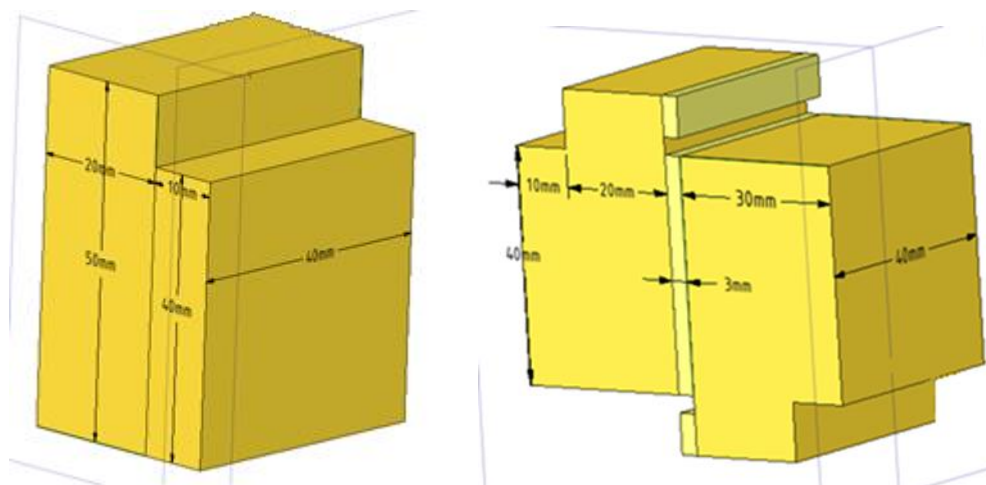


Figura 58. Geometria corpo de prova IVALSA madeira (esquerda) compósito (direita)
Fonte: Própria

Cada tipo de compósito tem espessuras específicas das linhas de adesivo específicas de cada material dependentes da fibra e da resina utilizada, estas espessuras são listadas na Tabela 11. Estes ensaios foram mais numerosos pois foram específicos de cisalhamento, realizados no laboratório IVALSA.

Tabela 11. Corpos de Prova IVALSA

Sigla do CP	Quantidade	Adesivo	Fibra	Espessura da linha de adesivo (mm)
I	42	-	-	-
I.E	8	Epóxi	-	0,4
I.P	6	Poliuretano	-	0,3
I.E.S	7	Epóxi	Sisal	3,1
I.P.S	7	Poliuretano	Sisal	2,4
I.E.V	7	Epóxi	Vectran	0,7
I.P.V	7	Poliuretano	Vectran	0,6

Fonte: Própria

Para os corpos de prova da NBR e da ASTM (Figura 59), foram retirados o corpo de prova de madeira e cinco tipos de corpos de prova compósitos de mesma geometria.

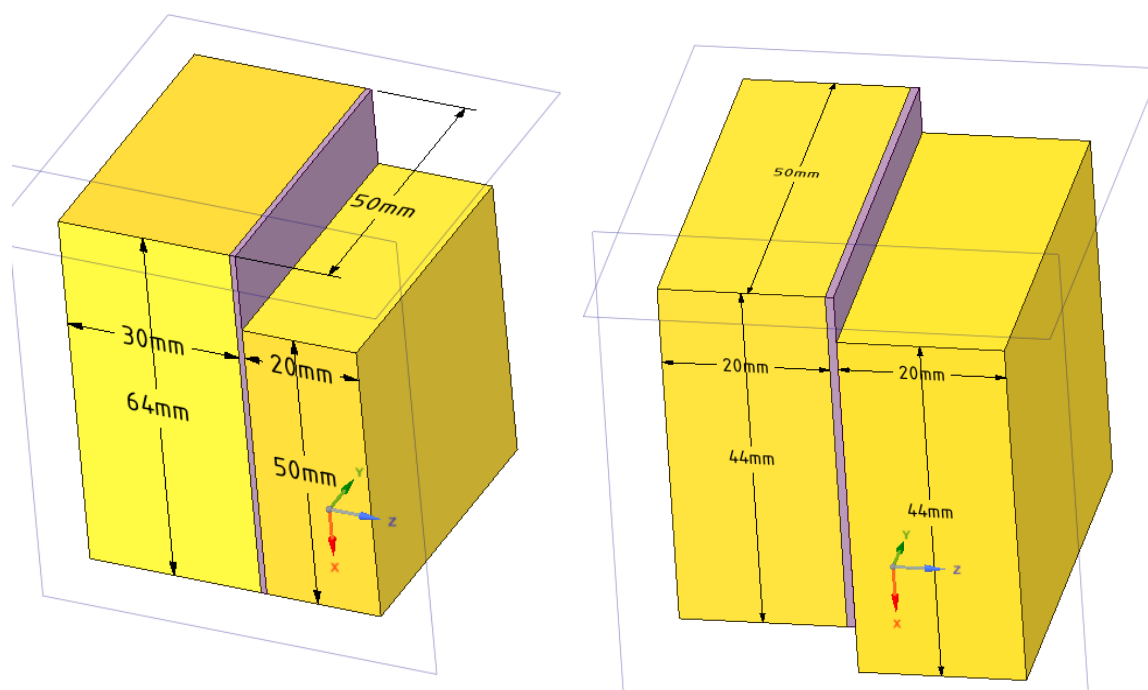


Figura 59. Geometria corpo de prova NBR (esquerda) e ASTM (direita)
Fonte: Própria

A espessura para cada tipo de compósito é apresentada na Tabela 12. As diferentes espessuras devem-se à natureza de cada compósito, sua gramatura, volume, etc., assim como o adesivo empregado na sua colagem. Estes ensaios foram

menos numerosos pois os corpos de prova foram retirados de porções não danificadas de vigas rompidas, que foram parte dos projetos de pesquisa do mestrando Renato Saldanha e doutorando Bruno Fazendeiro Donadon.

Tabela 12. Corpos de Prova NBR e ASTM

Sigla do CP	Quantidade	Adesivo	Fibra	Espessura da linha de adesivo (mm)
A/N	3	-	-	-
A/N.EPI	3	EPI	-	0,3
A/N.EPI.S	3	EPI	Sisal	2
A/N.P.S	3	Poliuretano	Sisal	3
A/N.EPI.V	3	EPI	Vectran	0,6
A/N.P.V	3	Poliuretano	Vectran	0,6

Fonte: Própria

5.3. Modelagem Numérica

A modelagem foi realizada usando o software ANSYS no pacote “*static structural*”.

As modelagens tiveram o objetivo de estudar a distribuição de tensões sob condições elástica-linear nos diferentes corpos de prova estudados, tanto de madeira, quanto compósitos.

5.3.1. Considerações de Vinculação e Carregamento

Para padronização, o carregamento foi escolhido como de forma em que a tensão de cisalhamento nominal $\tau_{xz} = \frac{P}{A}$ correspondesse a 11 MPa para todos os três modelos de corpos de prova (IVALSA, NBR e ASTM) tanto para o corpo de prova de madeira quanto para os corpos de prova de compósitos (Tabela 13).

Corpo de prova	Área teórica de cisalhamento	Carga
IVALSA	40 mm x 40 mm	17600 N
NBR	50 mm x 50 mm	27500 N
ASTM	50 mm x 38 mm	20900 N

Fonte: Própria

Para uma melhor aproximação do teste em laboratório, dois blocos de aço foram também modelados, para simular as interações corpo de prova – apoio e corpo de prova – aplicador de carga.

A direção longitudinal das fibras foi definida na direção do eixo x, a direção tangencial no eixo y e, no eixo z, representou-se a direção radial das fibras, a escolha entre as direções radiais e tangenciais foram baseadas nas direções mais recorrentes nos corpos de prova dos ensaios experimentais. Para cada um dos 3 tipos de corpos de prova adotados apresenta-se a geometria, dimensões e a adoção dos eixos ortotrópicos (Figura 60).

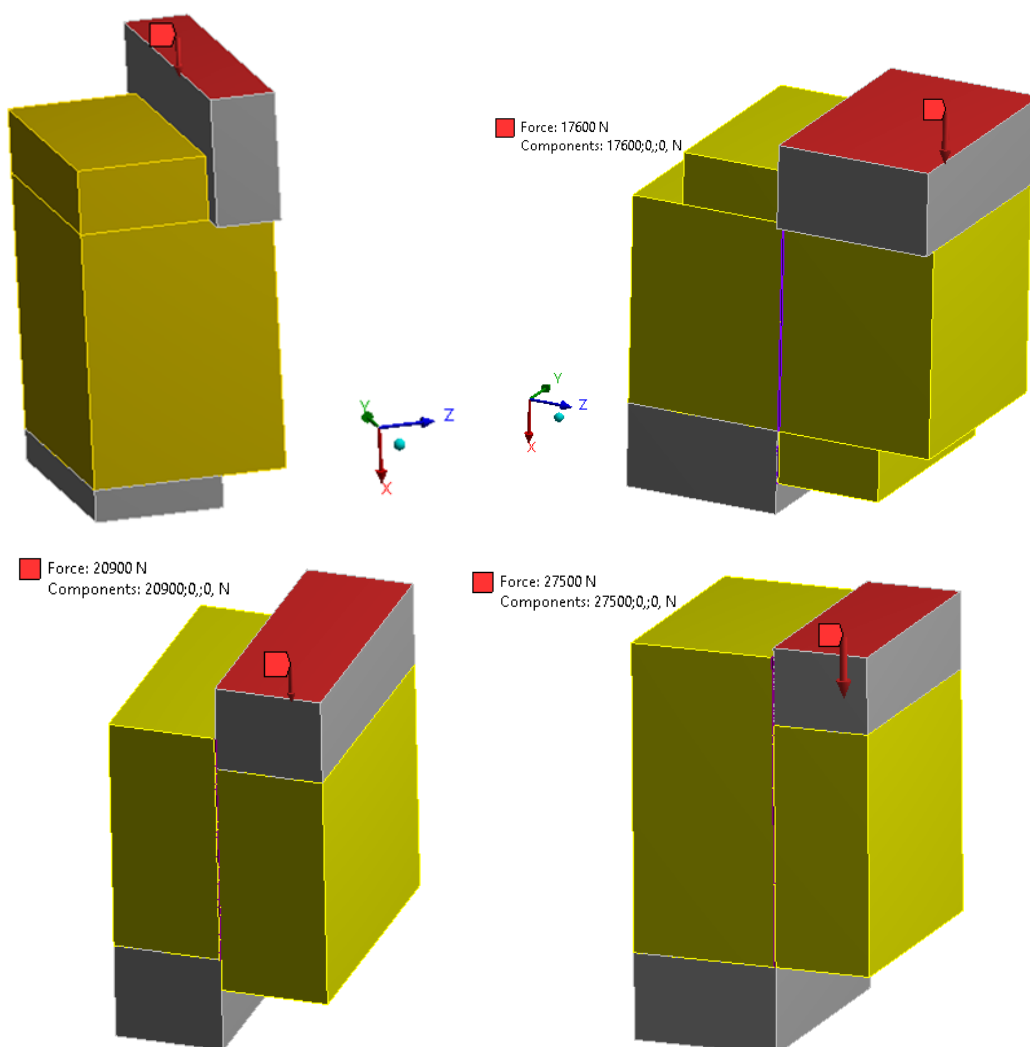


Figura 60. Carregamento
Fonte: Própria

As restrições do modelo são deslocamento nulo em z no plano xy, assim como deslocamento nulo em y no plano xz para o aplicador de carregamento, considerando que o apoio ficará restrito de se movimentar devido ao aparato de aplicação do ensaio. Considerou-se também o bloco de apoio como totalmente fixo na base inferior, ou seja, com todos os graus de liberdade restritos nesta região (Figura 61).

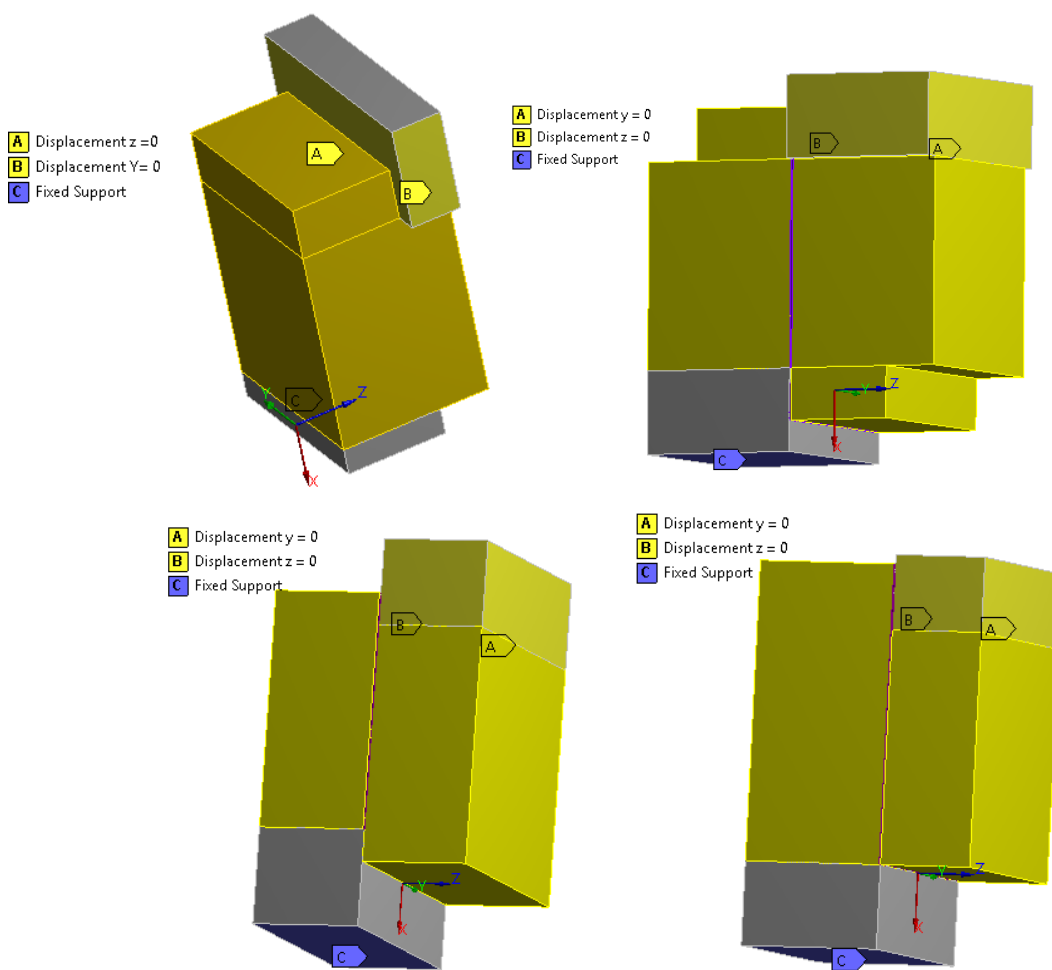


Figura 61. Vinculações
Fonte: Própria

A iteração entre o corpo de prova e os blocos de aço foi considerada por atrito com coeficiente de fricção igual a 0,3.

5.3.2. Malha

Para a discretização do corpo de prova foi utilizado o elemento SOLID186 (Figura 62) (Ansys®) definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó, sendo: translações nas direções x, y e z.

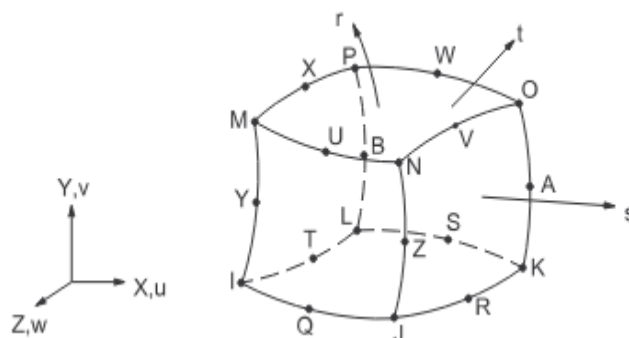


Figura 62. SOLID 186
Fonte: Ansys®

Utilizou-se também para as regiões de contato os elementos: CONTA174, TARGE170 e SURF154 disponíveis na biblioteca do Ansys®.

Em estudar o contato entre dois corpos, a superfície de um corpo é convencionalmente tomada como uma superfície de contato e a superfície do outro corpo como uma superfície de destino (ANSYS).

TARGE170 (Figura 63) é usado para representar várias superfícies de destino 3-D para os elementos de contato associados (CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 e CONTA177), sendo o CONTA174 especificamente utilizado neste trabalho (ANSYS).

CONTA174 (Figura 63) é um elemento de 8 nós que é destinado a análise geral de contato. Em uma análise de contato geral, a área de contato entre dois (ou mais) corpos geralmente não é conhecida antecipadamente. CONTA174 é aplicável a geometrias 3D. Pode ser aplicado para contato entre corpos sólidos ou conchas (ANSYS).

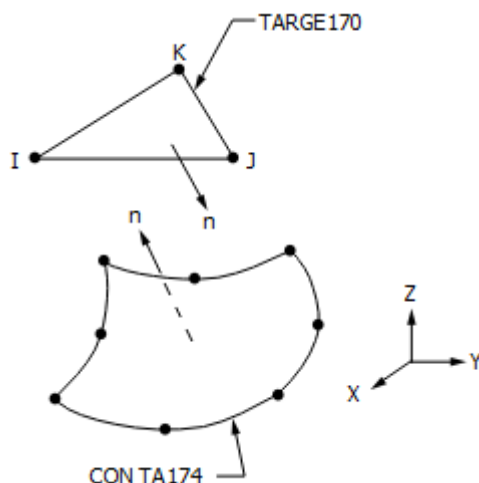


Figura 63. TARGE170 e CONTA174
Fonte: Ansys®

O SURF154 (Figura 64) é usado para várias aplicações de carga e efeito de superfície em análises estruturais em 3-D. Pode ser sobreposto em uma face da área de qualquer elemento 3-D. Várias cargas e efeitos de superfície podem existir simultaneamente (ANSYS).

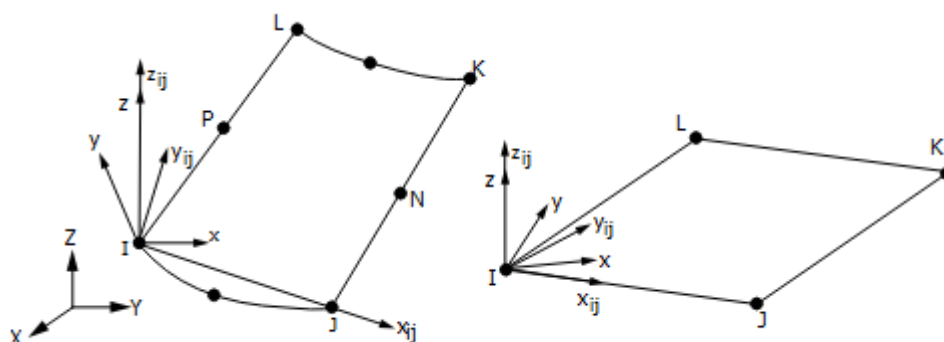


Figura 64. SURF154
Fonte: Ansys®

Na direção do eixo z , utilizou-se a função “*bias factor*” com o plano de cisalhamento como referência para o menor elemento (Figuras 65, 66 e 67). Definiu-se como 0,25 mm o tamanho da primeira camada de elementos e os posteriores com taxa de crescimento de 1,4349 com relação ao anterior.

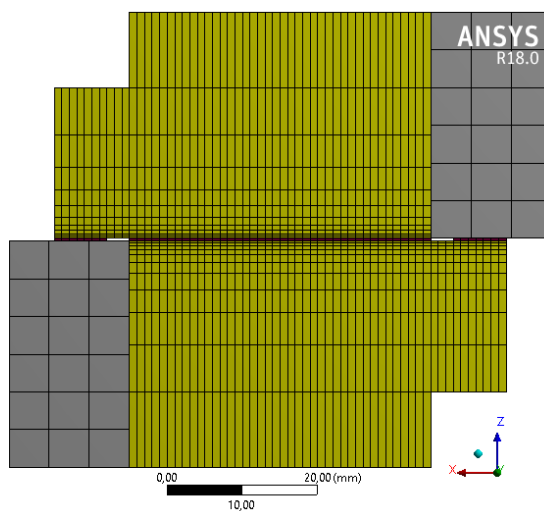


Figura 65. Discretização “*Bias factor*” na direção do eixo z – IVALSA
Fonte: Própria

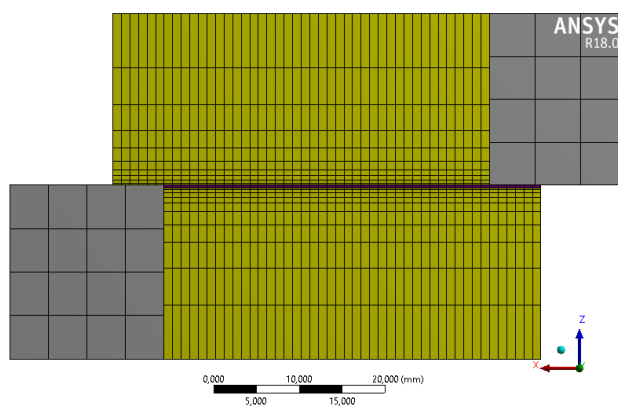


Figura 66. Discretização “*Bias factor*” na direção do eixo z – ASTM
Fonte: Própria

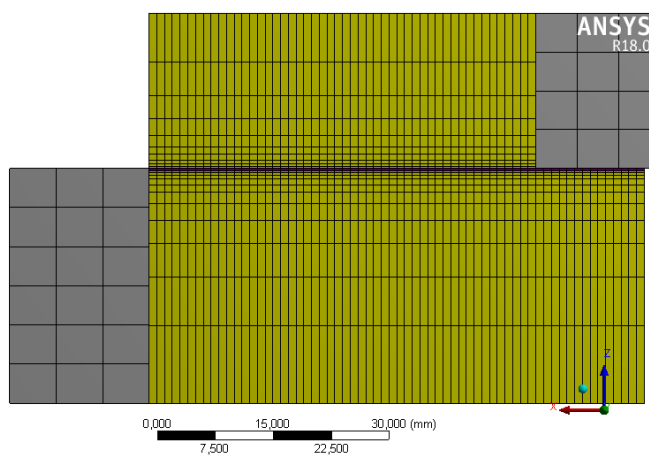


Figura 67. Discretização “*Bias factor*” na direção do eixo z – NBR
Fonte: Própria

No plano xy os elementos foram definidos com tamanho de 1 mm após os resultados de convergência tratados em mais detalhes no próximo capítulo (Figura 68).

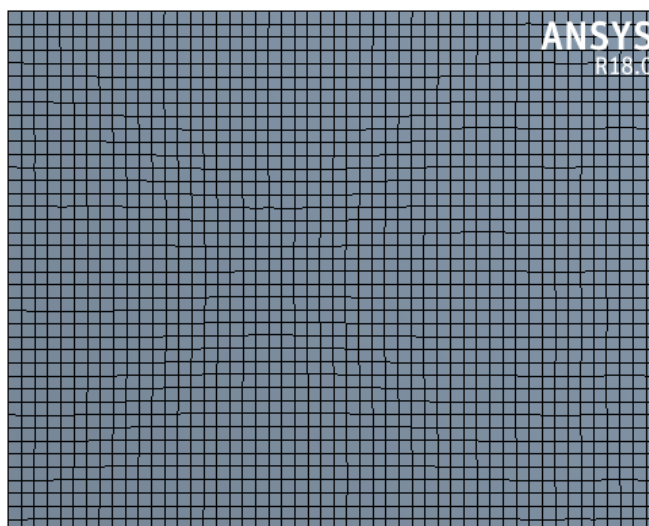


Figura 68. Discretização no plano xy
Fonte: Própria

5.3.2.1. Convergência da malha

Dentre alguns métodos para o cálculo de erros da malha disponíveis na literatura, o método escolhido para este trabalho foi o *Grid Convergence Index (GCI)*.

Este método é muito utilizado para análises numéricas em dinâmica dos fluídos para determinar os erros de discretização, sendo, por exemplo, o método indicado na política editorial do *Journal of Fluids Engineering* (JORNAL OF FLUIDS ENGINEERING).

Na mecânica dos sólidos, para a análise numérica de elementos estruturais e/ou estruturas, a verificação dos erros de malha ainda não é totalmente normatizada, no entanto, alguns autores como Kwaśniewski (2013) e Schwer (2008) recomendam este mesmo método para aplicações na análise computacional de estruturas.

5.3.2.2. Conceito do “*Grid Convergence Index (GCI)*”

A verificação pelos parâmetros de erros deste método pode ser realizada com a utilização de duas ou três malhas (preferencialmente três), com a mesma razão de refinamento (r) entre elas (NASA NPARC):

$$r = \frac{h_{i+1}}{h_i} \quad (4)$$

Onde:

r é a razão de refinamento;

h_i é o tamanho do elemento da malha mais discretizada;

i é o índice que define o número da malha (da mais discretizada para a menos).

A partir de cada uma das malhas obtém-se soluções (f_i), que podem ser tensões, deslocamentos, entre outros, ou seja, quantidades numéricas da variável de interesse em determinado ponto para cada uma das malhas estudadas. Desta forma, a ordem de convergência (p) pode ser calculada pela Equação 5 (NASA NPARC).

$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\ln(r)} \quad (5)$$

Utilizando-se a extrapolação de Richardson para obter-se uma estimativa de ordem superior, uma quantidade f calculada para uma malha caracterizada por parâmetro (tamanho da malha = h) pode ser expresso usando o Teorema de Taylor (Equação 6).

$$f = f_{h=0} + g_1 h + g_2 h^2 + g_3 h^3 \dots \quad (6)$$

Reescrevendo-se a Equação 6 obtém-se a estimativa da solução assintótica ($f_{h=0}$) (Equação 7).

$$f_{h=0} \cong f_1 + \frac{f_2 - f_1}{r^2 - 1} \quad (7)$$

Com a quantidade “ ε ” (Equação 8) definindo a diferença relativa entre as subsequentes soluções, o GCI é definido na Equação 9, onde F_s é um fator de

segurança e recomenda-se 1,25 para três ou mais malhas e 3 para duas malhas (KWAŚNIEWSKI, 2013).

$$\varepsilon_{i,i+1} = \frac{f_i - f_{i+1}}{f_i} \quad (8)$$

$$GCI_{i,i+1} = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (9)$$

5.3.2.3. Análise de convergência

Para a análise de convergência da malha, utilizou-se três tamanhos de malhas definidas no plano de cisalhamento (plano xy), uma com $h_1 = 0,5$ mm, uma com elementos de $h_2 = 1$ mm e por fim uma com $h_3 = 2$ mm (Figura 69).

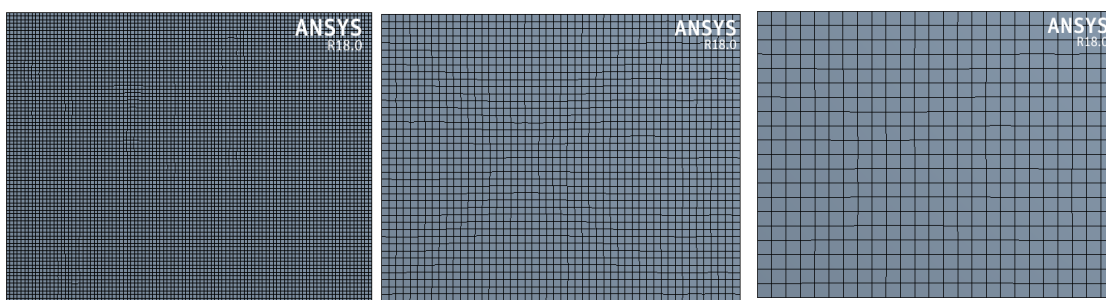


Figura 69. Discretização no plano a) 0,5 mm; b) 1 mm; c) 2 mm
Fonte: Própria

Para cada um dos modelos aferiu-se os resultados de tensão no plano xy no ponto central do plano teórico de cisalhamento. Os resultados encontrados foram $f_1 = 8,9128$ MPa, $f_2 = 8,5279$ MPa e $f_3 = 6,83$ MPa.

A partir destes resultados e das equações do capítulo 5.3.2 calculou-se todos os parâmetros de convergência da malha pelo método GCI, apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Resultados da análise GCI

Ordem de Convergência (p)	Solução assintótica ($f_{h=0}$)	GCI_{12} (%)	GCI_{23} (%)	$GCI_{23}/GCI_{12} r^p$
2,141	8,7845	1,5824	7,2956	1,0451

Fonte: Própria

A razão $GCI_{23}/GCI_{12} r^p$ estando próxima de 1, indica que os resultados apresentados pelas malhas estudadas estão na região assintótica de convergência

do modelo numérico. Sendo r a razão de refinamento com valor 2 p a ordem de convergência e GCI_{12} e GCI_{23} a diferença relativa entre as subseqüentes soluções apresentados na Tabela 14.

A incerteza relativa entre a malha 3 e a malha 2 segundo o método é de 7,29%, no entanto, observa-se que entre a malha 1 e a malha 2 obtém-se uma incerteza com relação à discretização da malha bem menor de 1,58%. Desta forma, pelo balanceamento entre precisão da malha e custo computacional, optou-se pela utilização da malha intermediária para a aplicação neste trabalho. Levando em conta de que a malha 1 consumiu 8h para processamento, a malha 2 consumiu 5h e a malha 3 consumiu 30min em um processador intel ® core™ i7 -3520M CPU @ 2.90 GHz.

5.3.3. Propriedades dos materiais

As propriedades necessárias para entrada no *software* foram definidas dependente do comportamento aproximado para cada um dos materiais. Para as madeiras foram necessários três módulos de elasticidade longitudinais, três tangenciais e três coeficientes de *Poisson* para descrever-se o material como ortotrópico. Para os compósitos foram necessários um módulo de elasticidade e um coeficiente de *Poisson* para descrever-se materiais isotrópicos.

5.3.3.1. Madeiras

As madeiras foram modeladas com comportamento linear e ortotrópico. As propriedades nas direções específicas foram calculadas a partir do módulo de elasticidade na direção longitudinal de acordo com as relações entre elasticidades (BODIG e JAYNE, 1982). A Tabela 15 mostra as propriedades das madeiras estudadas, onde x é definida como a direção longitudinal das fibras, y como a direção tangencial e z como a direção radial.

Tabela 15. Propriedades ortotrópicas da madeira para modelagem

	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
Spruce	11000	550	880	650	69	690	0,2632	0,3739	0,3079
Pinus	11000	550	880	709	74	755	0,4200	0,3500	0,3600

Fonte: Bodig e Jayne (1982)

5.3.3.2. Compósitos

Os compósitos formados pela mistura de adesivo e fibra tiveram suas propriedades calculadas pelas Equações 2 e 3. Estes foram modelados como materiais isotrópicos.

A fração de fibra por volume calculada pela Equação 2 para cada compósito é apresentada na Tabela 16.

ID	Fração de Fibra por Volume
I.E.S	0,62
I.P.S	0,70
I.E.V	0,51
I.P.V	0,61
A/N.EPI.S	0,56
A/N.P.S	0,66
A/N.EPI.V	0,69
A/N.P.V	0,77

Fonte. Própria

Deste modo, o módulo de elasticidade pôde ser calculado por meio da Equação 3 e é apresentado na Tabela 17, juntamente com o coeficiente de *Poisson* adotado dos materiais e inseridos no *software*.

Tabela 17. Propriedades Isotrópicas dos adesivos e dos compósitos

ID	ρ (kg/m³)	E (GPa)	ν
I.E	1010	5,00	0,35
I.P	1160	1,50	0,35
I.E.S	546	25,07	0,35
I.P.S	688	26,46	0,35
I.E.V	1011	40,72	0,35
I.P.V	1113	46,47	0,35
A/N.EPI	1280	4,00	0,35
A/N.EPI.S	896,50	22,80	0,35
A/N.P.S	551	25,12	0,35
A/N.EPI.V	1013,33	52,76	0,35
A/N.P.V	896,67	58,26	0,35

Fonte. Própria

5.4. Ensaio experimentais

Para o ensaio dos corpos de prova IVALSA foi utilizado a máquina universal de ensaios *Shimadzu* de capacidade 50kN, localizada no Laboratório de Ensaio Mecânicos, do CNR (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*)- Ivalsa (*Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, Sesto Fiorentino, Florença, Itália*). Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente de 25° C, umidade relativa do ar de 50% e a velocidade de ensaio adotada foi de 1 mm/min. A Figura 70 mostra o equipamento para ensaio de cisalhamento e o aparato de ensaio com um corpo de prova alocado na posição para ensaio.

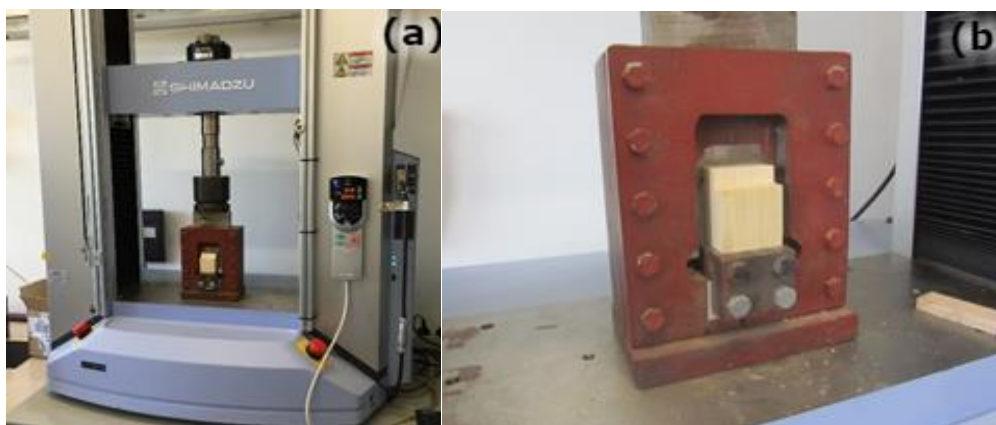


Figura 70. (a) Equipamento de ensaio, (b) Aparato de ensaio para corpo de prova de cisalhamento à compressão

Fonte. Mascia (2016)

Os ensaios da ASTM e NBR foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-LME) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios, modelo Emic DL30000N. A velocidade de ensaio adotada foi de 2,5 MPa/min. O equipamento para ensaio de cisalhamento e o aparato de ensaio são apresentados nas Figuras 71 e 72.

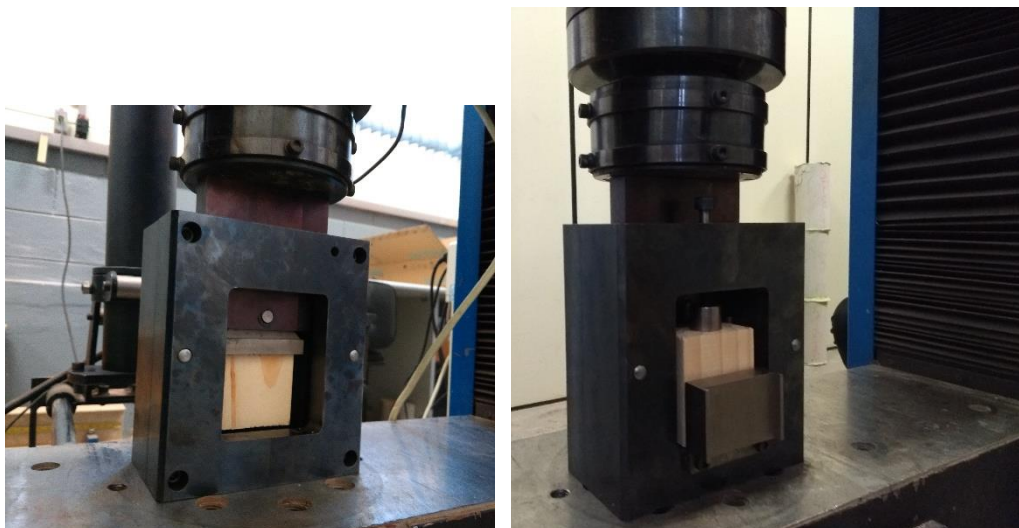


Figura 71. Configuração do ensaio de cisalhamento CP-NBR
Fonte. Própria

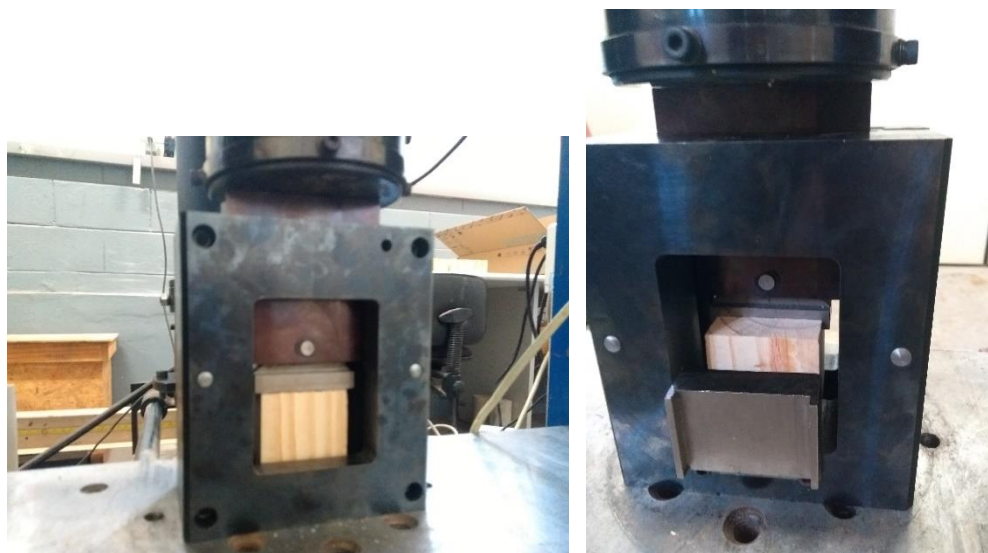


Figura 72. Configuração do ensaio de cisalhamento CP-ASTM
Fonte. Própria

5.4.1. Estudo analítico dos resultados de ensaio

Para o cálculo das tensões de cisalhamento máximas fez-se a razão entre a força última de ruptura aplicada e a área cisalhante (Equação 10). Para tanto, foram consideradas as dimensões reais (h e w) dos corpos de prova aferidas em laboratório.

$$\tau = \frac{F_{máx}}{h \cdot w} \quad (10)$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento de ruptura;

$F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada;

h é a largura;

w é a espessura.

Para avaliar a influência da colagem na resistência ao cisalhamento utilizou-se o parâmetro de compatibilidade estrutural “ η ” que se trata da relação entre as resistências na linha de adesivo e na madeira maciça proposta por Pizzo e Smedley (2015) com modificação para esse trabalho considerando o ensaio somente em condição de equilíbrio (Equação 11):

$$\eta = \frac{\tau_{lc}}{\tau_m} \quad (11)$$

Onde:

η é a relação entre as tensões resistentes (linha de adesivo/ madeira);

τ_{lc} é a tensão cisalhante resistente na linha de adesivo;

τ_m é a tensão cisalhante resistente da madeira.

Nesse contexto, considerou-se o desempenho satisfatório da resistência na linha de adesivo $\eta \geq 1$.

5.4.2. Comparação estatística

Para se fazer a comparação estatística entre os valores médios de resultados obtidos nesta pesquisa foi utilizado o programa Minitab (RYAN e JOINER, 1994), conforme Mascia (1991), o qual se descreve a seguir.

Seja então μ_1 a média da primeira amostra e μ_2 a média da segunda amostra. Para se testar se estas duas amostras pertencem a um mesmo universo, emprega-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ versus } H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Calculando-se a significância através da expressão 12:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \leq t\phi(P\%) \quad (12)$$

Onde:

- x_1 é a estimativa da média da amostra 1;
- x_2 é a estimativa da média da amostra 2;
- s_1 é o desvio padrão da amostra 1;
- s_2 é o desvio padrão da amostra 2;
- n_1 é a quantidade de amostras da população 1;
- n_2 é a quantidade de amostras da população 2;
- $t\phi(P\%)$ é o valor de 't-Student' com P% de confiança.

Aceita-se a hipótese $H_0: \mu_1 = \mu_2$ versus $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ caso, ou seja, as amostras pertencem ao um mesmo universo, não havendo diferença entre as amostras.

Por outro lado, para se verificar se as médias das amostras são estatisticamente equivalentes, isto é, se o intervalo da diferença das médias μ_2 e μ_1 contém o zero, determina-se o intervalo (Equação 13):

$$\Delta_- = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - t\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2} \leq \mu_2 - \mu_1 \leq (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) + t\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2} = \Delta_+ \quad (13)$$

A fim de analisar estatisticamente a diferença entre as médias das resistências ao cisalhamento estudadas, realizou-se o teste denominado: "TWO SAMPLE" com $\alpha = 0,05$ que define um intervalo com 95% de confiança da diferença entre as médias das amostras. Com $t(\alpha/2)$ definido em tabela padrão em função dos graus de liberdade (df) calculado pela Equação 14 (RYAN e JOINER, 1994):

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}{\frac{1}{n_1 - 1} \left(\frac{s_1^2}{n_1}\right) + \frac{1}{n_2 - 1} \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)} \quad (14)$$

6. RESULTADOS

6.1. Numérico

Na Figuras 73 e 74 apresenta-se o resultado padrão para a tensão cisalhante (τ_{xz}) no plano xy para cada um dos tipos de corpos de prova estudados, sendo que o modelo utilizado para a representação foi o de sisal com a resina poliuretano. Na Figura 73 o plano observado é o lado da madeira e na Figura 74 o lado do compósito.

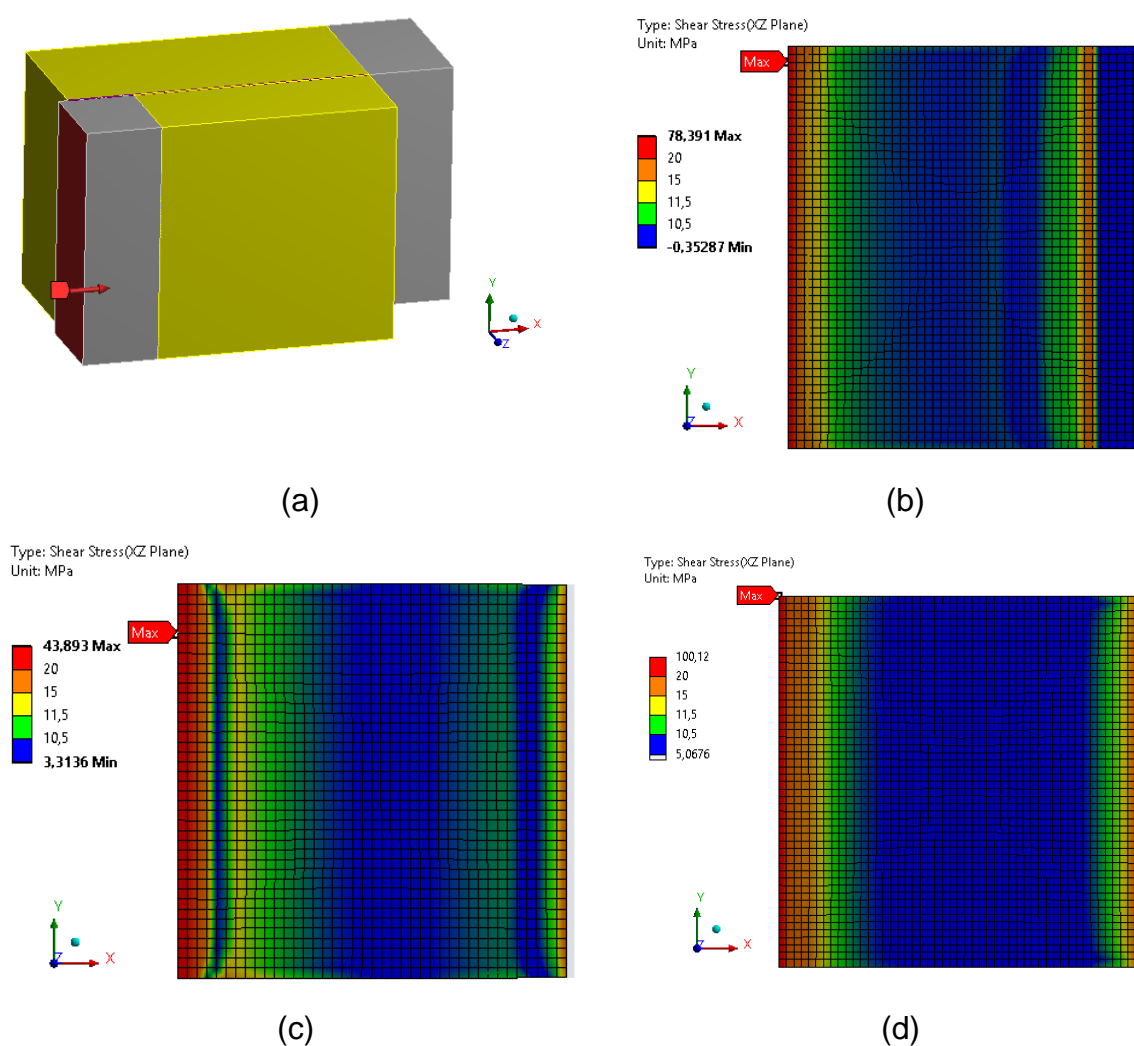


Figura 73. Tensão de cisalhamento no plano, na madeira a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR
Fonte: Própria

Observa-se dois principais comportamentos, primeiramente, uma concentração de tensão cisalhante nas extremidades dos corpos de prova, chegando a seus valores máximos, que numericamente varia entre os diferentes corpos de

prova. Já na parte central, a tensão mantém-se aproximadamente constante próxima a 8 MPa, porém com tensão inferior à teórica que representa 11 MPa.

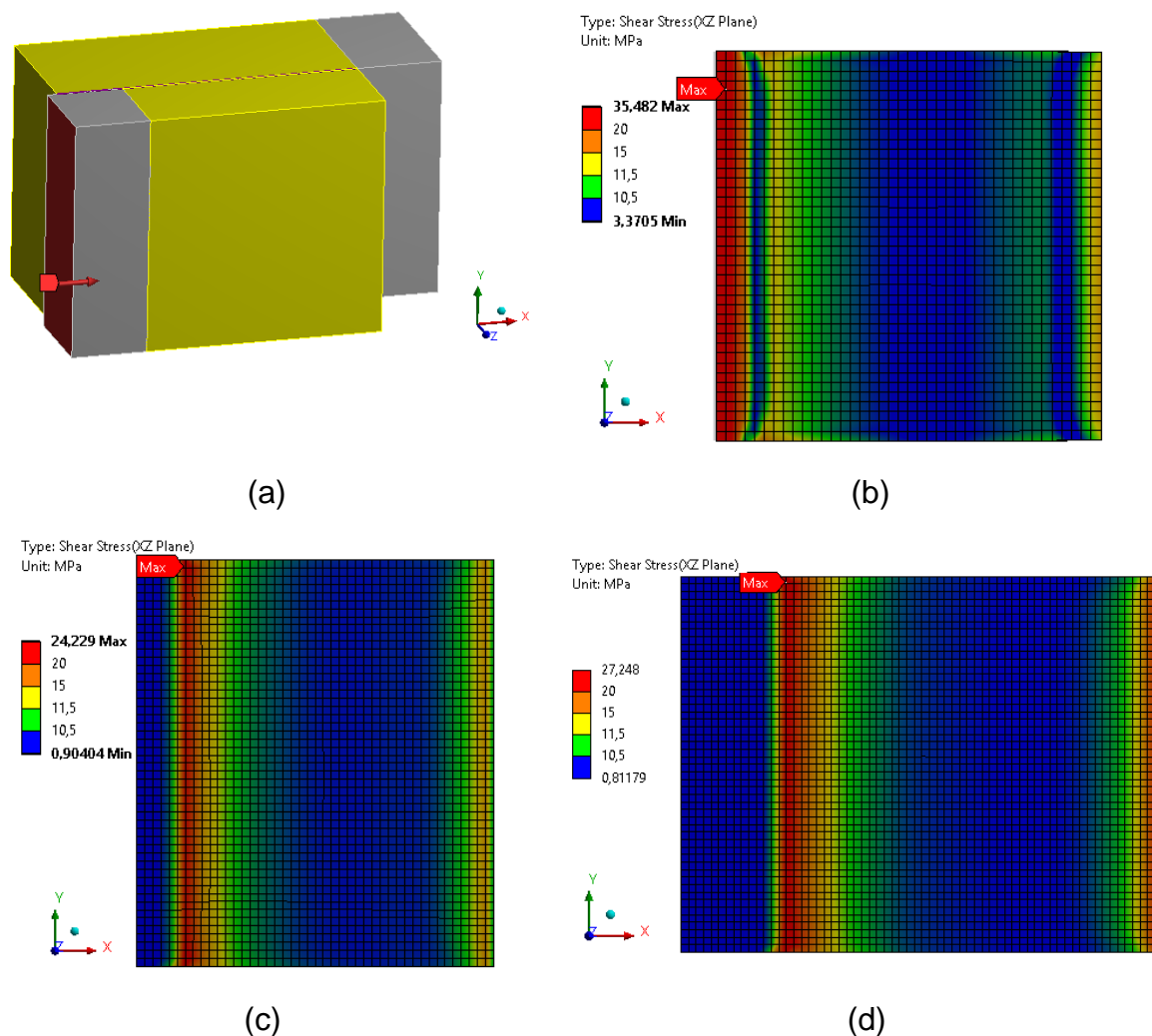


Figura 74. Tensão de cisalhamento no plano, na resina a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR
Fonte: Própria

Nas Figuras 75 e 76 apresenta-se o resultado padrão do comportamento da tensão normal (σ_{zz}) no plano xy para os tipos de corpos de prova estudados. Na Figura 75 o plano observado é o lado da madeira e na Figura 76 o lado do compósito.

Na parte superior dos corpos de prova NBR e ASTM, observa-se uma tensão normal de tração e uma tensão de compressão na parte inferior. Esses dois fenômenos podem ser explicados pela ocorrência do binário (Figura 36) que devido a semelhança no tipo de aplicação de carregamento para os corpos estudados, observa-se efeitos similares no comportamento. Por outro lado, no corpo de prova

IVALSA observa-se uma tensão de compressão na extremidade do corpo de prova seguida por uma tração nesta porção do corpo de prova, já na porção inferior o contrário acontece.

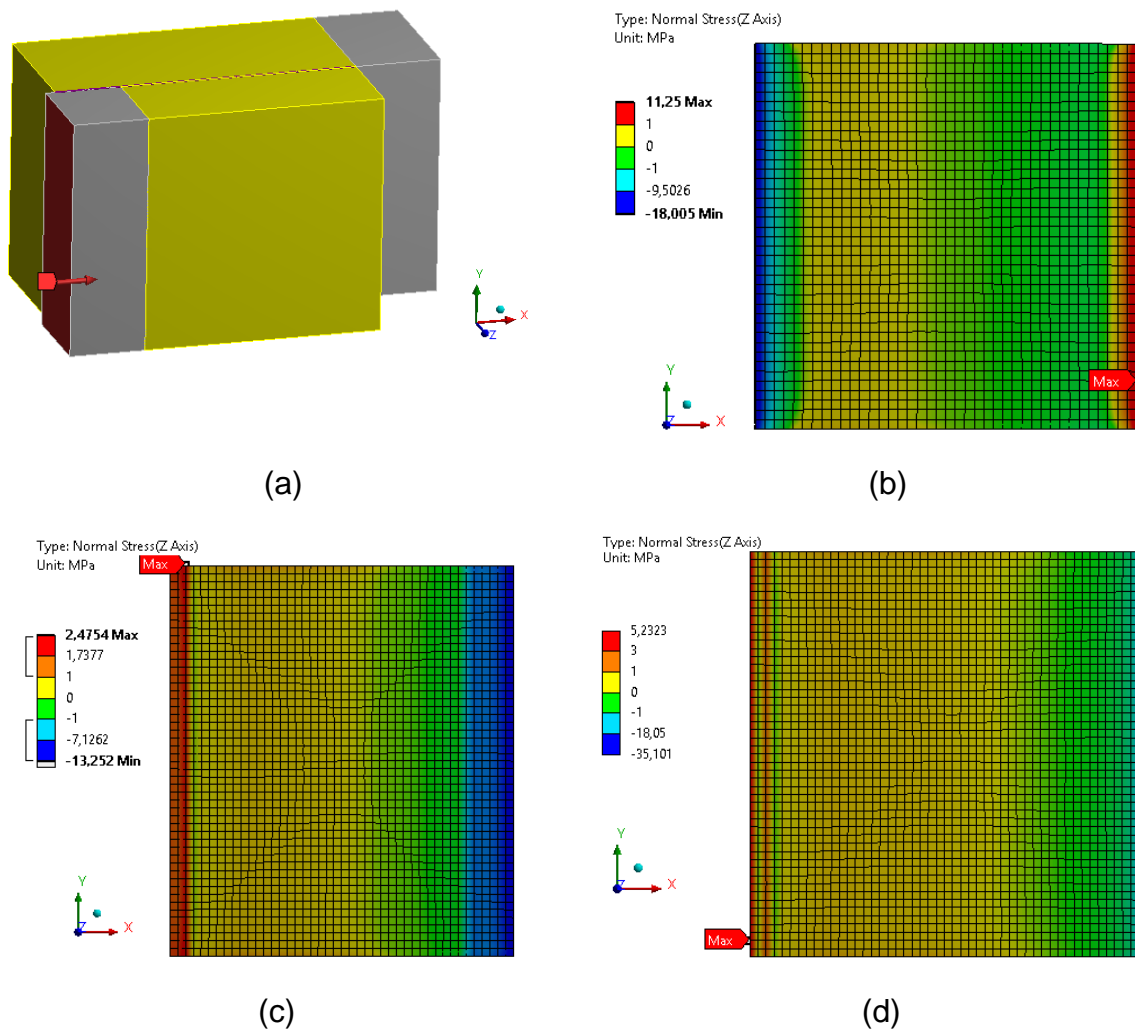


Figura 75. Tensão normal no plano, na madeira a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR Fonte: Própria

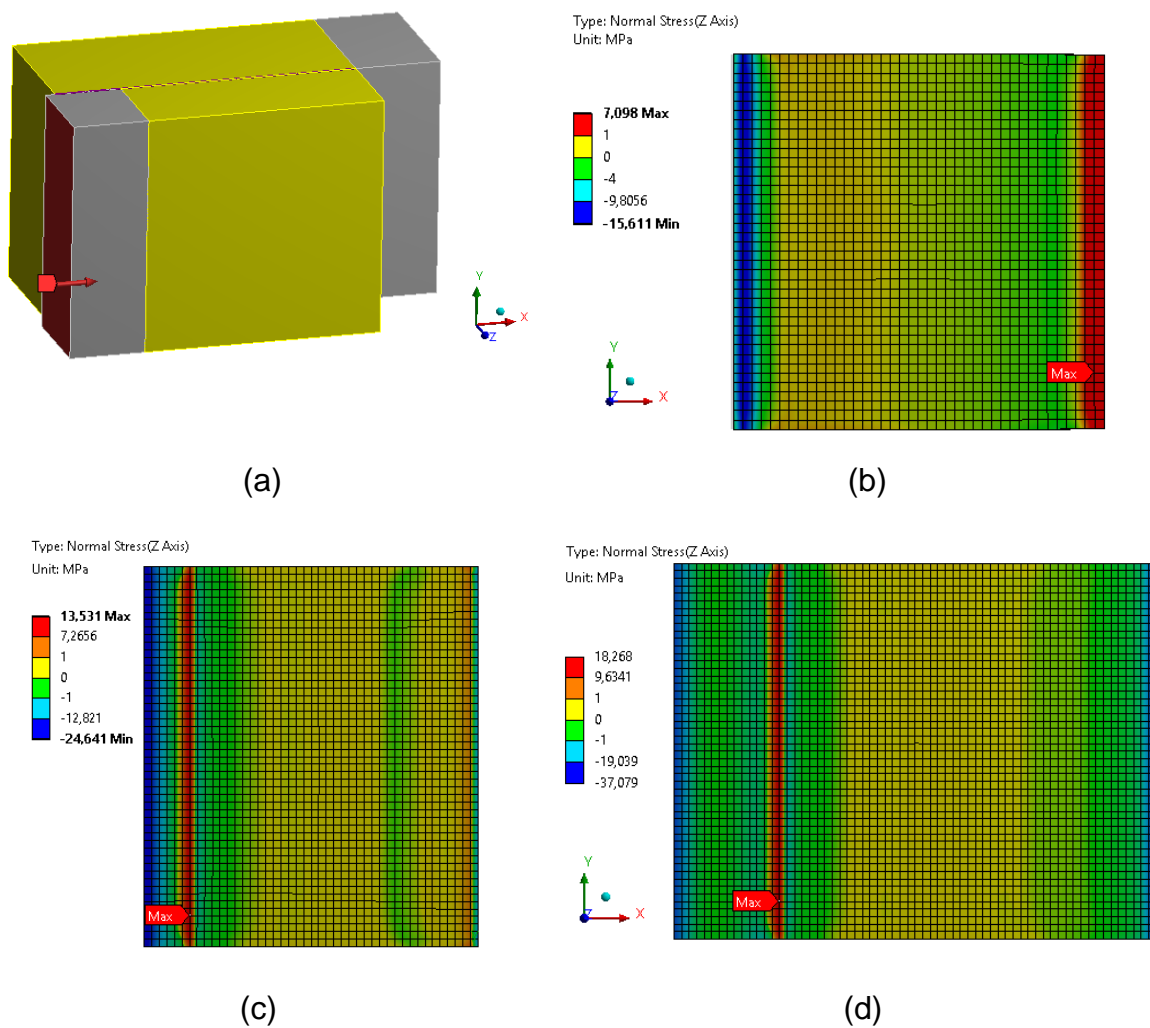


Figura 76. Tensão normal no plano, na resina a) Direção do CP; b) IVALSA; c) ASTM; d) NBR
Fonte: Própria

Para melhor interpretação dos resultados, criou-se um eixo orientado no centro do plano teórico de cisalhamento (plano xy), e então foram analisadas as distribuições de tensões cisalhantes e normais ao longo destes eixos (Figura 77).

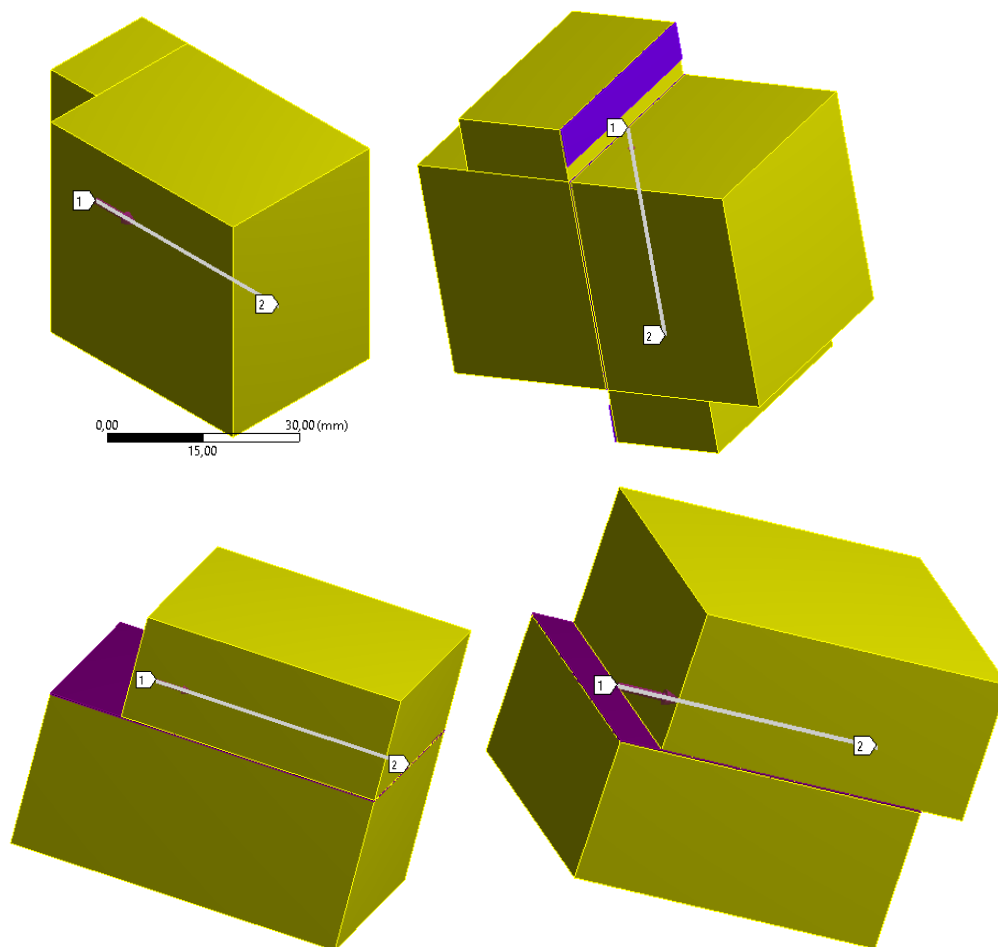


Figura 77. Eixo orientado no centro do plano de cisalhamento
Fonte: Própria

6.1.1. Corpo de prova IVALSA

O corpo de prova de madeira tem um total de 37091 nós e 34424 elementos (29900 elementos sólidos e 4524 elementos de contato). Os corpos de prova de compósitos têm, um total de 208046 nós e 66312 elementos (44866 elementos sólidos e 21446 elementos de contato).

Nas Figuras 78 e 79 apresenta-se a representação da distribuição da tensão cisalhante do eixo central no plano de cisalhamento orientado de cima para baixo ao longo do eixo z (Figura 77).

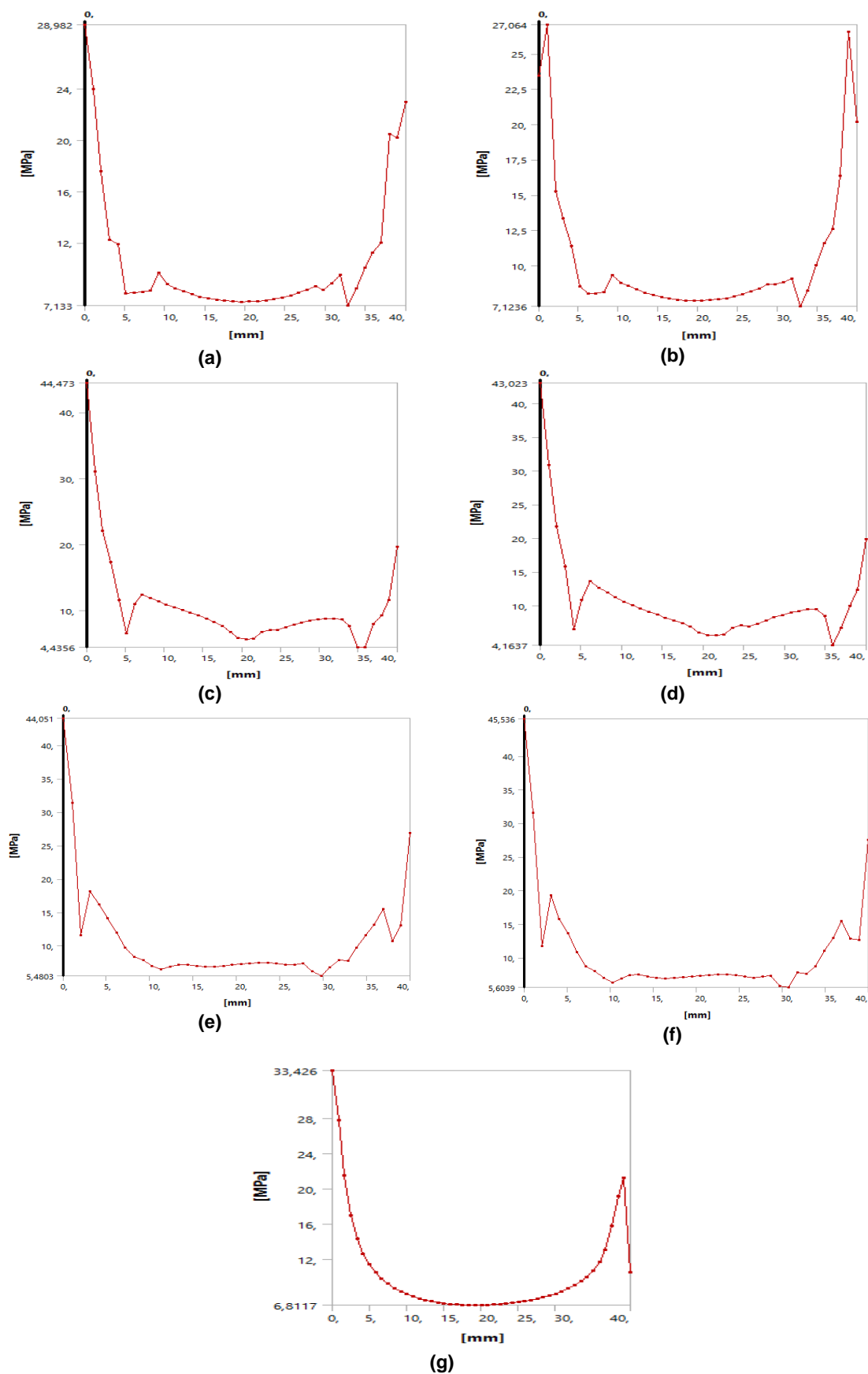


Figura 78. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) I.E; b) I.P; c) I.E.S; d) I.P.S; e) I.E.V; f) I.P.V; g) I
 Fonte: Própria

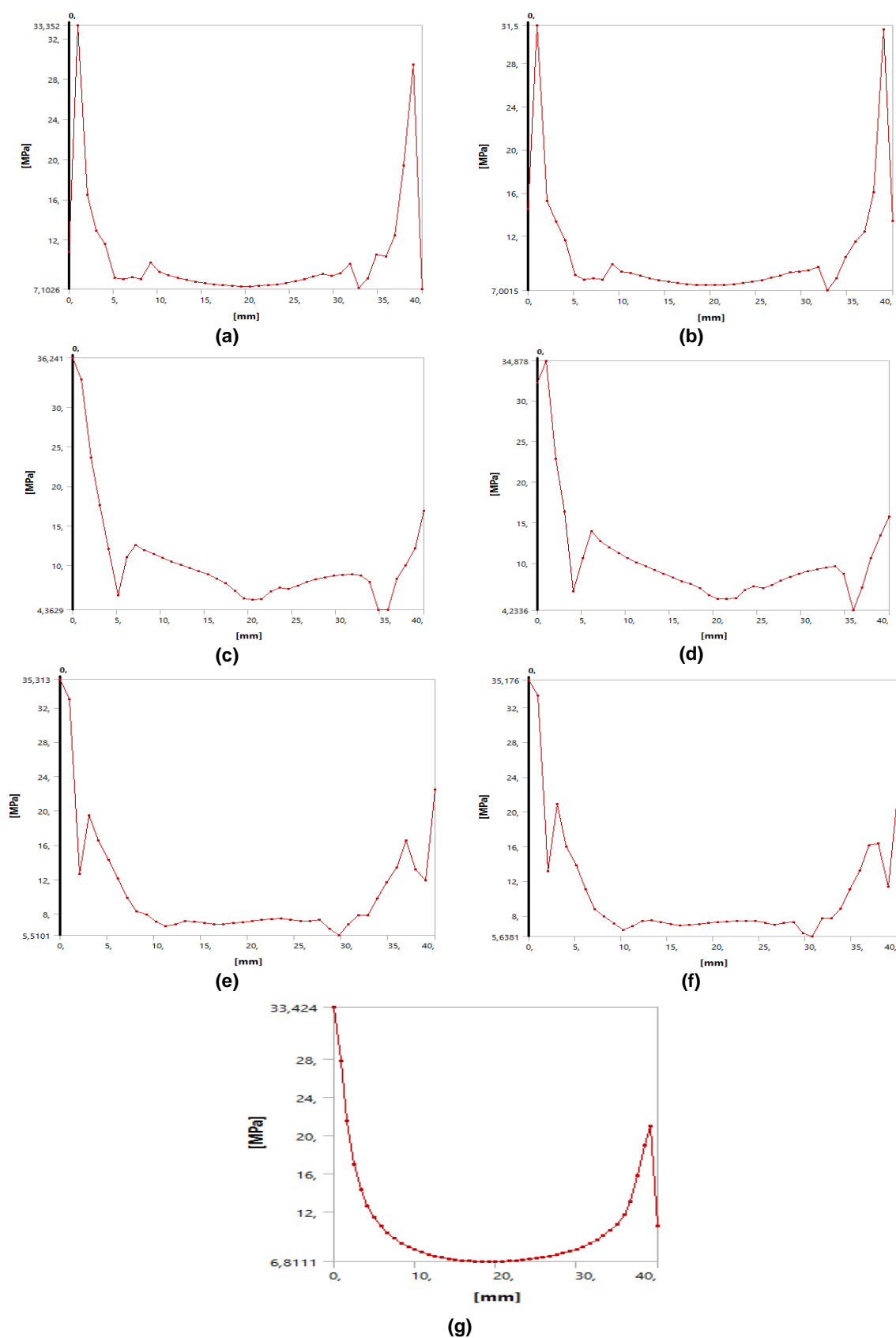


Figura 79. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) I.E; b) I.P; c) I.E.S; d) I.P.S; e) I.E.V; f) I.P.V ; g) I
 Fonte: Própria

Para cada um dos corpos de prova observa-se diferentes comportamentos que são devidos principalmente às diferenças entre os módulos de elasticidade e a espessura de junta. Por outro lado, nota-se semelhanças nos comportamentos, como a concentração de tensões nas bordas.

Na Tabela 18 são apresentadas as tensões cisalhantes máximas (τ_{max}), a central (τ_{cen}) e a média (τ_{med}) para cada um dos diferentes corpos de prova tanto observada na madeira, quanto no compósito, considerando-se todos os pontos do plano de cisalhamento.

Corpo de prova	Madeira			Compósito		
	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)
I	31,58	6,84	10,60	33,43	6,82	10,48
I.E	28,98	7,45	10,65	33,35	7,40	10,21
I.P	27,06	7,54	10,58	31,50	7,48	10,39
I.E.S	44,47	5,77	10,79	36,24	5,72	10,68
I.P.S	43,02	5,78	10,79	34,88	5,76	10,63
I.E.V	44,05	7,24	10,89	35,31	7,16	10,74
I.P.V	45,54	7,33	10,92	35,18	7,25	10,73

Fonte: Própria

Na Figura 80 apresenta-se a tendência do aumento nas tensões médias devido as variações dos módulos de elasticidades dos compósitos estudados.

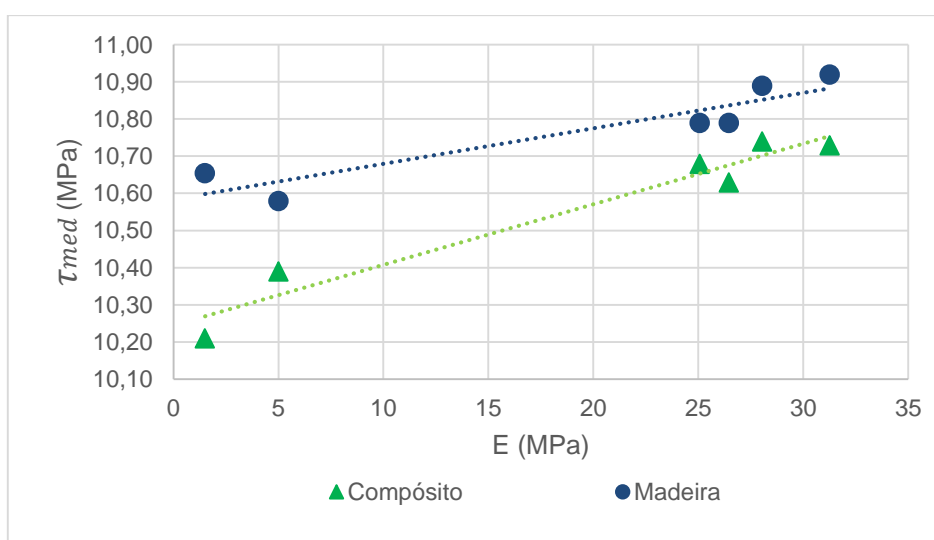


Figura 80. Módulo de elasticidade x Tensão média

Fonte: Própria

Outro comportamento observado foi a relação inversamente proporcional entre a tensão no centro do vão e a espessura dos compósitos (Figura 81).

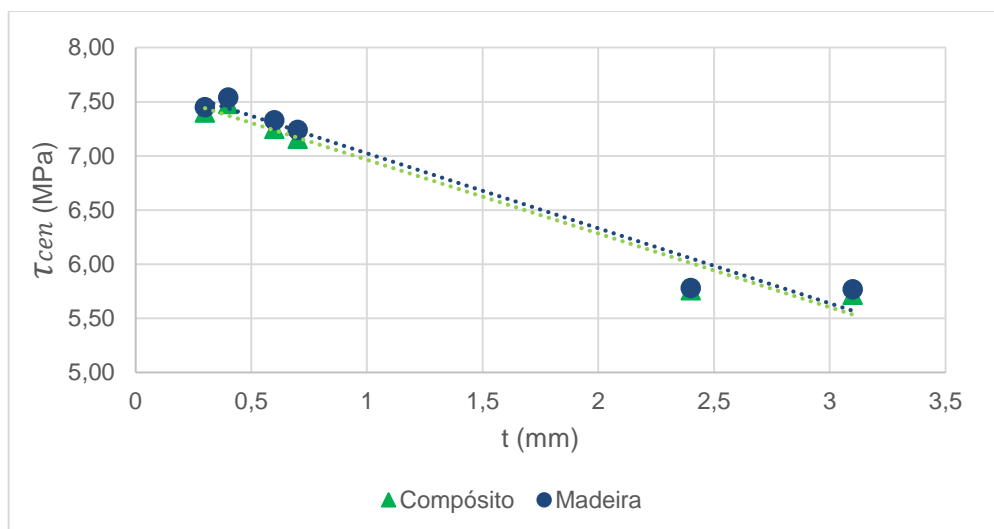
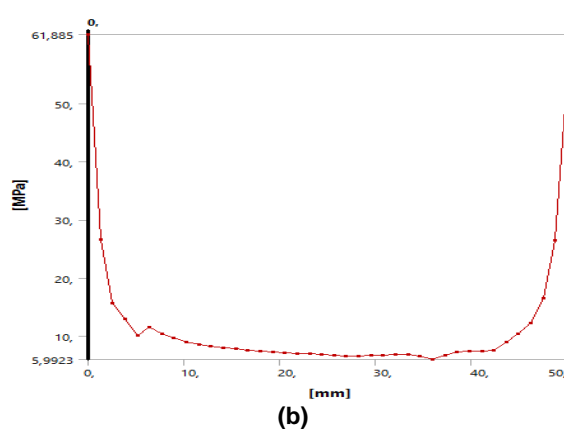
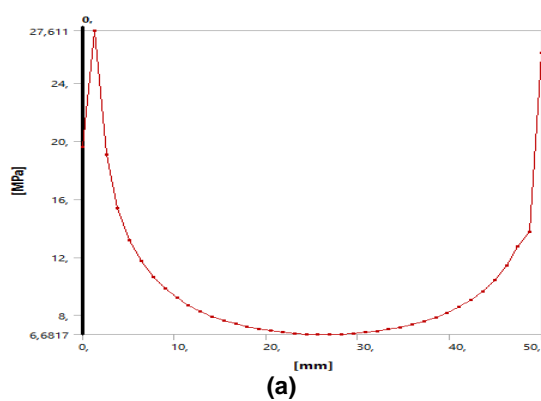


Figura 81. Espessura do compósito x Tensão no centro do vão
Fonte: Própria

6.1.2. Corpo de prova NBR

Os corpos de prova no formato NBR têm um total de 289779 nós e 90558 elementos (63670 elementos sólidos e 26888 elementos de contato).

Nas Figuras 82 e 83 apresenta-se a representação da distribuição da tensão cisalhante do eixo central no plano de cisalhamento orientado de cima para baixo ao longo do eixo z (Figura 77).



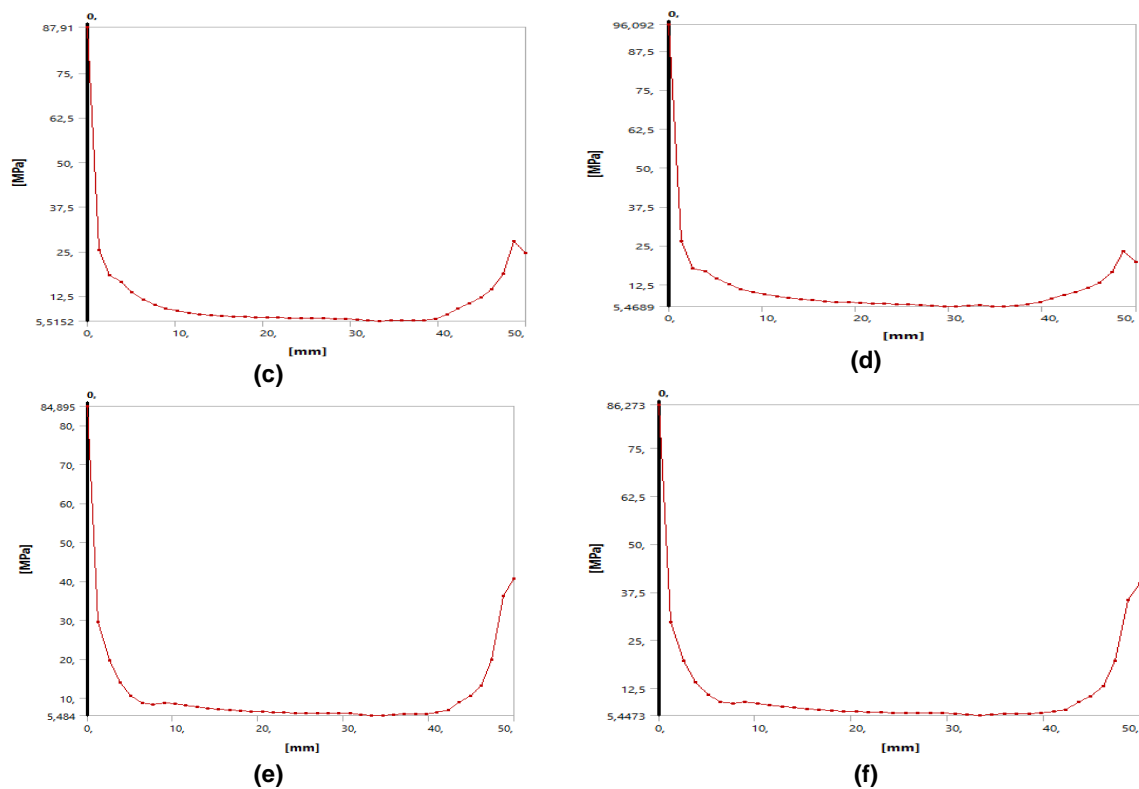
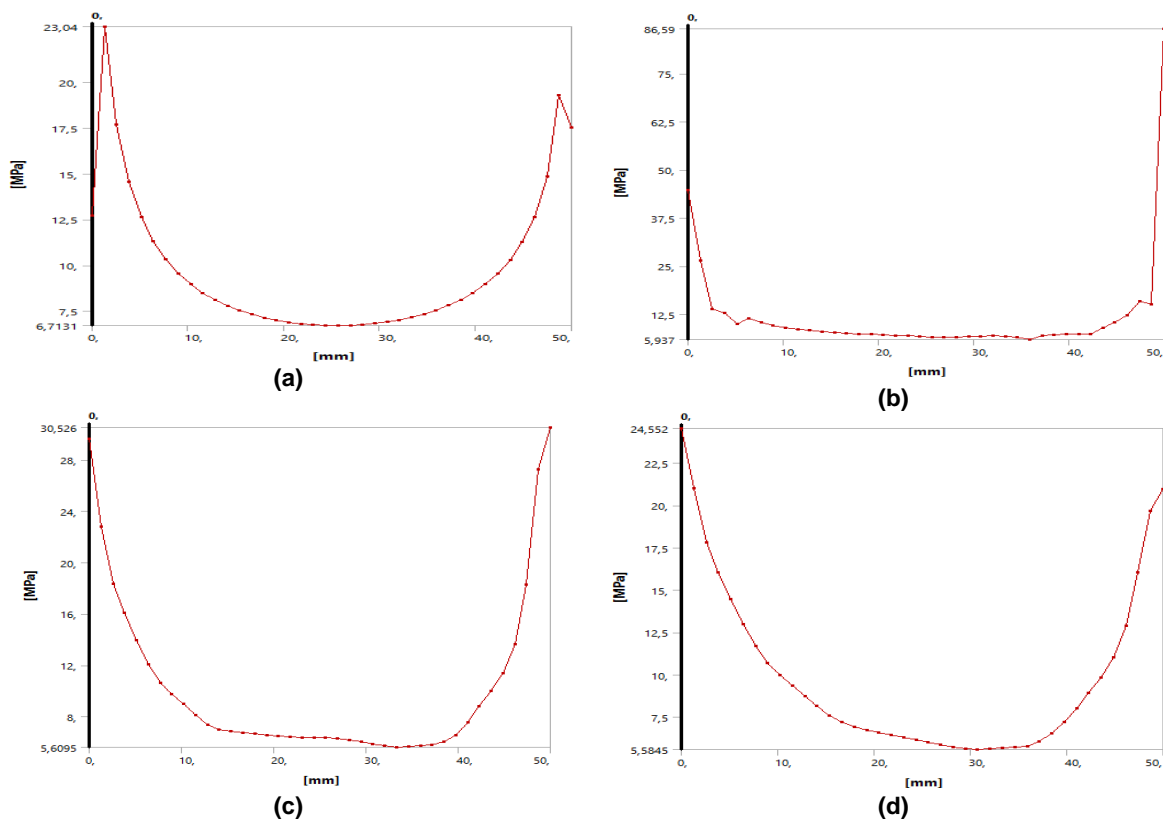


Figura 82. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) N; b) N.E.P.I; c) N.E.P.I.S; d) N.P.S; e) N.E.P.I.V; f) N.P.V
Fonte: Própria



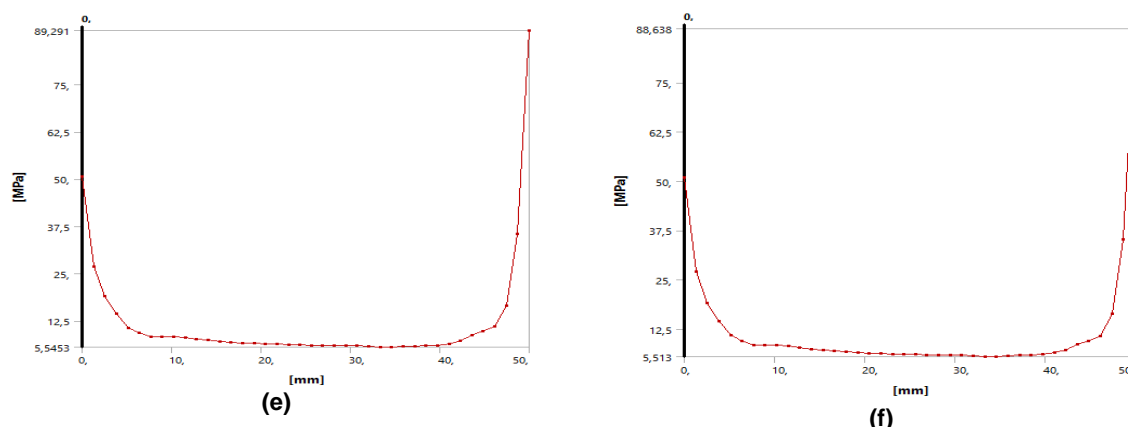


Figura 83. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) N; b) N.EPI; c) N.EPI.S; d) N.P.S; e) N.EPI.V; f) N.P.V
 Fonte: Própria

Na Tabela 19 são apresentadas as tensões cisalhantes máximas (τ_{max}), a central (τ_{cen}) e a média (τ_{med}) para cada um dos diferentes corpos de prova tanto observada na madeira, quanto no compósito, considerando-se todos os pontos do plano de cisalhamento.

Se comparado com os outros dois corpos de provas estudados, percebe-se elevadas concentrações de tensões nas extremidades dos corpos de prova chegando a 96,09 MPa para o corpo de prova de sisal colado com resina PU.

Tabela 19. Tensão cisalhante

Corpo de prova	Madeira			Compósito		
	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)
N	27,61	6,69	10,12	23,04	6,72	9,83
N.EPI	61,89	6,70	11,92	86,59	6,62	11,92
N.EPI.S	87,91	6,35	11,81	30,53	6,33	10,42
N.P.S	96,09	6,08	11,86	24,55	6,00	9,95
N.EPI.V	84,90	6,13	12,04	89,29	6,07	12,17
N.P.V	86,27	6,11	12,05	88,64	6,05	12,16

Fonte: Própria

Analisando-se as tensões médias em comparação com a tensão teórica no plano de cisalhamento (11 MPa), nota-se que a tensão média aferida numericamente para o corpo de prova de madeira é inferior à teórica, enquanto para os compósitos é superior à teórica.

No corpo de prova da NBR, analisando-se os dados da Tabela 19 notou-se uma tendência de diminuição da tensão no meio do vão com o aumento do módulo de elasticidade (Figura 84).

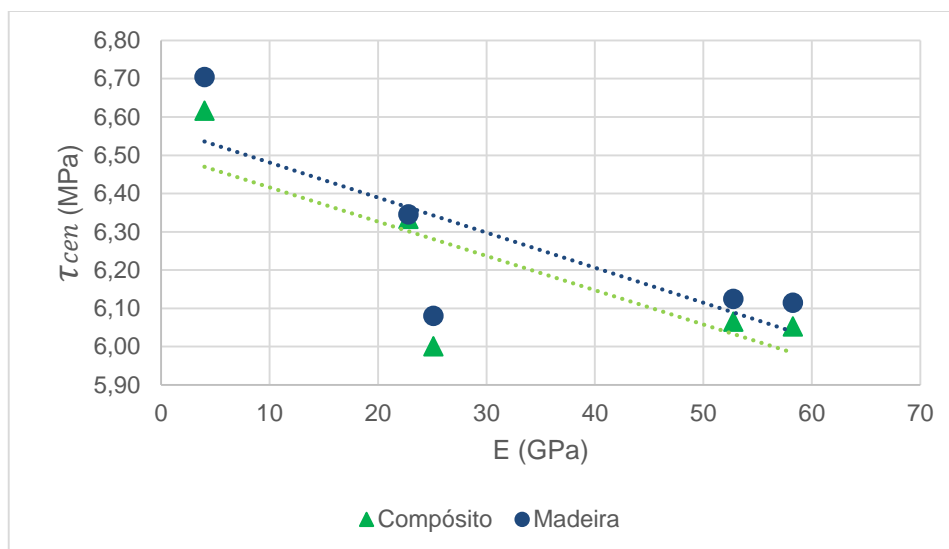


Figura 84. Módulo de elasticidade x Tensão no centro do vão
Fonte: Própria

Observou-se em relação ao aumento da espessura do compósito dois comportamentos: a diminuição na concentração de tensão (máxima tensão) na madeira e o aumento no compósito (Figura 85).

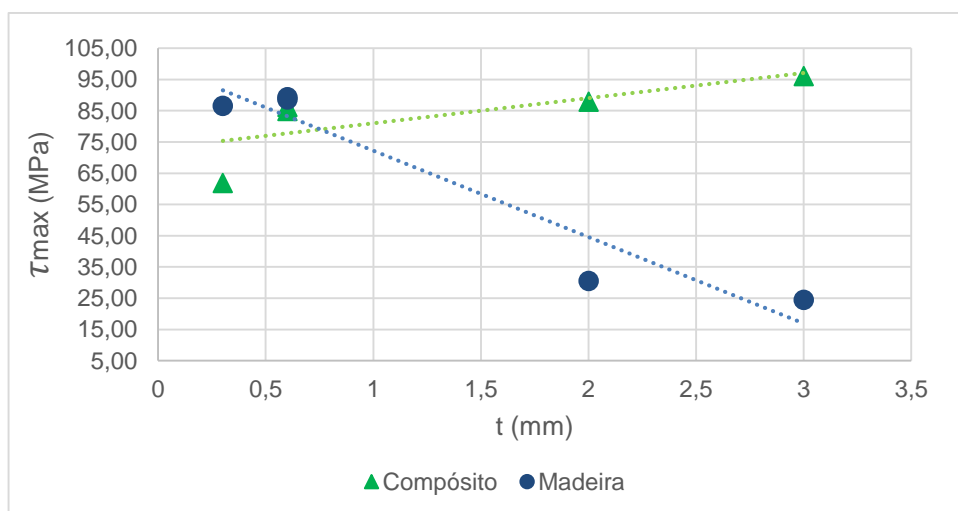


Figura 85. Espessura do compósito x Tensão máxima
Fonte: Própria

6.1.3. Corpo de prova ASTM

Os corpos de prova no formato ASTM têm, um total de 212857 nós e 66880 elementos (46480 elementos sólidos e 20400 elementos de contato).

Nas Figuras 86 e 87 apresenta-se a representação da distribuição da tensão cisalhante do eixo central no plano de cisalhamento orientado de cima para baixo ao longo do eixo z (Figura 77).

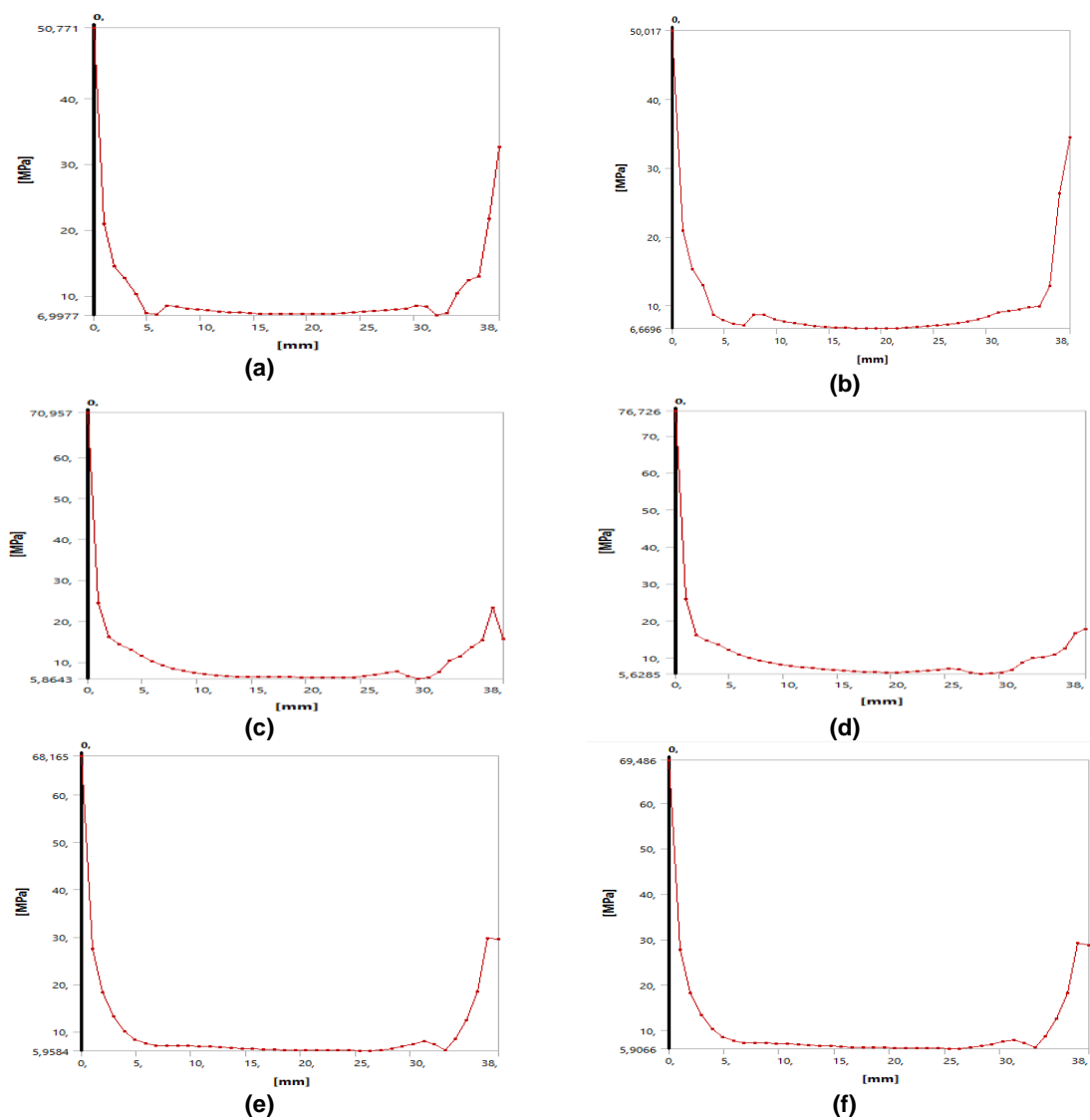


Figura 86. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na madeira a) A; b) A.EPI; c) A.EPI.S; d) A.P.S; e) A.EPI.V; f) A.P.V
Fonte: Própria

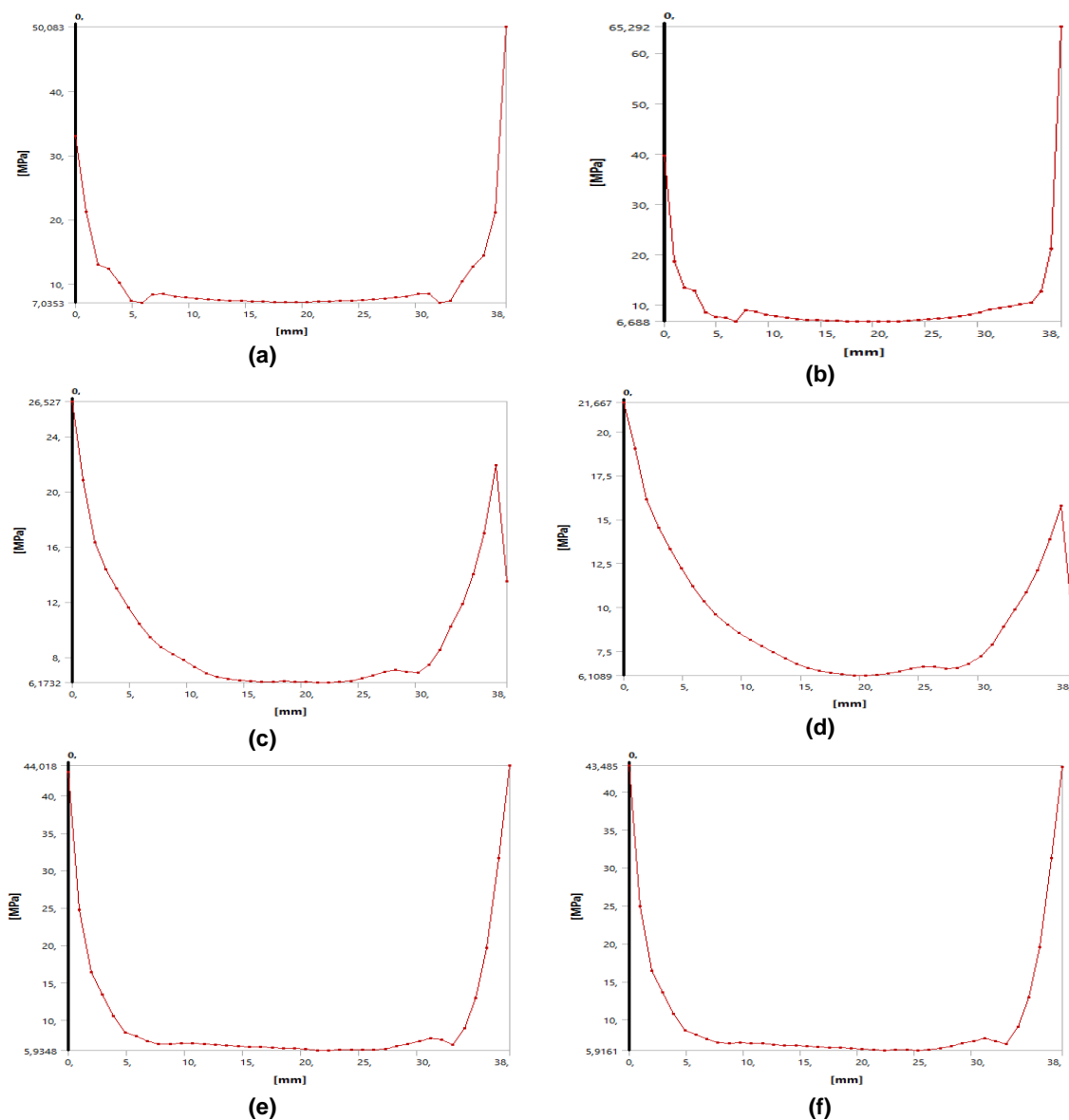


Figura 87. Distribuição da tensão cisalhante ao longo do eixo orientado, na resina a) A; b) A.EPI; c) A.EPLS; d) A.P.S; e) A.EPI.V; f) A.P.V
Fonte: Própria

Na Tabela 20 são apresentadas as tensões cisalhantes máximas (τ_{max}), a central (τ_{cen}) e a média (τ_{med}) para cada um dos diferentes corpos de prova tanto observada na madeira, quanto no compósito, considerando-se todos os pontos do plano de cisalhamento.

Tabela 20. Tensão cisalhante

Corpo de prova	Madeira			Compósito		
	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{cen} (MPa)	τ_{med} (MPa)
A	50,77	7,18	10,65	50,08	7,18	10,64
A.EPI	50,02	6,68	10,65	65,29	6,69	10,94
A.EPI.S	70,96	6,27	10,83	26,53	6,23	9,71
A.P.S	76,73	6,06	10,90	21,67	6,13	9,36
A.EPI.V	68,17	6,16	10,90	44,02	6,18	10,62
A.P.V	69,49	6,16	10,92	43,49	6,17	10,63

Fonte: Própria

Para este corpo de prova, observa-se a diminuição da tensão média para altas espessuras (Figura 88).

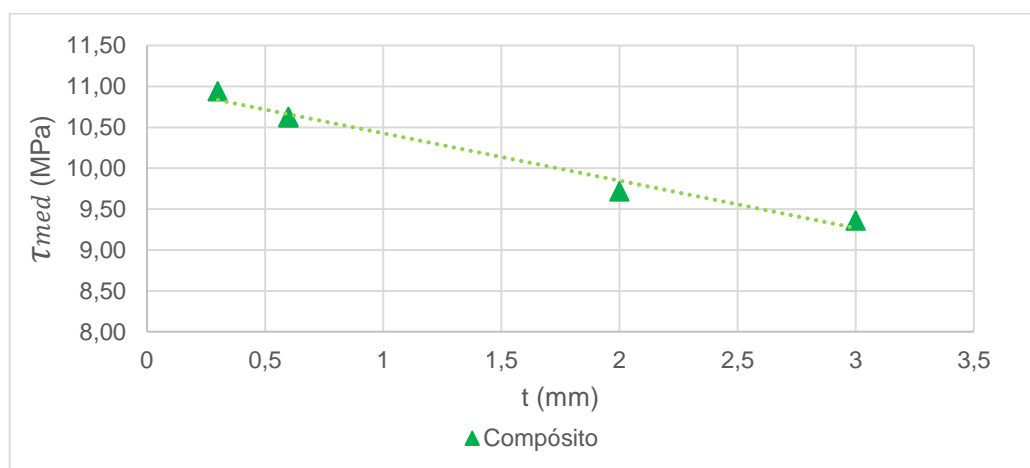


Figura 88. Espessura x Tensão Média

Fonte: Própria

6.1.4. Fatores de correção

A partir da observação de tensões médias inferiores à teórica no plano, podendo gerar insegurança através da adoção de tensões resistentes superiores aos reais, sugere-se a adoção de um fator de correção a ser aplicado à tensão resistente de cálculo (Equação 15).

$$\tau_k = k \cdot \tau_m \quad (15)$$

O fator de correção foi definido como o quociente entre a tensão aferida numericamente e a analítica (11MPa) (Tabela 21).

Tabela 21. Fatores de correção

IVALSA			NBR			ASTM		
CP	τ_{med} (MPa)	k	CP	τ_{med} (MPa)	K	CP	τ_{med} (MPa)	k
I	10,43	0,95	N	9,98	0,91	A	10,64	0,97
I.E	10,49	0,95	N.EPI	11,92	1,00	A.EPI	10,80	0,98
I.P	10,74	0,98	N.EPI.S	11,12	1,00	A.EPI.S	10,27	0,93
I.E.S	10,71	0,97	N.P.S	10,91	0,99	A.P.S	10,13	0,92
I.P.S	10,82	0,98	N.EPI.V	12,11	1,00	A.EPI.V	10,76	0,98
I.E.V	10,83	0,98	N.P.V	12,10	1,00	A.P.V	10,77	0,98

Fonte: Própria

Para valores acima de 1, adotou-se o valor de 1. Para aplicabilidade nas diversas aplicações de diferentes fibras, resinas e espessuras, recomenda-se a utilização de acordo com a Tabela 22.

Tabela 22. Fatores de correção simplificado

CP	k
IVALSA	0,95
NBR Madeira	0,90
NBR Compósitos	1,00
ASTM $t < 1$	0,97
ASTM $t > 1$	0,92

Fonte: Própria

Observa-se que com a utilização do modelo proposto pela NBR, na maioria dos casos, observa-se tensões superiores à teórica, devido às altas concentrações de tensões próximas à borda, o que pode gerar a ruptura precoce do corpo de prova e consequentemente adoção de tensões resistentes inferiores aos reais.

Ressalta-se que os valores encontrados neste trabalho, para os coeficientes de modificação, podem ter sido influenciados por diversos fatores, incluindo a modelagem numérica, por essa razão é necessário outros trabalhos com outras abordagens em elementos finitos para confirmação e conferência destes resultados.

6.2. Experimentais

Nos ensaios experimentais os tipos de ruptura observados foram caracteristicamente devido ao cisalhamento, paralelos ao plano teórico de cisalhamento (Figura 89).

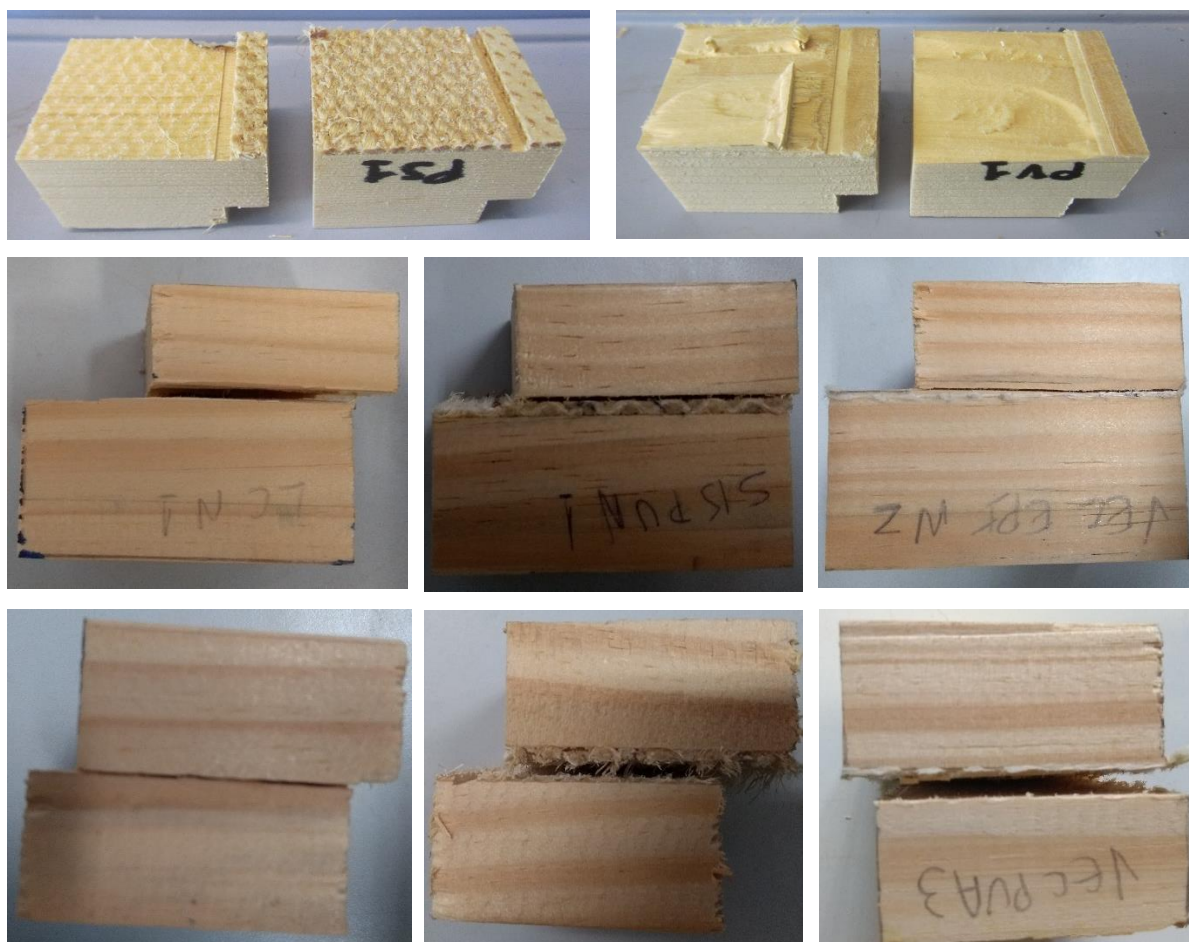


Figura 89. Corpos de prova após ensaio
Fonte: Própria

6.2.1. Corpo de prova IVALSA

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios da linha de adesivo (Epóxi e Poliuretano) e da madeira maciça com o CP-IVALSA são apresentadas na Figura 90.

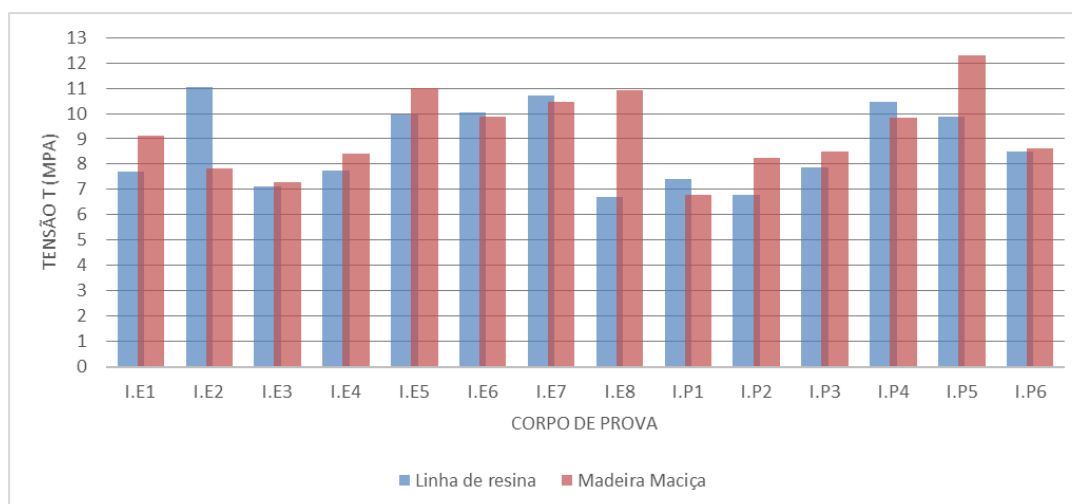


Figura 90. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA
Fonte. Própria

No geral, observa-se uma dispersão nos valores de resistências. Sendo que, 35,7% dos corpos de prova apresentam valores superiores de resistência na linha do adesivo em relação à resistência madeira maciça enquanto 64,3% apresentam o comportamento contrário.

Em especial para este tipo de corpo de prova, as resistências na linha de resina e da madeira podem ser comparadas diretamente. A Tabela 23, apresenta as relações de tensão cisalhante resistente para os oito corpos de prova com o adesivo epóxi.

O menor valor de resistência observado no ensaio com a resina epóxi foi o obtido para o corpo de prova I.E8 (6,72 MPa) no ensaio de cisalhamento do adesivo, para esse mesmo corpo de prova tem-se umas das melhores performances da madeira (13,58 MPa) o que pode indicar uma falha na colagem deste corpo de prova ou um defeito na madeira localizado justamente próximo a região da linha do adesivo.

Tabela 23. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira colada com Epóxi e da madeira maciça e a relação entre elas

CP	τ_{lr} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lr}/τ_m)
I.E1	7,70	9,13	0,84
I.E2	11,05	7,82	1,41
I.E3	7,10	7,28	0,98
I.E4	7,74	8,42	0,92
I.E5	9,95	10,99	0,91
I.E6	10,03	9,88	1,01
I.E7	10,71	10,46	1,02
I.E8	6,72	10,90	0,62
Média	8,87	9,36	0,95
CV (%)	18,26	14,20	

Fonte. Própria

O efeito oposto ocorreu no corpo de prova I.E2 que obteve um dos piores desempenhos da madeira (7,82 MPa) e a maior resistência na região do adesivo (11,05 MPa), indicando uma colagem eficaz. Destaca-se que, o corpo de prova de madeira maciça pode ter sido comprometido no ensaio, através das microfissuras perdendo parte de sua capacidade resistente (PIZZO e SMEDLEY, 2015).

Na Tabela 24 são apresentados os resultados dos seis corpos de prova com o adesivo poliuretano.

Tabela 24. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira colada com PU e da madeira maciça e a relação entre elas

CP	τ_{lc} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lc}/τ_m)
I.P1	7,42	6,77	1,10
I.P2	6,77	8,24	0,82
I.P3	7,87	8,49	0,93
I.P4	10,45	9,82	1,06
I.P5	9,88	12,28	0,80
I.P6	8,48	8,62	0,98
Média	8,48	9,04	0,94
CV (%)	15,43	18,85	

Fonte. Própria

Já o adesivo poliuretano a menor relação observada foi a do CP I.P5, o que pode ser explicado pela alta resistência alcançada pela madeira neste CP, fazendo a relação diminuir.

A Figura 91 trata-se de uma representação gráfica da relação entre as resistências, onde os triângulos são corpos de prova de epóxi e os círculos os de

poliuretano. As marcações acima da linha representam os corpos de prova com compatibilidade estrutural maiores que 1 e os abaixo os com relação inferior. Neste conjunto de ensaios, pode-se observar que a maioria dos corpos de prova estão abaixo do padrão estipulado.

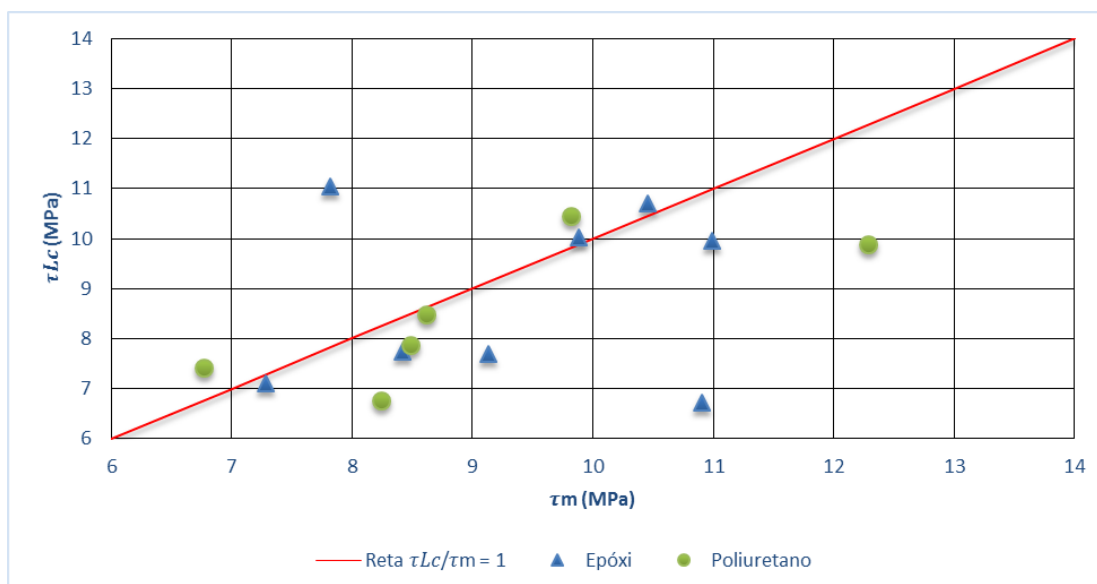


Figura 91. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E e I.P)
Fonte. Própria

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova, nos ensaios para a fibra de sisal colados com epóxi e poliuretano e da madeira maciça, com o CP-IVALSA são apresentadas no gráfico da Figura 92.

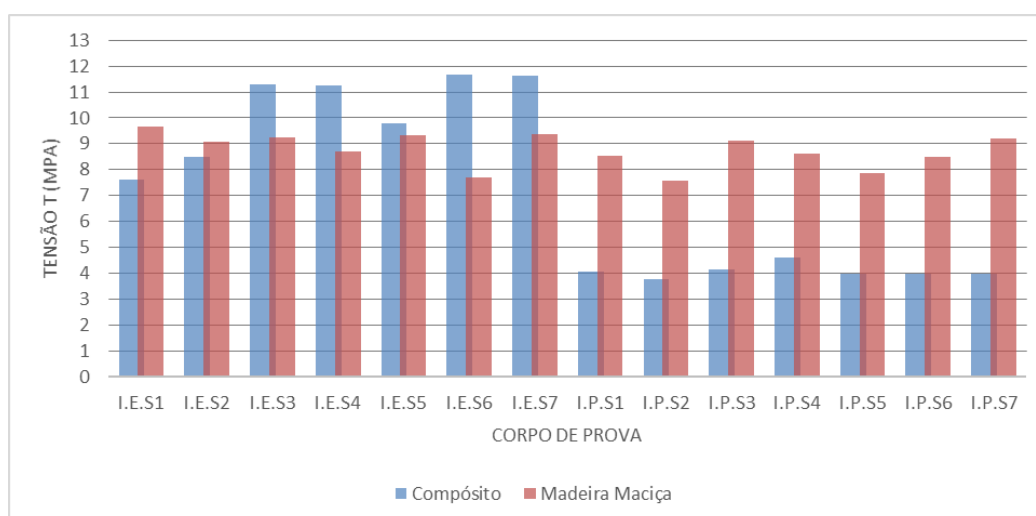


Figura 92. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA
Fonte. Própria

Na Tabela 25 apresentam-se as relações de tensão cisalhante resistente para os sete corpos de prova de sisal coladas com o adesivo epóxi.

O menor valor de resistência observado no ensaio com a resina epóxi foi o obtido para o corpo de prova I.E.S1 (7,63 MPa) no ensaio de cisalhamento do adesivo. No entanto, a pior performance da madeira (7,70 MPa) é observada no corpo de prova I.E.S6.

Tabela 25. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-epóxi-sisal

CP	τ_{lc} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lr}/τ_m)
I.E.S1	7,63	9,68	0,79
I.E.S2	8,51	9,10	0,94
I.E.S3	11,28	9,24	1,22
I.E.S4	11,27	8,69	1,30
I.E.S5	9,79	9,35	1,05
I.E.S6	11,68	7,70	1,52
I.E.S7	11,61	9,38	1,24
Média	10,25	9,02	1,14
CV (%)	14,79	6,75	

Fonte. Própria

Observando-se a relação média entre as resistências, os corpos de prova de sisal colados com resina epóxi, apresentaram um bom desempenho na colagem.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados dos sete corpos de prova de sisal colados com o adesivo poliuretano.

Tabela 26. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-poliuretano-sisal

CP	τ_{lc} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lr}/τ_m)
I.P.S1	4,05	8,56	0,47
I.P.S2	3,79	7,59	0,50
I.P.S3	4,15	9,11	0,46
I.P.S4	4,60	8,63	0,53
I.P.S5	3,99	7,86	0,51
I.P.S6	3,97	8,48	0,47
I.P.S7	4,00	9,22	0,43
Média	4,08	8,49	0,48
CV (%)	5,80	9,02	

Fonte. Própria

Observa-se que para os corpos de prova colados com a resina poliuretano apresentaram, para todos os casos, resistências inferiores à resistência da madeira maciça, o que indica uma falha ou incompatibilidade entre a resina, a fibra e a madeira.

A Figura 93 trata-se de uma representação gráfica da relação entre as resistências, onde os triângulos são corpos de prova de sisal coladas com adesivo epóxi e os círculos os colados com o adesivo poliuretano. As marcações acima da linha representam os corpos de prova com compatibilidade estrutural maiores que 1 e os abaixo os com relação inferior.

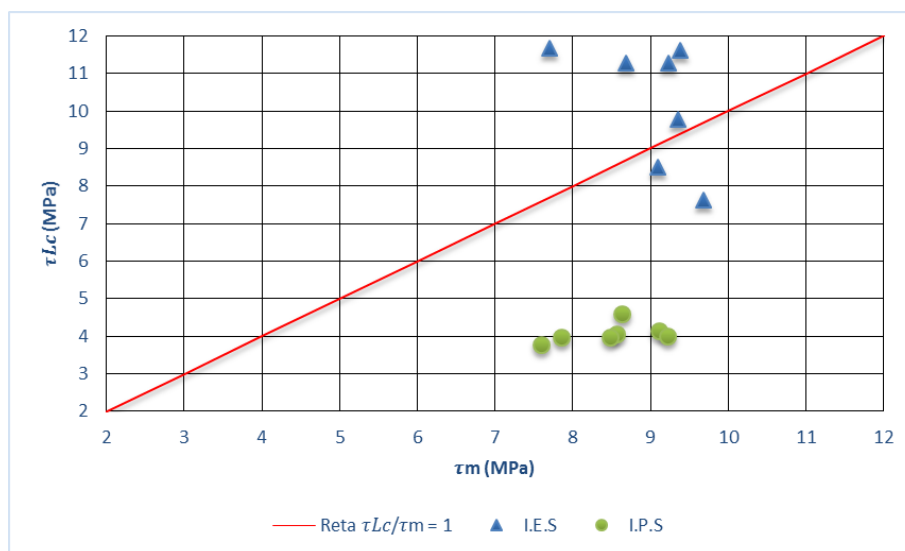


Figura 93. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E.S e I.P.S)
Fonte. Própria

Na Figura 93 visualiza-se a não compatibilidade do sisal com o adesivo poliuretano, apresentando baixa resistência na ligação com relação à resistência da madeira empregada.

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios para a fibra de Vectran colados com Epóxi e Poliuretano e da madeira maciça com o CP-IVALSA são apresentadas na Figura 94. Nota-se uma variabilidade nos resultados, mas na maioria dos casos, a resistência da ligação mostra-se superior ou próxima à resistência da madeira maciça.

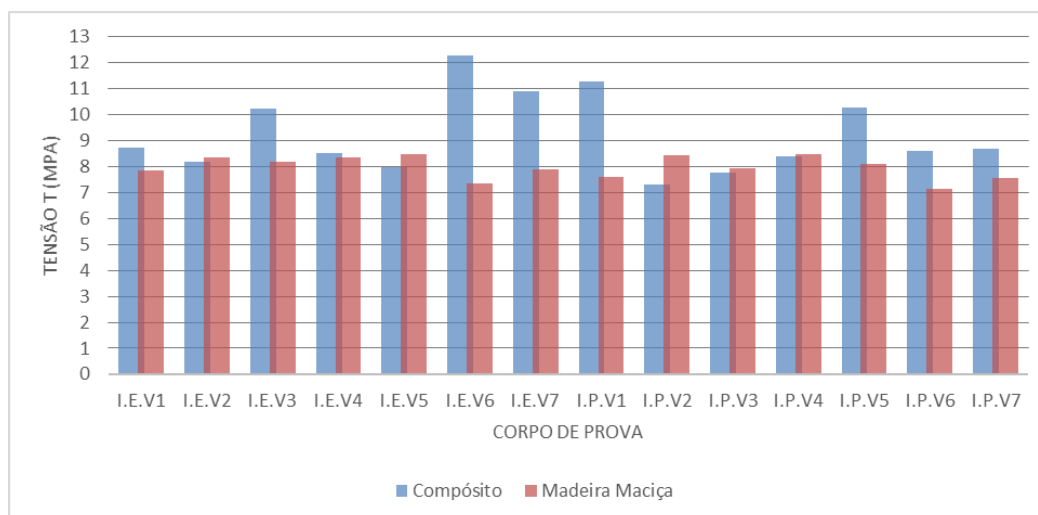


Figura 94. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo IVALSA
Fonte. Própria

Na Tabela 27 apresentam-se as relações de tensão cisalhante resistente para os sete corpos de prova de Vectran coladas com o adesivo epóxi.

Tabela 27. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-epóxi-Vectran

CP	τ_{lc} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lc}/τ_m)
I.E.V1	8,73	7,86	1,11
I.E.V2	8,19	8,36	0,98
I.E.V3	10,22	8,20	1,25
I.E.V4	8,51	8,34	1,02
I.E.V5	7,98	8,48	0,94
I.E.V6	12,29	7,36	1,67
I.E.V7	10,88	7,88	1,38
Média	9,54	8,07	1,18
CV (%)	15,74	4,51	

Fonte. Própria

A relação média entre as resistências de 1,18 aponta para uma aderência adequada para os corpos de prova reforçados com Vectran e resina epóxi, os únicos corpos de prova com relação menor que 1, foram os corpos de prova I.E.V2 e I.E.V5, e ainda assim, com valores acima de 0,94.

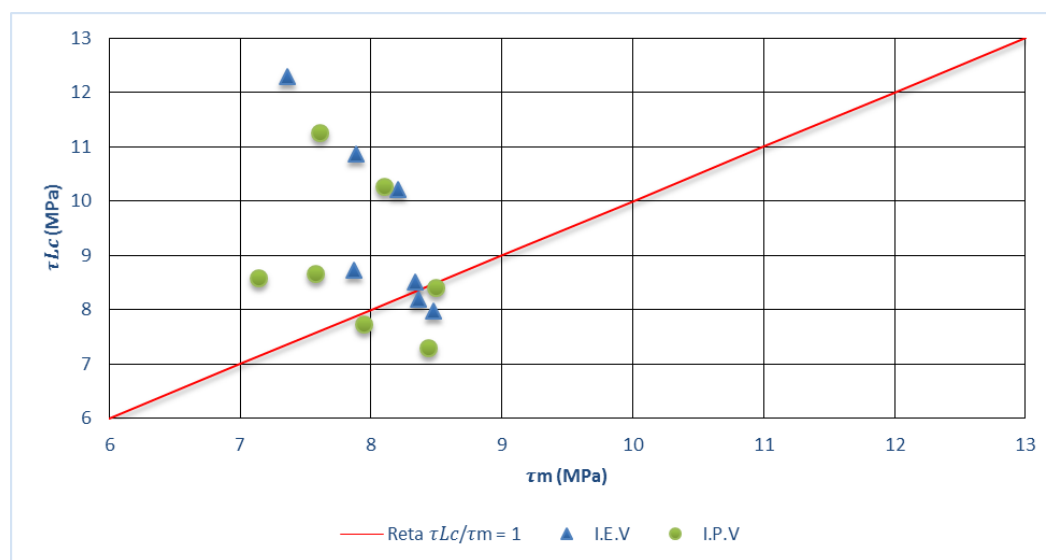
Na Tabela 28 são apresentados os resultados dos sete corpos de prova de Vectran colados com o adesivo poliuretano. Observando-se a relação média entre as resistências, os corpos de prova de Vectran colados com resina poliuretano, apresentaram um bom desempenho.

Tabela 28. Tensão cisalhante: corpos de prova de madeira-poliuretano-Vectran

CP	τ_{lc} (MPa)	τ_m (MPa)	η (τ_{lc}/τ_m)
I.P.V1	11,26	7,61	1,48
I.P.V2	7,30	8,44	0,87
I.P.V3	7,75	7,94	0,98
I.P.V4	8,40	8,49	0,99
I.P.V5	10,28	8,10	1,27
I.P.V6	8,58	7,14	1,20
I.P.V7	8,66	7,57	1,14
Média	8,89	7,90	1,13
CV (%)	14,57	6,15	

Fonte. Própria

A Figura 95 trata-se de uma representação gráfica da relação entre as resistências, onde os triângulos são corpos de prova de Vectran coladas com adesivo epóxi e os círculos os colados com o adesivo poliuretano. As marcações acima da linha representam os corpos de prova com compatibilidade estrutural maiores que 1 e os abaixo os com relação inferior. Para a fibra Vectran, pode-se observar que a maioria dos corpos de prova estão acima do padrão estipulado, principalmente as coladas com adesivo epóxi.

Figura 95. Representação gráfica da relação entre as resistências (I.E.V e I.P.V)
Fonte. Própria

6.2.2. Corpo de prova NBR

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios da linha de adesivo (EPI) e da madeira maciça com o CP-NBR são apresentadas na Figura 96.

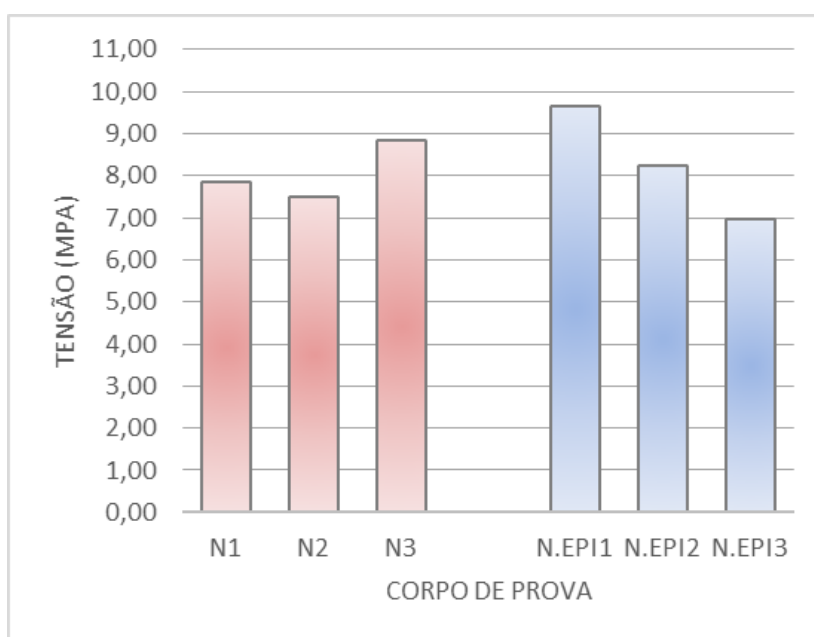


Figura 96. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e das coladas com resina EPI observa-se que estão em um mesmo patamar de resistências.

Na Tabela 29 apresentam-se as relações de tensão cisalhante resistente para os três corpos de prova de madeira e os três corpos de prova colados com o adesivo EPI.

Tabela 29. Tensão cisalhante resistente

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
N1	7,86	N.EPI1	9,65
N2	7,49	N.EPI2	8,23
N3	8,83	N.EPI3	6,96
Média	8,06	Média	8,28
CV(%)	6,99	CV (%)	13,27

Fonte. Própria

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios para a fibra de sisal coladas com as resinas EPI e PU e da madeira maciça com o CP-NBR são apresentadas na Figura 97.

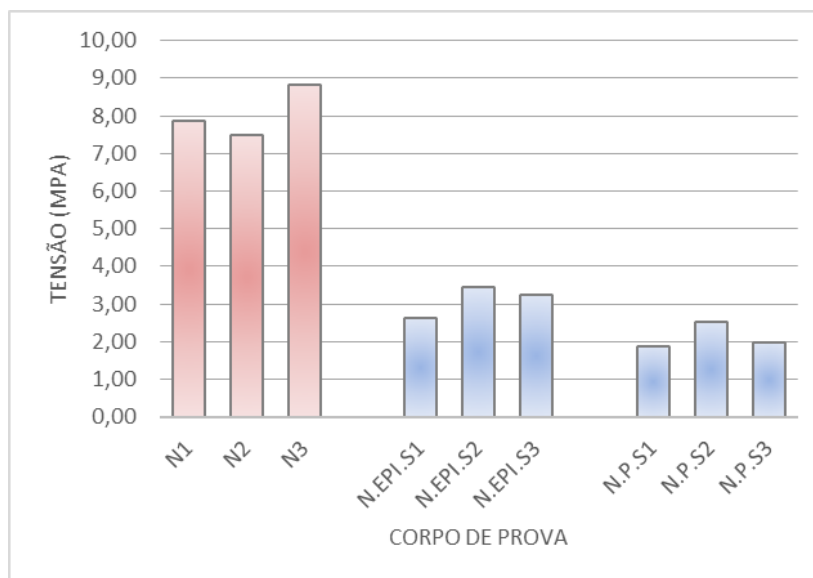


Figura 97. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e dos reforçados com sisal, tanto os colados com resina EPI, quanto os colados com resina PU observa-se que as resistências da ligação são inferiores à resistência ao cisalhamento da madeira.

Na Tabela 30 são apresentados os resultados dos três corpos de prova de sisal colados com o adesivo EPI e os três com o adesivo poliuretano.

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
N.EPI.S1	2,64	N.P.S1	1,88
N.EPI.S2	3,45	N.P.S2	2,51
N.EPI.S3	3,26	N.P.S3	1,97
Média	3,12	Média	2,12
CV(%)	11,12	CV (%)	13,15

Fonte. Própria

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios para a fibra de Vectran coladas com as resinas EPI e PU e da madeira maciça com o CP-NBR são apresentadas na Figura 98.

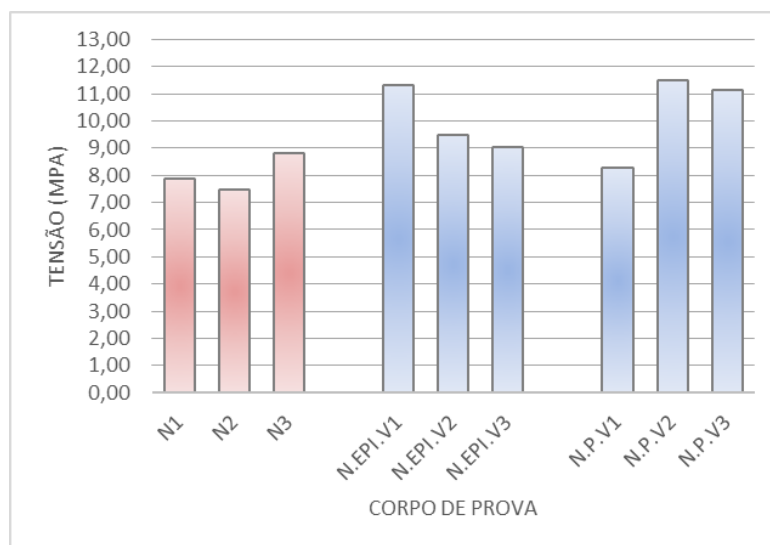


Figura 98. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo NBR
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e dos reforçados com Vectran, tanto os colados com resina EPI, quanto os colados com resina PU observa-se que as resistências da ligação são levemente superiores à resistência ao cisalhamento da madeira.

Na Tabela 31 são apresentados os resultados dos três corpos de prova de Vectran colados com o adesivo EPI e os três colados com adesivo poliuretano.

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
N.EPI.V1	11,31	N.P.S1	1,88
N.EPI.V2	9,49	N.P.S2	2,51
N.EPI.V3	9,06	N.P.S3	1,97
Média	9,95	Média	2,12
CV(%)	9,82	CV (%)	13,15

Fonte. Própria

6.2.3. Corpo de prova ASTM

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios da linha de adesivo (EPI) e da madeira maciça com o CP-ASTM são apresentadas na Figura 99.

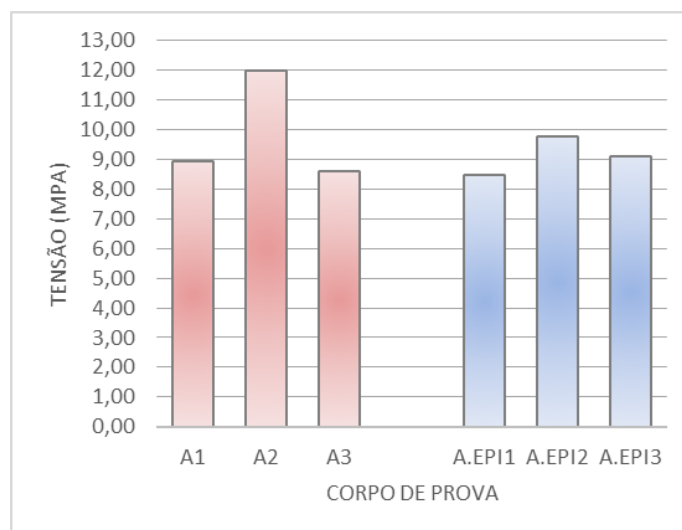


Figura 99. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e das coladas com resina EPI observa-se que estão em um mesmo patamar de resistências.

Na Tabela 32, apresentam-se as relações de tensão cisalhante resistente para os três corpos de prova de madeira e dos três corpos de prova colados com o adesivo EPI.

Tabela 32. Tensão cisalhante resistente nos corpos de prova de madeira CP-ASTM

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
A1	8,94	A.EPI1	8,49
A2	11,99	A.EPI2	9,76
A3	8,60	A.EPI3	9,09
Média	9,84	Média	9,11
CV (%)	15,47	CV (%)	5,69

Fonte. Própria

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios para a fibra de sisal coladas com as resinas EPI e PU e da madeira maciça com o CP-ASTM são apresentadas na Figura 100.

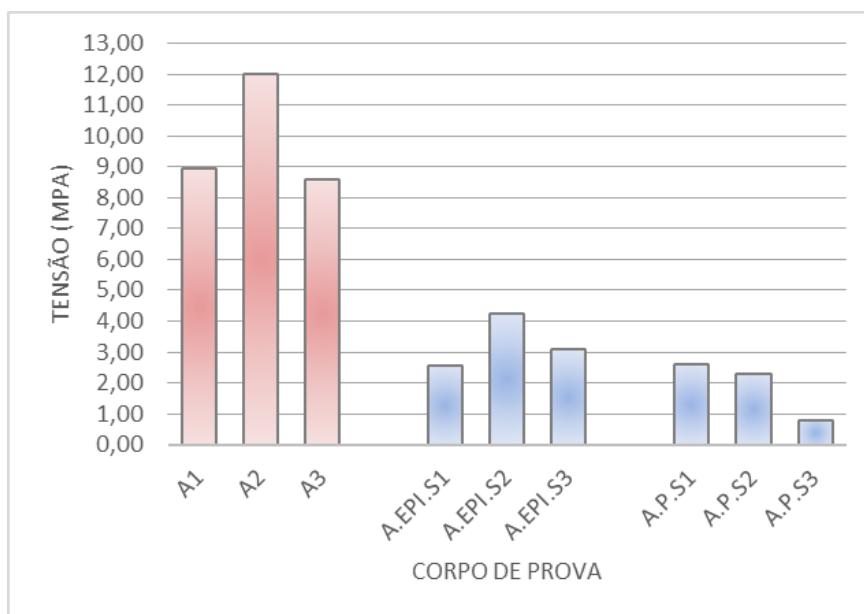


Figura 100. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e dos reforçados com sisal, tanto os colados com resina EPI, quanto os colados com resina PU observa-se que as resistências da ligação são inferiores à resistência ao cisalhamento da madeira.

Na Tabela 33 são apresentados os resultados dos três corpos de prova de sisal colados com o adesivo EPI e com o adesivo PU.

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
A.EPI.S1	2,58	A.P.S1	2,61
A.EPI.S2	4,25	A.P.S2	2,30
A.EPI.S3	3,08	A.P.S3	0,79
Média	3,30	Média	1,90
CV(%)	21,27	CV (%)	41,81

Fonte. Própria

As tensões cisalhantes resistentes para cada corpo de prova nos ensaios para a fibra de sisal coladas com as resinas EPI e PU e da madeira maciça com o CP-ASTM são apresentadas na Figura 101.

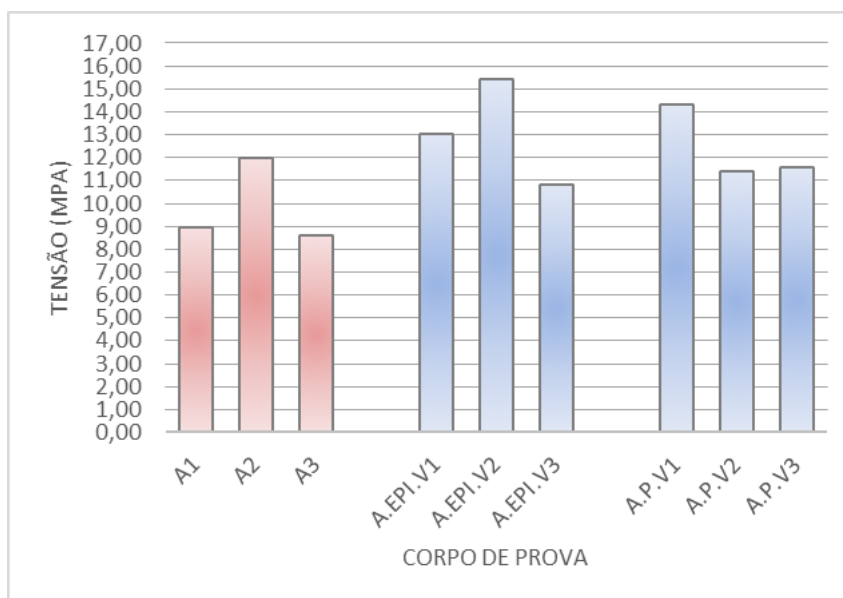


Figura 101. Tensão cisalhante resistente para cada corpo de prova modelo ASTM
Fonte. Própria

Comparando-se as resistências entre os corpos de prova de madeira maciça e dos reforçados com Vectran, tanto os colados com resina EPI, quanto os colados com resina PU observa-se que as resistências da ligação são levemente superiores à resistência ao cisalhamento da madeira.

Na Tabela 34 são apresentados os resultados dos três corpos de prova de Vectran colados com o adesivo EPI e PU.

Corpo de Prova	Tensão (MPa)	Corpo de Prova	Tensão (MPa)
A.EPI.V1	13,05	A.P.V1	14,33
A.EPI.V2	15,44	A.P.V2	11,39
A.EPI.V3	10,84	A.P.V3	11,55
Média	13,11	Média	12,42
CV(%)	14,31	CV (%)	10,88

Fonte. Própria

6.2.4. Comparação estatística entre as médias

Seguindo as Equações 12, 13 e 14 automatizadas através do software MINITAB® no teste “two sample”.

Se $t < t_{\phi}(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo e se o intervalo das diferenças entre as médias das amostras conter o zero

é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes com 95% de probabilidade.

Estudou-se estatisticamente as médias comparando-se: resistência da ligação em comparação com a resistência ao cisalhamento da madeira, resistência das ligações em epóxi para IVALSA ou EPI para ASTM e NBR em comparação com as ligações com resina poliuretano e os ensaios nos corpos de prova NBR em comparação com os da ASTM.

Os resultados estatísticos podem ser vistos em detalhes no Apêndice I e resumidamente para todos as comparações realizados na Tabela 35.

Tabela 35. Comparações estatística entre as médias

Amostras	Estatisticamente equivalentes? (sim/não)	Intervalo da diferença entre as médias
Madeira x Ligação		
I.M.E x I.E	sim	-1,23 MPa ≤ d ≤ 2,20 MPa
I.M.P x I.P	sim	-1,61 MPa ≤ d ≤ 2,73 MPa
I.M.E.S x I.E.S	sim	-2,81 MPa ≤ d ≤ 0,35 MPa
I.M.P.S x I.P.S	não	3,85 MPa ≤ d ≤ 4,981 MPa
I.M.E.V x I.E.V	não	-3,02 MPa ≤ d ≤ 0,07 MPa
I.M.P.V x I.P.V	sim	-2,32 MPa ≤ d ≤ 0,34 MPa
N x N.EPI	sim	-3,98 MPa ≤ d ≤ 3,54 MPa
N x N.EPI.S	não	3,45 MPa ≤ d ≤ 6,43 MPa
N x N.P.S	não	4,02 MPa ≤ d ≤ 7,86 MPa
N x N.EPI.V	não	-4,43 MPa ≤ d ≤ 0,64 MPa
N x N.P.V	sim	-6,93 MPa ≤ d ≤ 2,4 MPa
A x A.EPI	sim	-4,2 MPa ≤ d ≤ 5,63 MPa
A x A.EPI.S	não	1,4 MPa ≤ d ≤ 11,64 MPa
A x A.P.S	não	4,1 MPa ≤ d ≤ 11,81 MPa
A x A.EPI.V	sim	-8,7 MPa ≤ d ≤ 2,2 MPa
A x A.P.V	sim	-7,2 MPa ≤ d ≤ 2,0 MPa
Inter resinas		
I.E x I.P	sim	-1,47 MPa ≤ d ≤ 2,26 MPa
I.E.S x I.P.S	não	4,64 MPa ≤ d ≤ 7,71 MPa
I.E.V x I.P.V	sim	-1,13 MPa ≤ d ≤ 2,44 MPa
N.EPI.S x N.P.S	não	0 MPa ≤ d ≤ 2,0 MPa
N.EPI.V x N.P.V	sim	-4,25 MPa ≤ d ≤ 3,5 MPa
A.EPI.S x A.P.S	sim	-0,98 MPa ≤ d ≤ 3,79 MPa
A.EPI.V x A.P.V	sim	-4,5 MPa ≤ d ≤ 5,89 MPa
Inter ensaios		
N.EPI x A.EPI	sim	-4,53 MPa ≤ d ≤ 2,86 MPa
N.EPI.S x A.EPI.S	sim	-2,56 MPa ≤ d ≤ 2,19 MPa
N.P.S x A.P.S	sim	-2,34 MPa ≤ d ≤ 2,78 MPa
N.EPI.V x A.EPI.V	sim	-7,92 MPa ≤ d ≤ 1,6 MPa
N.P.V x A.P.V	sim	-6,5 MPa ≤ d ≤ 2,31 MPa

Fonte. Própria

Das comparações entre a resistência da madeira e da resistência do compósito, nove delas não apresentam diferenças estatísticas entre as médias e sete delas apresentam diferenças estatísticas.

Dentre as que estão com diferenças entre as médias, destaca-se que as de sisal apresentam média de resistência inferiores da madeira para todos os tipos de corpo de prova e para as colas PU e EPI, a única configuração em que o sisal apresenta média estatisticamente equivalente à resistência da madeira é o corpo de prova do IVALSA colado com resina epóxi (I.E.S).

Por outro lado, os únicos corpos de prova deste estudo que apresentam média da resistência estatisticamente superior à resistência da madeira são os CP's I.E.V e N.EPI.V que são ambos corpos de prova de Vectran no modelo IVALSA com resina epóxi e no modelo NBR com resina EPI respectivamente.

Na comparação entre resinas, destaca-se que o adesivo epóxi apresenta maior resistência que o adesivo poliuretano na colagem do Vectran no corpo de prova IVALSA e que, do mesmo modo, o adesivo EPI oferece melhor desempenho quando comparado com a resina poliuretano para o corpo de prova modelo NBR.

Na comparação entre ensaios, nenhuma diferença entre as médias foi observado.

7. CONCLUSÕES

Para os tipos de corpos de prova estudados, a análise numérica mostra que a distribuição da tensão cisalhante não é constante no plano de cisalhamento, no entanto, observa-se a tendência das tensões médias aproximar-se do valor teórico calculado, e ainda, a ruptura observada nos ensaios perpendicular ao plano indica que a ruptura ocorre por cisalhamento, mesmo que esteja atuando tensões normais.

Desta forma, os resultados apresentados sugerem que é possível a utilização todos os três modelos de corpos de prova e as metodologias experimentais estudadas para a caracterização da resistência ao cisalhamento para fins de dimensionamento estrutural. Destaca-se, no entanto, que haja o entendimento das limitações dos métodos com relação à presença de esforços normais e à distribuição não homogênea da tensão cisalhante.

Dentre os três métodos o considerado mais apropriado é o corpo de prova IVALSA, por sua melhor homogeneidade dos resultados para os diferentes compósitos. Porém, sugere-se fazer-se a realização do ensaio na madeira na mesma geometria dos corpos de prova compósitos, voltando-se para o formato do corpo de prova apresentado na Figura 28 (c).

Por meio dos resultados observados neste trabalho, observa-se que nem sempre a resistência da ligação colada pode ser considerada superior à resistência ao cisalhamento da própria madeira estudada, como pressupõe a norma brasileira, e em muitos casos, o dimensionamento local é interessante. Neste sentido, seguem algumas observações e recomendações para cálculo da resistência e dimensionamento:

- Para as situações em que $\eta > 1$, pode-se considerar que a resistência da ligação é superior à resistência da madeira, e usa-se este resultado, a favor da segurança, para o dimensionamento;
- Caso contrário, para valores $\eta < 1$, é necessário verificar-se em duas etapas na madeira e nas ligações considerando as resistências características de cada caso;
- Nos casos em que se é observado valores muito inferiores a 1, como no caso da fibra de sisal colados com as resinas PU e EPI, sugere-se a adoção de outro adesivo, como o epóxi, por exemplo, onde

foram observadas maiores resistências da ligação, e, portanto, melhor compatibilidade com este tipo de fibra.

Tendo em vista a presença de tensão normal perpendicular, aconselha-se a observação dos modos de ruptura de cada ensaio realizado. Na ocorrência da caracterização da ruptura à tração ou compressão descartar-se este resultado.

Conclui-se que o modelo numérico adotado é adequado para a verificação das tensões cisalhantes no plano de cisalhamento, para os corpos de prova estudados e que as condições de contorno, considerando-se os blocos de apoio e de aplicação de carga com as restrições impostas no aparato de ensaio contribuíram substancialmente para a qualidade dos resultados alcançados.

Por fim, conclui-se que todos os três corpos de prova estudados podem ser aplicados efetivamente para o dimensionamento de madeira laminada colada reforçada por fibras com bons resultados, desde que as devidas considerações das limitações dos métodos sejam feitas.

Atenta-se que outros trabalhos devem ser realizados para confirmação e complementação dos resultados obtidos. Indica-se como possíveis temas para trabalhos futuros:

- Realizar estudos relacionados com outras fibras e outros adesivos com diferentes módulos de elasticidade e espessuras de juntas;
- Realizar estudos com outros tipos de corpos de prova para a caracterização do cisalhamento;
- Realizar análise numérica considerando a ruptura dos corpos de prova (fratura);
- Realizar análise numérica em diferente software em elementos finitos, utilizando-se o mesmo modelo numérico para comparação e contraste dos resultados;
- Realizar estudos com corpos de prova após ciclos de envelhecimento.

REFERÊNCIAS

ADAMS, D. F.; CARLSSON, L. A.; PIPES, R. B. **Experimental characterization of advanced composite materials**. Third edition. Boca Raton, Florida, USA, 2003.

ADVISORY COMMITTEE ON TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR CONSTRUCTION. **CNR-DT 201/2005**: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D143-14**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. West Conshohocken, PA, USA, 2014.

_____. **ASTM D905-03**: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. West Conshohocken, PA, USA, 2003.

_____. **ASTM D3931-08**: Standard Test Method for Determining Strength of Gap-Filling Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. West Conshohocken, PA, USA, 2008.

_____. **ASTM D4255/D4255M-15a**: Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method. West Conshohocken, PA, USA, 2015.

_____. **ASTM D5379/D5379M-12**: Standard Test Method for shear properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. West Conshohocken, PA, USA, 2012.

ANSYS®. **Mechanical (Workbench)**, Release 18.0, ANYS, Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

BERTOLINE, C. A. A. **Estudo Teórico de Vigas de Madeira Laminada Colada Reforçadas por Fibras Sintéticas**. Dissertação de Mestrado no programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – UNICAMP –SP. Campinas, Brasil, 2015.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Van Nostrand, New York, NY, 1982.

CAMPBELL, F.C. **Structural Composite Materials**. Ohio, United States of America, 2010.

DERIKVAND, M.; PANGH, H. **A Modified Method for Shear Strength Measurement of Adhesive Bonds in Solid Wood**. Karaj, Iran, 2016.

DONADON, B. F. **Estudo de Vigas de Madeira de Reflorestamento Laminadas Coladas Reforçadas por Fibras**. Dissertação de Mestrado no programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – UNICAMP –SP. Campinas, Brasil, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Circular Técnica 123: Cultivo do sisal no nordeste Brasileiro**. Campina Grande, PB, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Árvore do Conhecimento da agricultura familiar do Território do Sisal**. Petrolina, PE, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 301**: Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures: Classification and performance requirements. Brussels, 1992.

_____. **EN 302-1**: Adhesivos para madeira de uso estrutural, Métodos de ensayo Parte 1: Determinación de la resistencia de la unión al cizallamiento por tracción longitudinal. Brussels, 2004.

_____. **EN 338**: Structural Timber Strength Classes. Brussels, 2009.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. **Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation**. Pirassununga, Brazil, 2011.

FRANGI, A.; FONTANA, M.; MISCHLER, A. **Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures**. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2004.

FRANKLIN Adhesives & Polymers. **ReactITE EP-925**. Columbus, USA, 2015.

FRANKE, S. FRANKE, B. HARTE, A. M. **Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art.** Switzerland, 2015.

FRESE, M.; BLASS, H. J. **Statistics of damages to timber structures in Germany.** Karlsruhe, Germany, 2011.

GARCIA, P. R.; ESCAMILLA, A. C.; GARCIA, M. N. G. **Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials.** Madrid, Spain, 2013.

HENKEL AG & CO. **Boletim Técnico - Purbond.** Switzerland, 2017.

JORNAL OF FLUIDS ENGINEERING. **Journal of Fluids Engineering Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy.** Disponível em < <http://journaltool.asme.org/templates/JFENumAccuracy.pdf>>.

KURARAY. Vectran®: Liquid Crystal Polymer Fiber Technology: Catálogo. Fort Mill, 2015. Disponível em < <http://www.vectranfiber.com>>.

KWAŚNIEWSKI, L. **Application of grid convergence index in FE computation.** Poland, 2013.

LAVISCI, P.; BERTI, S.; PIZZO, B.; TRIBOULOT, P.; ZANUTTINI, R. **A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber.** Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2001.

MAPEI®. **Boletim Técnico - Mapewood Gel 120.** Milano, Italia, 2010.

MAPEI®. **Boletim Técnico - MapeWrap C.** Milano, Italia, 2010.

MASCIA, N. T. **Estudo de propriedades de fibras e seus compósitos para análise de vigas laminadas coladas de madeira reforçadas por fibras.** Relatório de atividades sobre pesquisa de bolsa de pós-doutorado do CNPQ no exterior. Florença, Itália, 2016.

MASCIA, N. T.; FURLANI, J. E.; VANALLI, L. **Mechanical analysis of sisal fibres to use as a reinforced material in wood beams.** Journal of Civil Engineering and Architecture, 2010.

MASCIA, N. T. **Considerações a respeito da anisotropia na madeira.** Tese de Doutorado no programa de Pós Graduação em Estruturas – EESC –SP. São Carlos, Brasil, 1991.

MITANI, A.; BARBOUTIS, I. **Shear Strength by Compression Loading of some Hardwoods bonded with PVAc and casein adhesives.** Kneza Viseslava, Belgrade, 2010.

MULLER, U.; SRETENOVIC, A.; VICENTI, A.; GINDL, W. **Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 1: Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of electronic speckle pattern interferometry.** Vienna, Austria, 2005.

NASA NPARC Alliance Verification and Validation web site. **Examining Spatial (Grid) Convergence.** Disponível em: <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>>.

NOGUEIRA, R. S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL.** 2017. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

OBUCINA, M; GONDZIC, E. **The influence of pressure by thickness bonding on the shear strength of glulam.** 18th International Research/Expert Conference, Budapest, Hungary, 2014.

OKKONEN, E. A.; RIVER, B. H. **Factors affecting the strength of block-shear specimens.** Madison, WI, USA, 1989.

PIZZO, B.; LAVISCI, P.; MISANI, C.; TRIBOULOT, P.; MACCHIONI, N. **Measuring the shear strength ratio of glued joints within the same specimen.** Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2003a.

PIZZO, B.; LAVISCI, P.; MISANI, C.; TRIBOULOT, P. **The compatibility of structural adhesives with wood.** Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2003b.

PIZZO, B.; SMEDLEY, D. **Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects**. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2015.

PURBOND®. **Boletim Técnico - HB S609**. Purbond Technik, 2010.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M.; RODD, P. D. **Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines**. Galway, Ireland, 2009.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M.; RODD, P. D. **Bond quality at the FRP–wood interface using wood-laminating adhesives**. Galway, Ireland, 2009.

RAFTERY, G. M.; RODD, P. D. **FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive**. Auckland, New Zealand, 2015.

RITTER, M.A. **Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance**. Chapter 3: Properties of wood and structural wood products. Madison, Wisconsin, USA, 1992.

RYAN, B.F.; JOINER, B.L. **Minitab Handbook**. Duxbury Press. Belmont, California, 1994.

SANTOS NETO, A. B. S. **Cisalhamento em corpos de prova de madeira**. Dissertação de Mestrado no programa de Pós Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Catarina – SC. Florianópolis, SC, Brasil, 1999.

SEGUNDINHO, P. G. A.; CALIL NETO, C.; GONÇALVES F. G.; REGAZZI, A. J.; CALIL JUNIOR, C. **Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento**. Londrina, PR, Brasil, 2015.

SERRANO, E. **A numerical study of the shear-strength-predicting capabilities of test specimens for wood–adhesive bonds**. Lund, Sweden, 2004.

SRETENOVIC, A.; MULLER, U.; GINDL, W.; TEISCHINGER, A. **New Shear Assay for the Simultaneous Determination of Shear Strength and Shear Modulus in Solid Wood: Finite Element Modeling and Experimental Results**. Vienna, Austria, 2004.

XAVIER, J.; OLIVEIRA, M.; MORAIS J.; PINTO, T. **Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test.** Portugal, 2008.

APÊNDICE I – Resultados estatísticos MINITAB

I.M.E x I.E

Tabela 36. Two sample T for I.M.E vs I.E

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	8	9,36	1,42	0,50
C2	8	8,88	1,73	0,61

95% CI for mu C1 - mu C2: (-1,23; 2,20)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 0,61 P = 0,55 DF = 13 $t\phi(95\%) = 1,771$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-1,23 \text{ MPa} \leq d \leq 2,20 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

I.M.P x I.P

Tabela 37. Two sample T for I.M.P vs I.P

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	6	9,04	1,86	0,76
C2	6	8,48	1,43	0,58

95% CI for mu C1 - mu C2: (-1,61; 2,73)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 0,58 P = 0,58 DF = 9 $t\phi(95\%) = 1,833$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-1,61 \text{ MPa} \leq d \leq 2,73 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

I.M.E.S x I.E.S

Tabela 38. Two sample T for I.M.E.S vs I.E.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	9,020	0,656	0,25
C2	7	10,25	1,64	0,62

95% CI for mu C1 - mu C2: (-2,81; 0,35)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -1,85 P = 0,11 DF = 7 $t\phi(95\%) = 1,895$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-2,81 \text{ MPa} \leq d \leq 0,35 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

I.M.P.S x I.P.S

Tabela 39. Two sample T for I.M.E.S vs I.E.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	8,493	0,598	0,23
C2	7	4,079	0,254	0,096

95% CI for μ C1 - μ C2: (3,85; 4,981)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 17,97 P = 0,0000 DF = 8 $t\phi(95\%) = 1,8$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{3,85 \text{ MPa} \leq d \leq 4,981 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

I.M.E.V x I.E.V

Tabela 40. Two sample T for I.M.E.V vs I.E.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	8,069	0,393	0,15
C2	7	9,54	1,62	0,61

95% CI for μ C1 - μ C2: (-3,02; 0,07)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -2,34 P = 0,058 DF = 6 $t\phi(95\%) = 1,943$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-3,02 \text{ MPa} \leq d \leq 0,07 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

I.M.P.V x I.P.V

Tabela 41. *Two sample T for I.M.P.V vs I.P.V*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	7,899	0,492	0,19
C2	7	8,89	1,4	0,53

95% CI for mu C1 - mu C2: (-2,32; 0,34)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -1,77 P = 0,12 DF = 7 $t\phi(95\%) = 1,895$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-2,32 \text{ MPa} \leq d \leq 0,34 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N x N.EPI

Tabela 42. *Two sample T for N vs N.EPI*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,06	0,692	0,4
C2	3	8,28	1,35	0,78

95% CI for mu C1 - mu C2: (-3,98; 3,54)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -0,25 P = 0,82 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-3,98 \text{ MPa} \leq d \leq 3,54 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N x N.EPI.S

Tabela 43. *Two sample T for N vs N.EPI.S*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,06	0,692	0,4
C2	3	3,117	0,424	0,24

95% CI for mu C1 - mu C2: (3,45; 6,43)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 10,55 P = 0,0018 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t_{\phi}(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{3,45 \text{ MPa} \leq d \leq 6,43 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

N x N.P.S

Tabela 44. Two sample T for N vs N.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,06	0,692	0,4
C2	3	2,12	0,341	0,2

95% CI for μ C1 - μ C2: (4,02; 7,86)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 13,34 P = 0,0056 DF = 2 $t_{\phi}(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t_{\phi}(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{4,02 \text{ MPa} \leq d \leq 7,86 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

N x N.EPI.V

Tabela 45. Two sample T for N vs N.EPI.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,06	0,692	0,4
C2	3	9,95	1,19	0,69

95% CI for μ C1 - μ C2: (-4,43; 0,64)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -2,38 P = 0,098 DF = 3 $t_{\phi}(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t_{\phi}(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-4,43 \text{ MPa} \leq d \leq 0,64 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

N x N.P.V**Tabela 46. Two sample T for N vs N.P.V**

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,06	0,692	0,4
C2	3	10,31	1,76	1

95% CI for mu C1 - mu C2: (-6,93; 2,4)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -2,06 P = 0,18 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-6,93 \text{ MPa} \leq d \leq 2,4 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

A x A.EPI**Tabela 47. Two sample T for A vs A.EPI**

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,84	1,87	1,1
C2	3	9,113	0,635	0,37

95% CI for mu C1 - mu C2: (-4,2; 5,63)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 0,64 P = 0,59 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-4,2 \text{ MPa} \leq d \leq 5,63 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

A x A.EPI.S**Tabela 48. Two sample T for A vs A.EPI.S**

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,84	1,87	1,1
C2	3	3,303	0,857	0,49

95% CI for mu C1 - mu C2: (1,4; 11,64)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 5,51 P = 0,031 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as

amostras é $\{1,4 \text{ MPa} \leq d \leq 11,64 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

A x A.P.S

Tabela 49. Two sample T for A vs A.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,84	1,87	1,1
C2	3	1,9	0,974	0,56

95% CI for mu C1 - mu C2: (4,1; 11,81)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 6,53 P = 0,0073 DF = 3 t ϕ (95%) =2,353

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{4,1 \text{ MPa} \leq d \leq 11,81 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

A x A.EPI.V

Tabela 50. Two sample T for A vs A.EPI.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,84	1,87	1,1
C2	3	13,11	2,3	1,3

95% CI for mu C1 - mu C2: (-8,7; 2,2)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -1,91 P = 0,15 DF = 3 t ϕ (95%) =2,353

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-8,7 \text{ MPa} \leq d \leq 2,2 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

A x A.P.V

Tabela 51. *Two sample T for A vs A.P.V*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,84	1,87	1,1
C2	3	12,42	1,65	0,95

95% CI for μ C1 - μ C2: (-7,2; 2,00)
 T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -1,79 P = 0,17 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-7,2 \text{ MPa} \leq d \leq 2,0 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

I.E x I.P

Tabela 52. *Two sample T for I.E vs I.P*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	8	8,88	1,73	0,61
C2	6	8,48	1,43	0,58

95% CI for μ C1 - μ C2: (-1,47; 2,26)
 T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 0,47 P = 0,65 df = 11 $t\phi(95\%) = 1,796$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-1,47 \text{ MPa} \leq d \leq 2,26 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

I.E.S x I.P.S

Tabela 53. *Two sample T for I.E.S vs I.P.S*

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	10,25	1,64	0,62
C2	7	4,079	0,254	0,096

95% CI for μ C1 - μ C2: (4,64; 7,708)
 T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 9,85 P = 0,0001 DF = 6 $t\phi(95\%) = 1,943$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as

amostras é $\{4,64 \text{ MPa} \leq d \leq 7,71 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo **não** contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

I.E.V x I.P.V

Tabela 54. Two sample T for I.E.V vs I.P.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	7	9,54	1,62	0,61
C2	7	8,89	1,4	0,53

95% CI for mu C1 - mu C2: (-1,13; 2,44)
 T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 0,81 P = 0,44 DF = 11 $t\phi(95\%) = 1,796$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-1,13 \text{ MPa} \leq d \leq 2,44 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.EPI.S x N.P.S

Tabela 55. Two sample T for N.EPI.V vs N.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	3,117	0,424	0,24
C2	3	2,12	0,341	0,2

95% CI for mu C1 - mu C2: (-0,00; 2,00)
 T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 3,18 P = 0,050 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t > t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras **não** pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{0 \text{ MPa} \leq d \leq 2,0 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras **não** são estatisticamente equivalentes.

N.EPI.V x N.P.VTabela 56. *Two sample T* for N.EPI.V vs N.P.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,95	1,19	0,69
C2	3	10,31	1,76	1

95% CI for μ C1 - μ C2: (-4,25; 3,5)T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -0,29 P = 0,79 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-4,25 \text{ MPa} \leq d \leq 3,5 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

A.EPI.S x A.P.STabela 57. *Two sample T* for A.EPI.S vs A.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	3,303	0,857	0,49
C2	3	1,9	0,974	0,56

95% CI for μ C1 - μ C2: (-0,98; 3,79)T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 1,87 P = 0,16 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-0,98 \text{ MPa} \leq d \leq 3,79 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

A.EPI.V x A.P.VTabela 58. *Two sample T* for A.EPI.V vs A.P.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	13,11	2,3	1,3
C2	3	12,42	1,65	0,95

95% CI for μ C1 - μ C2: (-4,5; 5,89)T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = 0,42 P = 0,70 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as

amostras é $\{-4,5 \text{ MPa} \leq d \leq 5,89 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.EPI x A.EPI

Tabela 59. Two sample T for N.EPI vs A.EPI

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	8,28	1,35	0,78
C2	3	9,113	0,635	0,37

95% CI for μ C1 - μ C2: (-4,53; 2,86)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -0,97 P = 0,43 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-4,53 \text{ MPa} \leq d \leq 2,86 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.EPI.S x A.EPI.S

Tabela 60. Two sample T for N.EPI.S vs A.EPI.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	3,117	0,424	0,24
C2	3	3,303	0,857	0,49

95% CI for μ C1 - μ C2: (-2,56; 2,19)
T-Test μ C1 = μ C2 (vs not =): t = -0,34 P = 0,77 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-2,56 \text{ MPa} \leq d \leq 2,19 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.P.S x A.P.S

Tabela 61. Two sample T for N.P.S vs A.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	2,12	0,341	0,2
C2	3	1,9	0,974	0,56

95% CI for mu C1 - mu C2: (-2,34; 2,78)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = 0,37 P = 0,75 DF = 2 $t\phi(95\%) = 2,922$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-2,34 \text{ MPa} \leq d \leq 2,78 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.EPI.V x A.EPI.V

Tabela 62. Two sample T for N.EPI.V vs A.EPI.V

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	9,95	1,19	0,69
C2	3	13,11	2,3	1,3

95% CI for mu C1 - mu C2: (-7,92; 1,6)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -2,11 P = 0,13 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t\phi(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-7,92 \text{ MPa} \leq d \leq 1,6 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.

N.P.V x A.P.V

Tabela 63. Two sample T for N.P.S vs A.P.S

	n	Média (μ)	StDev	SEMean
C1	3	10,31	1,76	1
C2	3	12,42	1,65	0,95

95% CI for mu C1 - mu C2: (-6,5; 2,31)
T-Test mu C1 = mu C2 (vs not =): t = -1,52 P = 0,23 DF = 3 $t\phi(95\%) = 2,353$

Fonte. MINITAB®

Como $t < t_{\phi}(95\%)$ pode-se concluir que as amostras pertencem a um mesmo universo. Destaca-se, também, que o intervalo das diferenças entre as amostras é $\{-6,5 \text{ MPa} \leq d \leq 2,31 \text{ MPa}\}$, ou seja, o intervalo contém o zero com 95% de probabilidade.

Em vista dos resultados dos testes de hipótese, via *TWO SAMPLE*, é possível concluir que as amostras são estatisticamente equivalentes.