

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DE PEÇAS DE
MADEIRA POR MEIO DE ADESIVO EM
ÁREAS REDUZIDAS ASSOCIADO A
ELEMENTOS DE PINOS**

Márcio Sampaio Sarmet Moreira

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DE PEÇAS DE MADEIRA POR MEIO DE
ADESIVO EM ÁREAS REDUZIDAS ASSOCIADO A ELEMENTOS DE
PINOS"**

Márcio Sampaio Sarmet Moreira

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES-UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Gabriel de Oliveira Ribeiro
DEES-UFMG

Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES-UFMG

Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
UNICAMP

Prof. Dr. Carlito Calil Júnior
EESC-USP

Belo Horizonte, 18 de novembro de 2004

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por seu amor e contagiante Fé em Deus.

Ao meu querido pai, exemplo raro de ética, pela preocupação e carinho.

À minha inesquecível mãe, pela paciência e sabedoria, fonte permanente de luz nos difíceis caminhos da vida.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa e aos meus filhos, pelas dificuldades compartilhadas.

Ao prof. Edgar Mantilla, pelo apoio contínuo, pela amizade e pela fundamental contribuição na realização deste trabalho. Aos demais professores e funcionários do Departamento de Estruturas, pela grata convivência e oportunidade de trabalho, em particular ao prof. Fernando Amorim, pela amizade e incentivo constante. À colega Renata Duarte, pelo apoio em importantes atividades desenvolvidas LAEES/DEES/UFMG.

Ao professor Ricardo Della Lúcia, coordenador do LPFMM/DEF/UFV, pela confiança depositada e pelo apoio incondicional. Aos demais colegas do LPFMM/DEF/UFV, em particular aos amigos José Tarcísio de Oliveira e Cristovão Abhraão, pelas profícuas discussões sobre a madeira e suas inúmeras possibilidades de uso. Ao engenheiro Reginaldo Campos, pela valiosa contribuição na realização de inúmeros ensaios.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Civil da UFV, pelo apoio e incentivo, em particular aos amigos Rita de Cássia Alvarenga e José Luiz Rangel.

À FAPEMIG e à FINEP, pelo apoio financeiro à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico para o uso da madeira de reflorestamento, no qual incluo este trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xxii
Simbologia	xxix
Resumo	xxxiii
Abstract	xxxiv
1 Introdução	1
1.1 O uso da madeira em estruturas	1
1.2 Ligações de peças estruturais de madeira	5
1.3 Objetivos	7
1.4 Descrição do trabalho	9
2 Revisão de Literatura	11
2.1 Avaliação do comportamento de estruturas de madeira	11
2.2 Organização e constituição dos elementos anatômicos da madeira	13
2.3 Composição química, estrutura organizacional e características	
elásticas das paredes celulares	15
2.3.1 Composição química da parede celular	15
2.3.2 Celulose.....	16
2.3.3 Hemicelulose.....	16
2.3.4 Lignina	17
2.3.5 Estrutura organizacional nas células dos elementos anatômicos .	17
2.4 Principais propriedades físicas da madeira	21
2.4.1 Introdução	21
2.4.2 Umidade	21
2.4.3 Densidade	21
2.5 Resistências mecânicas e modos de rupturas de peças de madeira	23
2.5.1 Introdução	23

2.5.2	Tração paralela	24
2.5.3	Compressão paralela às fibras	25
2.5.4	Compressão normal às fibras	26
2.5.5	Tração normal às fibras	29
2.5.6	Esforços inclinados em relação às fibras	30
2.5.7	Rupturas na flexão	32
2.5.8	Rupturas no cisalhamento	33
2.5.9	Correlações entre propriedades físicas e mecânicas da madeira .	34
2.6	Utilização de madeira de eucalipto em estruturas	37
2.6.1	Introdução	37
2.6.2	A madeira de Eucalipto	38
2.6.3	O emprego da madeira de eucalipto em estruturas	40
2.6.4	A madeira juvenil	40
2.7	Ligações de peças estruturais de madeira	44
2.8	Ligações por meio de adesivos	55
2.8.1	Introdução	55
2.8.2	Resistência de ligações coladas	56
2.8.3	Distribuição de tensões cisalhantes em ligações coladas	63
2.9	Modelos matemáticos para análise do comportamento mecânico da madeira	68
2.9.1	Introdução	68
2.9.2	Tensões e deformações em um ponto	68
2.9.3	Relações constitutivas para material isotrópico elástico-linear ...	70
2.9.4	Modelo elástico-linear ortotrópico	73
2.9.5	Modelo ortotrópico para a madeira	75
2.9.6	Transformações dos tensores de tensão e deformação	77
2.9.7	Transformações da matriz de flexibilidade de material ortotrópico para rotações do sistema de referência	83
2.9.8	Determinação experimental das constantes elásticas da madeira	87
3	Materiais e Métodos	91
3.1	Introdução.....	91

3.2 Avaliação preliminar da resistência de ligações coladas	92
3.3 Propriedades da madeira	93
3.3.1 Introdução	93
3.3.2 Propriedades avaliadas	95
3.3.3 Resistência característica estimada da madeira	97
3.4 Resistência e rigidez experimental de ligações coladas	99
3.4.1 Introdução	99
3.4.2 Corpos-de-prova dos ensaios iniciais	99
3.4.3 Corpos-de-prova dos ensaios complementares	105
3.4.4 Métodos de ensaios	106
3.4.5 Estimativa da resistência característica de ligações	108
3.5 Resistência e rigidez experimental de ligações com pinos	108
3.6 Avaliação numérica do comportamento de ligações coladas	109
3.7 Avaliação experimental de constantes elásticas da madeira e da distribuição de tensões na linha adesiva	110
3.8 Modelo analítico para avaliação da resistência e da distribuição de tensões em ligações coladas	113
4 Resultados e Discussão	119
4.1 Avaliação preliminar da resistência de ligações coladas associadas a elementos de pinos	119
4.1.1 Resistência e rigidez da madeira	119
4.1.2 Resistência de ligações coladas associadas a elementos de pinos	120
4.1.3 Resistência de ligações com elementos de pinos	121
4.1.4 Discussão dos resultados	122
4.2 Propriedades da madeira	124
4.2.1 Resistência à compressão paralela às fibras – peças delgadas	124
4.2.2 Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	126
4.2.3 Resistência e módulo de elasticidade na compressão normal	128
4.2.4 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	132
4.2.5 Resistência à tração paralela às fibras	134
4.2.6 Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva	136

4.2.7	Resistência à tração normal à lâmina de cola	141
4.2.8	Correlação entre a densidade das tábuas e de corpos-de-prova ...	143
4.2.9	Discussão dos resultados	144
4.3	Resistência e rigidez de ligações coladas paralelas	149
4.3.1	Introdução	149
4.3.2	Análise estatística dos resultados de resistência	151
4.3.3	Resistência de ligações com peça central de 24 mm	153
4.3.4	Resistência de ligações com peça central de 30 mm	160
4.3.5	Resistência de ligações com peça central de 48 mm	167
4.3.6	Rigidez de ligações coladas paralelas	176
4.4	Resistência e rigidez de ligações coladas paralelas sob força	
	excêntrica	178
4.4.1	Introdução	178
4.4.2	Análise estatística dos resultados	181
4.4.3	Resultados de resistência e rigidez.....	181
4.4.4	Discussão dos resultados	183
4.5	Resistência e rigidez de ligações mecânicas paralelas	187
4.6	Resistência e rigidez de ligações coladas normais	191
4.6.1	Introdução	191
4.6.2	Análise estatística dos resultados de resistência	193
4.6.3	Resistência de ligações com madeira BD	194
4.6.4	Resistência de ligações com madeira AD	197
4.6.5	Resistência de ligações com madeira BD e AD	200
4.6.6	Resistência de ligações com peças laterais de 360 mm	203
4.6.7	Rigidez de ligações coladas normais	205
4.7	Resistência e rigidez de ligações coladas normais sob força	
	excêntrica	209
4.7.1	Introdução	209
4.7.2	Análise estatística dos resultados	209
4.7.3	Resultados de resistência e rigidez	209
4.7.4	Discussão dos resultados	210
4.8	Resistência e rigidez de ligações mecânicas normais	214

4.9 Resultados das Análises Numéricas.....	218
4.9.1 Introdução	218
4.9.2 Ligação colada paralela com peça central de 24 mm	220
4.9.3 Ligação colada paralela com peça central de 30 mm	222
4.9.4 Ligação colada paralela com peça central de 48 mm	224
4.9.5 Resultados comparativos das tensões na linha adesiva	226
4.9.6 Ligação colada normal	227
4.10 Resultados da análise experimental com extensômetros elétricos	230
4.10.1 Introdução	230
4.10.2 Constantes elásticas da madeira	230
4.10.3 Ligações Coladas Paralelas	234
4.11 Avaliação analítica da resistência e da distribuição de tensões na superfície adesiva de ligações	240
4.11.1 Considerações iniciais	240
4.11.2 Ligações paralelas.....	241
4.11.3 Ligações normais.....	244
5 Conclusões	248
5.1 Gerais	248
5.2 Relativas às propriedades da madeira	251
5.3 Relativas às ligações coladas paralelas	251
5.4 Relativas às ligações coladas normais.....	255
5.5 Comentários finais e sugestões para trabalhos complementares	257
Referências Bibliográficas.....	259
Anexos	
A Ensaio Preliminares de Ligações	265
A. 1 Materias e métodos	248

B Resultados dos Ensaios de Ligações Coladas Paralelas	273
B. 1 Introdução	274
B. 2 Resistência de ligações com peça central de 24 mm	276
B. 3 Resistência de ligações com peça central de 30 mm	286
B. 4 Resistência de ligações com peça central de 48 mm	296
B. 5 Rigidez de ligações sob força centrada	306
B. 6 Resistência e Rigidez de ligações sob força excêntrica	313
C Resultados dos Ensaios de Ligações Coladas Normais	322
C. 1 Introdução	323
C. 2 Resistência de ligações com madeira BD	324
C. 3 Resistência de ligações com madeira AD	333
C. 4 Rigidez de ligações sob força centrada	338
C. 5 Resistência e rigidez de ligações sob força excêntrica	347
C. 6 Resistência e rigidez de ligações sob força excêntrica	313
D Resultados dos Ensaios de Ligações Mecânicas	358
D. 1 Ligações mecânicas paralelas	359
D. 2 Ligações mecânicas normais	366
E Análise Estatística dos Resultados Experimentais	373
E. 1 Estimadores amostrais, intervalo de confiança e resistência característica	374
E. 2 Análise de variância e teste de médias de ligações coladas	385
Apêndices	
A Recomendações da NBR 7190, ABNT (1970)	404
B Formulação da Equação de Governo das Tensões Cisalhantes e da Obtenção da Força de Fratura em Juntas Adesivas	416

Lista de Figuras

N ^o	Legenda	Pág.
2.1	Distribuição dos constituintes químicos ao longo das camadas da parede de célula de traqueídeo. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	18
2.2	Modelo para a parede celular de uma célula de traqueídeo. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	19
2.3	Modos de ruptura de peças de madeira na tração paralela às fibras. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	24
2.4	Modos de rupturas típicas de traqueídeos sob tração: a) em paredes espessas de lenho tardio; b) em paredes finas de lenho inicial. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	25
2.5	Modos de ruptura na compressão paralela às fibras. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	26
2.6	Modos de ruptura na compressão normal. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	27
2.7	Geometria de carregamentos usuais de peças de madeira solicitadas por compressão normal às fibras. a) em partes centrais; b) nas extremidades. Fonte: GEHRI (1998)	28
2.8	Rupturas em ensaios de tração normal às fibras. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	29
2.9	Resistência estimada pela expressão de Hankinson, em função do ângulo de inclinação do esforço em relação às fibras, para $n=2, 1,5$ e $2,5$	30
2.10	Curvas resultantes de expressões alternativas para estimativa da resistência à compressão inclinada, com $f_{c0} = 40$ MPa e $f_{c90} = 12$ MPa	31
2.11	Modos de rupturas na flexão de vigas de madeira. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	32
2.12	Ruptura por cisalhamento. Fonte: ALMEIDA (1992a)	33
2.13	Perfil densitométrico da madeira de árvore da espécie <i>E. grandis</i> . Fonte: OLIVEIRA (1997)	42
2.14	Gráficos da variação da densidade básica média da madeira, em g/cm^3 , na direção radial medula-casca para cinco árvores de sete espécies de <i>Eucalyptus</i> no DAP. Fonte: OLIVEIRA (1997)	43

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
2.15	Parâmetros para definição de taxa de ductilidade em ligações. Fonte: KAIRI (2001)	45
2.16	Diagrama de carregamento para ensaios de embutimento de acordo com a EN 383 (1992)	51
2.17	a) Modelagem (MEF) dos corpos-de-prova de ligação e configuração deformada; b) curvas força x deslocamento. Fonte: MOREIRA e LÚCIA (2002)	54
2.18	Corpo-de-prova e esquema do ensaio de cisalhamento na ligação colada. Fonte: ASTM D 905 (1994)	56
2.19	a) Corpo-de-prova simétrico de ligação adesiva com três elementos e duas superfícies coladas; b) esquema do ensaio; c) tensões uniformes admitidas no contorno	57
2.20	Corpos-de-prova com representação do ângulo de inclinação das talas laterais coladas e esquema estático dos ensaios de: a) cisalhamento ou compressão com duas peças; b) tração; c) flexão; d) torção	60
2.21	Ligação adesiva simétrica com três peças sob tração e compressão. Fonte: GUSTAFSSON e SERRANO (1998)	63
2.22	a) Modelagem da ligação com elementos finitos; b) tensões cisalhantes (MPa) na linha de cola	66
2.23	Gráfico da resistência ou força de ruptura estimada e da resistência ou força de ruptura por unidade da largura da ligação adesiva em função do comprimento da linha de cola	67
2.24	Estado de tensão em um elemento infinitesimal no sistema cartesiano x (x_1), y (x_2) e z (x_3)	69
2.25	Direções principais da madeira e do modelo ortotrópico	76
2.26	a) Sistema de eixos x_i ; b) tensões nas faces com normais x'_1 e x'_2 ; c) ângulo θ de rotação dos eixos x'_1 e x'_2	78

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
2.27	a) Estado de tensões nas direções x e y ; b) tensões resultantes nas direções x e y na face BC, definida pelo ângulo θ entre a normal n e o eixo x ; c) tensões na face BC nas direções $x'=n$ e y'	79
2.28	Relações geométricas entre deformações em elemento infinitesimal	80
2.29	Corpo-de-prova, posicionamento dos extensômetros e tensões atuantes em ensaio de compressão simples da madeira: a) paralelo às fibras; b) normal às fibras	87
2.30	Gráficos tensão x deformação e correspondentes constantes elásticas obtidos em ensaios de compressão paralela e normal às fibras	89
2.31	Esquema de ensaio de compressão simples inclinada em relação às fibras da madeira para determinação do módulo de cisalhamento G_{LN}	89
3.1	Geometria dos corpos-de-prova para ensaios de ligações coladas paralelas, com três elementos alinhados; b) esquema dos ensaios	100
3.2	a) Geometria dos corpos-de-prova para ensaios de ligações coladas normais; b) esquema dos ensaios com relógios comparadores dispostos em duas faces opostas	100
3.3	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para $bc = hc = 72$: a) paralela; b) normal	102
3.4	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para $bc/hc = 96$: a) paralela; b) normal	102
3.5	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para $bc = hc = 120$: a) paralela; b) normal	103
3.6	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para $bc = hc = 144$: a) paralela; b) normal	103
3.7	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para relações bc/hc : a) 72/108; b) 96/144	104
3.8	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova das ligações coladas, para relações bc/hc : a) 120/180; b) 144/216	104
3.9	Geometria e disposição dos elementos mecânicos dos corpos-de-prova de ligações coladas normais, com $bl = 360$ mm	105

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
3.10	Corpos-de-prova com extensômetros em duas faces opostas para ensaios uniaxiais: a) nas direções principais da madeira; b) em direções inclinadas em relação às fibras da madeira	110
3.11	Corpos-de-prova com extensômetros elétricos nas linhas adesivas de uma das faces: a) CP CoCa 24-120; b) CP “maciço” 30-120; d) CP CoCa 48-120	112
3.12	Esquema dos ensaios com célula de carga, tarugo de distribuição da força, medidores de deslocamentos e corpos-de-prova posicionados na máquina universal de ensaio	112
3.13	Geometria de ligação colada simétrica com três peças, submetida à compressão	113
3.14	Ligação colada com três peças submetida à compressão: a) esquema geral; b) deformações nas adjacências do início da lâmina adesiva, $x = 0$; c) idem para um ponto genérico de ordenada x	115
4.1	Gráfico força x deformação, corpo-de-prova pregado Pr-B1	122
4.2	Gráfico força x deformação, corpo-de-prova parafusado Pa-A1	122
4.3	Gráficos de resistência à compressão paralela às fibras x densidade aparente, corpos-de-prova delgados: a) BD; b) AD; c) BD e AD	125
4.4	Gráficos de módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras x densidade aparente, peças duplas: a) BD; b) AD; c) BD e AD	127
4.5	Gráficos de resistência à compressão normal x densidade aparente, $L_0 = 100$ mm: a) BD; b) AD; c) BD e AD	129
4.6	Gráficos módulo de elasticidade na compressão normal x densidade aparente, peças duplas, $L_0 = 100$ mm: a) BD; b) AD; c) BD e AD	130
4.7	Resistência à compressão normal às fibras x densidade aparente, peças duplas, madeira BD, com $L_0 = 60$ mm	131
4.8	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras x densidade aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD	133
4.9	Resistência da madeira na tração paralela às fibras x densidade aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD	135

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.10	Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva paralelo às fibras da madeira x densidade aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD	137
4.11	Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva com as fibras das peças de madeira normais entre si x densidade aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD	139
4.12	Resistência à tração normal à lâmina adesiva, com as fibras das peças de madeira paralelas entre si x densidade aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD	142
4.13	Correlação entre densidade aparente da madeira dos corpos-de-prova e das tábuas de origem dos ensaios de: a) compressão paralela - peças esbeltas; b) compressão normal; c) cisalhamento paralelo às fibras	143
4.14	Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva em função da inclinação das peças ligadas	145
4.15	Corpos-de-prova de cisalhamento na lâmina adesiva normal às fibras da madeira: a) superfície de ruptura curva acompanhando o anel de crescimento; b) detalhe da acentuada deformação da madeira com as fibras normais ao carregamento; c) superfície de ruptura com trincas de tração normal às fibras	146
4.16	Gráficos força x deslocamento, LCP, $bc = hc = 120$ mm: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm	150
4.17	Gráfico da tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 24$ mm	154
4.18	Gráfico da taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 24$ mm	154
4.19	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 24$ mm	156
4.20	Gráfico da taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 24$ mm	156
4.21	Gráfico resistência x área colada, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm	158

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.22	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm	158
4.23	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva e correspondente reta de correlação, para $h_c \leq 108$ mm, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm	159
4.24	Gráfico taxa de resistência (tensão/ resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm	159
4.25	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 30$ mm	161
4.26	Gráfico taxa de resistência (tensão / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 30$ mm	161
4.27	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 30$ mm	163
4.28	Gráfico taxa de resistência (tensão / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 30$ mm	163
4.29	Gráfico resistência x área colada, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm	165
4.30	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm	165
4.31	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva e correspondente reta de correlação, para $h_c \leq 108$ mm, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm	166
4.32	Gráfico taxa de resistência (tensão/ resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD e BD, $t_c = 30$ mm	166
4.33	Gráfico resistência da ligação x área colada, LCP, madeira BD, $t_c = 48$ mm	168
4.34	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 48$ mm	168
4.35	Gráfico taxa de resistência (tensão média/ resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c=48$ mm	169

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.36	gráfico tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD, $t_c = 48$ mm	169
4.37	Gráfico resistência da ligação x área colada, LCP, madeira AD, $t_c = 48$ mm	171
4.38	Gráfico tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 48$ mm	171
4.39	Gráfico taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 48$ mm	172
4.40	Gráfico tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira AD, $t_c = 48$ mm	172
4.41	Gráfico resistência x área colada, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm	174
4.42	Gráfico tensão média de compressão da peça central x altura da lâmina adesiva e correspondente reta de correlação, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm	174
4.43	Gráfico taxa de resistência (tensão / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm	175
4.44	Gráfico tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina adesiva, LCP, madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm	175
4.45	Gráficos força x deslocamento, LCP: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm	177
4.46	Gráficos força x deformação de LCP sob força excêntrica: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm	179
4.47	Gráficos força x deslocamento de LCP sob força excêntrica: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm	180
4.48	Ligação submetida à força excêntrica: a) ações atuantes; b) tensões cisalhantes, F_y ; c) tensões cisalhantes, $M = F_y \cdot e_x$; d) tensões cisalhantes no primeiro quadrante; e) tensão cisalhante resultante em um ponto	184
4.49	Gráficos força x deformação de ligações mecânicas paralelas: a) Ca, $t_c = 24$ mm; b) CaPa, $t_c = 30$ mm; c) Pa, $t_c = 48$ mm	188

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.50	Gráficos força x deslocamento de ligações mecânicas paralelas: a) Ca, tc = 30 mm; b) CaPa, tc = 48 mm; c) Pa, tc = 24 mm	189
4.51	Gráficos força x deformação, LCN, bc = hc = 120 mm: a) CoCa, tc = 48 mm; b) CoCaPa, tc = 24 mm; c) CoPa, tc = 30 mm	192
4.52	Resistência de ligações coladas normais em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD	195
4.53	Tensão de compressão normal média nas peças laterais em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD	195
4.54	Taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) das peças laterais à compressão normal em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD	196
4.55	Tensão cisalhante média na área colada em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD	196
4.56	Resistência de ligações coladas normais em função da altura da lâmina adesiva, madeira AD	198
4.57	Tensão de compressão normal média nas peças laterais em função da altura da lâmina adesiva, madeira AD	198
4.58	Taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) das peças laterais à compressão normal em função da altura da lâmina adesiva, madeira AD	199
4.59	Tensão Cisalhante Média na Área Colada em Função da Altura da Lâmina Adesiva, madeira AD	199
4.60	Resistência de ligações coladas normais em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD e AD	201
4.61	Tensão de compressão normal média nas peças laterais em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD e AD	201
4.62	Taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) das peças laterais à compressão normal em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD e AD	202

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.63	Tensão cisalhante média na área colada em função da altura da lâmina adesiva, madeira BD e AD	202
4.64	Gráficos força x deformação, LCN, $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 360$ mm: a) CoCa; b) CoCaPa; c) CoPa	204
4.65	Gráficos força x deslocamento, LCN, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 48$ mm; c) CoPa, $t_c = 30$ mm	207
4.66	Gráficos força x deslocamento, LCN, Série com $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 360$ mm: a) CoCa; b) CoCaPa; c) CoPa	208
4.67	Gráficos força x deformação, LCN sob força excêntrica: a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm	212
4.68	Gráficos força x deslocamento, LCN sob força excêntrica: a) CoCa, $t_c = 30$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 48$ mm; c) CoPa, $t_c = 24$ mm	213
4.69	Gráficos força x deformação de LMN: a) Ca, $t_c = 24$ mm; b) CaPa, $t_c = 30$ mm; c) Pa, $t_c = 48$ mm	215
4.70	Gráficos força x deslocamento de LMN: a) Ca, $t_c = 30$ mm; b) CaPa, $t_c = 48$ mm; c) Pa, $t_c = 24$ mm	216
4.71	Malhas de elementos finitos utilizadas nas análises de LCP: a) $t_c = 24$ mm, 648 elem.; b) $t_c = 30$ mm, 720 elem.; c) $t_c = 48$ mm, 864 elem.	218
4.72	Distribuição de tensões na linha adesiva, LCP, $t_c = 24$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no eixo de simetria	220
4.73	Mapas de tensões (MPa), LCP, $t_c = 24$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}	221
4.74	Distribuição de tensões na linha adesiva, LCP, $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no eixo de simetria	222
4.75	Mapa de tensões (MPa), LCN, $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}	223
4.76	Distribuição de tensões na linha adesiva, LCP, $t_c = 48$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no eixo de simetria	224

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.77	Mapa de tensões (MPa), LCN, $t_c = 48$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}	225
4.78	Distribuição das tensões na linha adesiva para as três espessuras de peça central, modelo ortotrópico 2: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x	226
4.79	Malha de 612 elementos finitos, utilizada na modelagem do corpo-de-prova de ligação colada normal, com $t_c = 24$ mm, $b = h_c = 120$	2.27
4.80	Tensões na linha adesiva, LCN, $t_c = 24$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x	2.28
4.81	Mapa das tensões (MPa), LCN, $t_c = 24$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}	229
4.82	Gráficos força x tempo de ensaios: a) paralelo; b) normal	231
4.83	Gráficos obtidos em ensaio de compressão paralela: a) tensão x deformação longitudinal; b) deformação longitudinal x deformação transversal	231
4.84	Gráficos obtidos em ensaio de compressão normal: a) tensão x deformação; b) deformação longitudinal x deformação transversal	232
4.85	Gráficos do ensaio de compressão inclinada, corpo-de-prova CP1: a) força x tempo; b) σ_y x ϵ_y ; b) σ_y x ϵ_x ;	233
4.86	Gráfico força x tempo, do ensaio 3 da ligação com $t_c = 48$ mm	234
4.87	Gráfico força x deformação nos extensômetros, ensaio 1 do corpo-de-prova paralelo colado cavilhado, $t_c = 48$ mm, roseta tri-axial T2	235
4.88	Gráficos força x variação de deformações nos extensômetros, LCP, CoCa, $t_c = 48$ mm: a) E0; b) E45 ⁰ ; c) E90 ⁰	236
4.89	Tensões (MPa) na linha adesiva, $t_c = 24$ mm, MEF-o2 e experimental	237
4.90	Tensões (MPa) na pseudolinha adesiva, $t_c = 30$ mm, MEF-o2 e experimental	238
4.91	Tensões (MPa) na linha adesiva, $t_c = 48$ mm, MEF-o2 e experimental	239
4.92	Avaliações experimentais e analíticas da força de ruptura por unidade de largura x comprimento da linha adesiva, LCP, $t_c = 48$ mm, madeira BD	242

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.93	Avaliações analíticas, numéricas e experimentais das tensões cisalhantes na linha adesiva da LCP, $t_c = 48$ mm: a) $P_f = 217,7$ kN; b) $P = 100$ kN	243
4.94	Avaliações experimentais e analíticas da força de ruptura ou resistência por unidade de largura x comprimento da linha adesiva, LCN	245
4.95	Avaliações analíticas das tensões cisalhantes na linha adesiva, LCN, com $\tau_f = 7,80$ MPa, $t_c = 34$ mm, para $\beta = 1$ e $\beta = 0,036$	246
4.96	Avaliação numérica (MEF-o2, $t_c = 24$ mm) e analítica ($t_c = 34$ mm, $\tau_f = 7,8$ MPa, $\beta = 0,036$) das tensões cisalhantes na linha adesiva, LCN, $P = 50$ kN	246
4.97	Avaliação numérica (MEF-o2, $t_c = 24$ mm) e analítica ($t_c = 34$ mm, $\tau_f = 5$ MPa, $\beta = 0,036$) das tensões cisalhantes na linha adesiva, LCN, $P = 50$ kN	247
A.1	Geometria e dimensões nominais dos corpos-de-prova	267
A.2	Corpos-de-prova colados e cavilhados	268
A.3	Corpos-de-prova colados, cavilhados e pregados	269
A.4	Corpos-de-prova colados, cavilhados e parafusados	269
A.5	Corpos-de-prova de ligações parafusadas	270
A.6	Corpos-de-prova de ligações pregadas	270
A.7	Corpos-de-prova de ligações cavilhadas	271
A.8	Corpos-de-prova de ligações cavilhadas e parafusadas	271
A.9	Esquema dos ensaios de ligações com elementos mecânicos	272
B.1	Gráficos força x deslocamento, LCP: a) CoCa Z5, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa Y10, $t_c = 30$ mm; c) CoPa X15, $t_c = 48$ mm	309
B.2	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoPa, com $b_c = h_c = 120$ mm, madeira BD: a) sobrepostos; b) deslocados	310
B.3	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoCaPa, com $b_c = h_c = 120$ mm, madeira BD: a) sobrepostos; b) deslocados	311
B.4	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoPa, com $b_c = h_c = 120$ mm, madeira BD: a) sobrepostos; b) deslocados	312

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
B.5	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoCa, força excêntrica: a) sobrepostos; b) deslocados	317
B.6	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoCaPa, força excêntrica: a) sobrepostos; b) deslocados	318
B.7	Gráficos força x deslocamento, LCP, CoPa, força excêntrica: a) sobrepostos; b) deslocados	319
B.8	Gráfico força x deslocamento, LCP, sob força centrada (CoCa Z) e sob força excêntrica (CoCa Ze)	320
B.9	Gráfico força x deslocamento, LCP, sob força centrada (CoPa X) e sob força excêntrica (CoPa Xe)	320
B.10	Gráfico força x deslocamento, LCP, sob força centrada (CoCaPa Y) e sob força excêntrica (CoCaPa Ye)	321
C.1	Gráficos força x deslocamento, LCN, CoCa, BD, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm: a) sobrepostos; b) deslocados	342
C.2	Gráficos força x deslocamento, LCN, BD, CoCaPa, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm: a) Sobrepostos; b) Deslocados	343
C.3	Gráficos força x deslocamento, LCN, BD, CoPa, $bc = hc = 120$ mm, bl $= 180$ mm: a) sobrepostos; b) deslocados	344
C.4	Gráficos força x deslocamento, LCN, BD, CoCa, $tc = 30$ mm, $bc = hc =$ 120 mm, $bl = 360$ mm: a) sobrepostos; b) deslocados	346
C.5	Gráficos força x deslocamento, LCN sob força excêntrica, CoCa: a) sobrepostos; b) defasados	353
C.6	Gráficos força x deslocamento, LCN sob força excêntrica, CoCaPa: a) sobrepostos; b) defasados	354
C.7	Gráficos força x deslocamento, LCN sob força excêntrica, CoPa: a) sobrepostos; b) defasados	355
C.8	Gráfico força x deslocamento, LCN, CoCa, sob força centrada e sob força excêntrica	356
C.9	Gráfico força x deslocamento, LCN, CoCaPa, sob força centrada e sob força excêntrica	356

Lista de Figuras (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
C.10	Gráfico força x deslocamento, LCN, CoPa, sob força centrada e sob força excêntrica	357
D.1	Gráficos força x deslocamento, ligações mecânicas paralelas (LMP), Ca: a) sobrepostos; b) deslocados	361
D.2	Gráficos força x deslocamento, LMP, CaPa: a) sobrepostos; b) deslocados	362
D.3	Gráficos força x deslocamento, LMP, Pa: a) sobrepostos; b) deslocados	363
D.4	Gráfico força x deslocamento de ligações paralelas: CoCa e Ca	364
D.5	Gráfico força x deslocamento de ligações paralelas: CoPa e Pa	364
D.6	Gráfico força x deslocamento de ligações paralelas: CoCaPa e CaPa	365
D.7	Gráficos força x deslocamento, Ligações Mecânicas Normais (LMN), Ca: a) sobrepostos; b) deslocados	368
D.8	Gráficos força x deslocamento, LMN, CaPa: a) sobrepostos; b) deslocados	369
D.9	Gráficos força x deslocamento, LMN, Pa: a) sobrepostos; b) deslocados	370
D.10	Gráfico força x deslocamento de ligações normais: CoCa e Ca	371
D.11	Gráfico força x deslocamento de ligações normais: CoCaPa e CaPa	371
D.12	Gráfico força x deslocamento de ligações normais: CoPa e Pa	372
E.1	Curva de distribuição normal padrão, com intervalo central de confiança de $1-\alpha$	376
E.2	Curva de distribuição de Student, com intervalo central de confiança de $1-\alpha$	377
E.3	Curva de distribuição qui-quadrado, com intervalo central de confiança de $1-\alpha$	378

Lista de Tabelas

N ^o	Legenda	Pág.
2.1	Características geométricas dos elementos anatômicos da madeira. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	15
2.2	Algumas propriedades da parede celular. Fonte: WANGAARD ² , apud BODIG e JAYNE (1982)	19
2.3	Valores a e b das relações entre o peso específico e as propriedades mecânicas. Fonte: MARKWARDT e WILSON ⁶ , apud BODIG e JAYNE (1982)	35
2.4	Dados da regressão de avaliação dos parâmetros elásticos (ψ) para umidade de 12% e peso específico com volume verde. Fonte: BODIG e GOODMAM ⁷ , apud BODIG e JAYNE (1982)	36
2.5	Produtividade volumétrica de madeira em diferentes países. Fonte: OLIVEIRA (1997)	37
2.6	Resistências médias de juntas coladas com diferentes ângulos entre as fibras, corrigidas para o teor de umidade de 12%. Fonte: PETRAUSKI (2000)	62
2.7	Valores médios dos coeficientes de Poisson da madeira. Fonte: GOODMAN e BODIG (1973), apud BODIG e JAYNE (1982)	76
2.8	Cosenos diretores l_{ij}	77
2.9	Valores de q_{ij} das expressões de transformação da matriz de flexibilidade	83
2.10	Valores de q_{ij} para rotação do sistema x_i de um ângulo θ em relação ao eixo z (x_3)	84
3.1	Valores de χ^2 e $K_{\sigma,est}$, para diversos valores de $\varphi = n-1$	98
3.2	Dimensões dos corpos-de-prova das ligações coladas paralelas (LCP)	101
3.3	Dimensões dos corpos-de-prova das ligações coladas normais (LCN)	101
4.1	Valores médios das propriedades da madeira	119
4.2	Resistências médias de ligações coladas paralelas	120
4.3	Resistências médias de ligações coladas normais	120
4.4	Resistências médias de ligações paralelas com elementos mecânicos	121

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.5	Resistências médias de ligações normais com elementos mecânicos	121
4.6	Resistência à compressão paralela de corpos-de-prova delgados	124
4.7	Módulo de elasticidade na compressão paralela – peças duplas	126
4.8	Resistência e módulo de elasticidade na compressão normal – peças duplas, L ₀ = 100 mm e três ciclos de carregamento	128
4.9	Resistência na compressão normal, corpos-de-prova com peças duplas e L ₀ = 60 mm, madeira BD	131
4.10	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira	132
4.11	Resistência à tração paralela às fibras da madeira	134
4.12	Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva paralela às fibras	136
4.13	Resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva com as fibras das peças de madeira normais entre si	138
4.14	Resistência (MPa) ao cisalhamento na lâmina adesiva inclinada em relação às fibras	140
4.15	Resistência à tração normal à lâmina adesiva	141
4.16	Valores do produto da amplitude relativa a_r e do coeficiente R^2 obtidos entre propriedades mecânicas e a densidade aparente da madeira	147
4.17	Resistência de LCP, madeira BD, t _c = 24 mm	153
4.18	Resistência de LCP, madeira AD, t _c = 24 mm	155
4.19	Resistência de LCP, madeira BD e AD, t _c = 24 mm	157
4.20	Resistência de LCP, madeira BD, t _c = 30 mm	160
4.21	Resistência de LCP, madeira AD, t _c = 30 mm	162
4.22	Resistência de LCP, madeira BD e AD, t _c = 30 mm	164
4.23	Resistência de LCP, madeira BD, t _c = 48 mm	167
4.24	Resistência de LCP, madeira AD, t _c = 48 mm	170
4.25	Resistência de LCP, madeira BD e AD, t _c = 48 mm	173
4.26	Rigidez de LCP	176
4.27	Resistência e rigidez de LCP sob força excêntrica	181
4.28	Resistência e rigidez de LCP sob força excêntrica por espessura da peça central	182

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
4.29	Resistência experimental e estimada de LCP com e sem excentricidade da força aplicada	186
4.30	Resistência e rigidez de ligações mecânicas paralelas	187
4.31	Valores médios e relações de resistência e rigidez de ligações paralelas	190
4.32	Resistência de LCN, madeira BD	194
4.33	Resistência de LCN, madeira AD	197
4.34	Resistência de LCN, madeira BD e AD	200
4.35	Resistência de LCN, madeira BD, bl = 360 mm, tc = 30 mm, bc = hc = 120 mm	203
4.36	Rigidez de LCN, bc = hc = 120 mm e bl = 180 mm	206
4.37	Rigidez de LCN, tc = 30 mm, bc = hc = 120 mm e bl = 360 mm	206
4.38	Resistência e rigidez de LCN sob força excêntrica	210
4.39	Resistência experimental e estimada de LCN sob força excêntrica	211
4.40	Resistência e rigidez de ligações mecânicas normais	214
4.41	Valores médios e relações de resistência e rigidez de ligações normais	217
4.42	Resultados de análises numéricas (MEF) das LCP	219
4.43	Valores médios de constantes elásticas da madeira obtidos nos ensaios de compressão nas direções dos eixos principais da madeira	230
4.44	Valores de G_{LN} obtidos nos ensaios de compressão inclinada	232
4.45	Rigidezes (N/mm) de LCP obtidas em análises numéricas e em ensaios experimentais	234
4.46	Deformações (%) obtidas nos extensômetros em ensaios de ligação colada e cavilhada, com tc = 48 mm e força de 100 kN	235
4.47	Valores experimentais médios e analíticos da força de ruptura de LCP, madeira BD, tc = 48 mm	242
4.48	Valores experimentais médios da resistência e analíticos da força de ruptura para LCN, madeira BD	244

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
B.1	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/72/72$ (mm)	277
B.2	Resistência de LCP : $tc/bc/hc = 24/96/96$ (mm)	278
B.3	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/72/108$ (mm)	279
B.4	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/120/120$ (mm)	280
B.5	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/96/144$ (mm)	282
B.6	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/144/144$ (mm)	283
B.7	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/120/180$ (mm)	284
B.8	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 24/144/216$ (mm)	285
B.9	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/72/72$ (mm)	287
B.10	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/96/96$ (mm)	288
B.11	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/72/108$ (mm)	289
B.12	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/120/120$ (mm)	290
B.13	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/96/144$ (mm)	292
B.14	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/144/144$ (mm)	293
B.15	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/120/180$ (mm)	294
B.16	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 30/144/216$ (mm)	295
B.17	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/72/72$ (mm)	297
B.18	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/96/96$ (mm)	298
B.19	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/72/108$ (mm)	299
B.20	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/120/120$ (mm)	300
B.21	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/96/144$ (mm)	302
B.22	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/144/144$ (mm)	303
B.23	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/120/180$ (mm)	304
B.24	Resistência de LCP: $tc/bc/hc = 48/144/216$ (mm)	305
B.25	Rigidez de LCP, $tc = 24$ mm	307
B.26	Rigidez de LCP, $tc = 30$ mm	307
B.27	Rigidez de LCP, $tc = 48$ mm	308
B.28	Resistência e Rigidez de LCP sob força excêntrica, $tc = 24$ mm	314
B.29	Resistência e Rigidez de LCP sob força excêntrica, $tc = 30$ mm	315
B.30	Resistência e Rigidez de LCP sob força excêntrica, $tc = 48$ mm	316

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
C.1	Resistência de LCN, BD, bc = hc = 72 mm	325
C.2	Resistência de LCN, BD, bc = hc = 96 mm	326
C.3	Resistência de LCN, BD, bc = hc = 120 mm	327
C.4	Resistência de LCN, BD, bc = hc = 144 mm	330
C.5	Resistência de LCN, BD, CoCa, bl = 360 mm	332
C.6	Resistência de LCN, AD: bc/hc = 72/72 (mm)	334
C.7	Resistência de LCN, AD: bc/hc = 96/96 (mm)	335
C.8	Resistência de LCN, AD: bc/hc = 120/120 (mm)	336
C.9	Resistência de LCN, AD: bc/hc = 144/144 (mm)	337
C.10	Rigidezes de LCN, CoCa	339
C.11	Rigidezes de LCN, CoCaPa	340
C.12	Rigidezes de LCN, CoPa	341
C.13	Rigidezes de LCN, CoCa, tc = 30 mm e bl = 360 mm	345
C.14	Resistência de LCN sob força excêntrica, CoCa	348
C.15	Resistência de LCN sob força excêntrica, CoCaPa	349
C.16	Resistência de LCN sob força excêntrica, CoPa	350
C.17	Rigidezes de LCN sob força excêntrica, CoCa	351
C.18	Rigidezes de LCN sob força excêntrica, CoCaPa	352
C.19	Rigidezes de LCN sob força excêntrica, CoPa	352
D.1	Resistência e rigidez de LMP, cavilhadas	359
D.2	Resistência e rigidez de LMP, cavilhadas e parafusadas	360
D.3	Resistência e rigidez de LMP, parafusadas	360
D.4	Resistência e rigidez de LMN, cavilhadas	366
D.5	Resistência e rigidez de LMN, cavilhadas e parafusadas	367
D.6	Resistência e rigidez de LMN, parafusada (Pa)	367
E.1	$K_{\sigma,est}$, σ_{esp} e K_E , para diferentes valores de n e S/\bar{x} , com $P(\chi^2) = 50\%$	382
E.2	Coefficiente k_1	384
E.3	Quadro de resultados da análise de variância	387

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
E.4	Quadro de resultados da análise de variância de dois fatores com repetições	389
E.5	Análise de variância (ANOVA) da resistência (F_u), LCP, n = 310	391
E.6	Resistências médias, LCP, n = 310	391
E.7	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc = hc = 72 mm	391
E.8	ANOVA (F_u), LCP, tabela de médias, bc = hc = 96 mm	392
E.9	ANOVA (F_u), LCP, tabela de médias, bc = 72 mm, hc = 108 mm	392
E.10	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc = hc = 120 mm	392
E.11	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc= 96 mm, hc = 144 mm	393
E.12	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc = hc = 144 mm	393
E.13	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc=120 mm, hc= 180 mm	393
E.14	ANOVA (F_u), LCP, tabela e teste de médias, bc=144 mm, hc=216 mm	394
E.15	ANOVA (F_u) em função da faixa de densidade, LCP, tabela de médias	394
E.16	ANOVA (S_{lig}), LCP, tabela e teste de médias, bc = hc = 120 mm	395
E.17	ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCP sob força excêntrica, tabela e teste de médias	395
E.18	ANOVA (S_{lig}), LCP sob força excêntrica, tabela e teste de médias	395
E.19	Análise de variância da resistência ($F_{0,2\%}$), LCN, n = 169	397
E.20	Valores médios da resistência ($F_{0,2\%}$), LCN, para os fatores: tipo de ligação, espessura da peça central e faixa de densidade	397
E.21	ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCN, tabela e teste de médias, bc = hc = 72 mm	397
E.22	ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, tabela de médias, bc = hc = 96 mm	398
E.23	ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, tabela de médias, bc = hc = 120 mm	398
E.24	ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, tabela de médias, bc = hc = 144 mm	398
E.25	ANOVA ($F_{0,2}$) função da densidade, lcn, tabela de médias, n =36	399
E.26	Análise de variância para a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, n = 169	399
E.27	Valores médios da força máxima ($f_{m\acute{a}x}$) para as variáveis independentes: tipo de ligação, espessura da peça central e faixa de densidade	400
E.28	ANOVA ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, tabela e teste de médias, bc = hc = 72 mm	400
E.29	ANOVA ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, tabela e teste de médias, bc = hc = 96 mm	400
E.30	ANOVA ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, tabela e teste de médias, bc = hc = 120 mm	401

Lista de Tabelas (Continuação)

N ^o	Legenda	Pág.
E.31	ANOVA ($F_{\text{máx}}$), LCN, tabela e teste de médias, $bc = hc = 144 \text{ mm}$	401
E.32	Análise de variância das rigidezes, LCN, $bc = hc = 120 \text{ mm}$, $n = 55$	402
E.33	Valores médios da rigidez, LCN, para as variáveis independentes: tipo de ligação, espessura da peça central e faixa de densidade	402
E.34	ANOVA da rigidez (S_{lig}) LCN, tabela de médias	402
E.35	Análise de variância ($F_{0,2\%}$, S_{lig}), LCN sob força excêntrica	403
E.36	ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCN sob força excêntrica, tabela e teste de médias	403
E.37	ANOVA (S_{lig}), LCN sob força excêntrica, tabela e teste de médias	403

Abreviaturas, Siglas e Símbolos

- β → fator da relação entre as taxas de variação da tensão cisalhante no início e fim da lâmina adesiva de ligações simétricas de três peças submetidas à compressão;
- δ → deslocamento; coeficiente de variação populacional de uma variável;
- δ_{am} → coeficiente de variação amostral de uma variável;
- δ_{est} → coeficiente de variação estimado para a população de uma variável;
- δ_{ij} → função delta de Kronecker;
- ε → deformação normal;
- ε_i → notação da deformação normal na direção do eixo x_i , com $i = 1, 2, 3$ em problemas 3-D e $i = 1, 2$ em problemas 2-D;
- ε_{ij} → notação indicial do tensor de deformação relacionado ao sistema de eixos x_i , ou componente do tensor relacionado aos eixos x_i e x_j , com $i, j = 1, 2, 3$ em problemas 3-D e $i, j = 1, 2$ em problemas 2-D;
- ε_x → deformação normal na direção do eixo x ;
- γ → distorção ou deformação angular;
- γ_{ij} → notação da deformação angular relacionada aos eixos x_i e x_j , com $i \neq j$;
- γ_{xy} → distorção ou deformação angular relacionada aos eixos x e y ;
- $K_{\sigma,est}$ → relação entre o desvio padrão estimado da população e o obtido da amostra;
- K_E → fator de relação entre o valor característico estimado e o valor médio amostral;
- μ → 10^{-6} ; constante de Lamé; média populacional de uma variável;
- ν → coeficiente de Poisson;
- ν_{ij} → notação do coeficiente de Poisson em relação aos eixos x_i e x_j ;
- θ → ângulo de inclinação do esforço em relação às fibras da madeira; ângulo de rotação do sistema de referência de eixos ortogonais x'_i em relação aos eixos x_i ;
- ρ → distância do centro geométrica de uma área até o ponto considerado;
- σ → tensão normal; desvio padrão da população de uma variável;
- σ_{est} → desvio padrão estimado da população de uma variável;
- σ^2 → variância da população de uma variável;
- σ_{ij} → notação indicial ou componente do tensor de tensões;

Abreviaturas, Siglas e Símbolos (Continuação)

- σ_x → tensão normal na direção do eixo x ;
- \acute{o}_{c0} → tensão normal atuante de compressão paralela às fibras da madeira;
- $\acute{o}_{c90}, \acute{o}_{cn}$ → tensão normal atuante de compressão normal às fibras da madeira;
- τ → tensão de cisalhamento;
- τ_{ij} → notação indicial da tensão cisalhante relacionada aos eixos x_i e x_j ;
- τ_f → tensão de cisalhamento máxima ou de referência na fratura;
- τ_{gv0} → tensão cisalhante média na lâmina adesiva, paralelo às fibras da madeira;
- $\tau_{gv0-90,m}$ → tensão cisalhante média na lâmina adesiva, com as peças de madeira coladas com as fibras ortogonais entre si;
- τ_{xy} → tensão de cisalhamento relacionada aos eixos x e y ;
- b → largura da peça central de ligações com três peças;
- bc → largura da lâmina de cola de ligações com três peças;
- bl → comprimento das peças laterais de ligações normais com três peças;
- hc → altura da lâmina de cola de ligações com três peças;
- d → diâmetro de elemento mecânico de pino; densidade aparente;
- d_{cp} → densidade aparente da madeira obtida de amostra de corpo-de-prova;
- d_t → densidade aparente da madeira obtida de tábuas inteiras;
- $f_{c\theta}$ → resistência à compressão inclinada de um ângulo θ em relação às fibras;
- f_{c0} → resistência à compressão paralela às fibras da madeira;
- $f_{c0,k}$ → resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira;
- $f_{c0,m}$ → resistência média à compressão paralela às fibras da madeira;
- $f_{c0,esp}$ → resistência estimada à compressão paralela às fibras da madeira, obtida por meio de correlação linear com a densidade aparente;
- f_{c90}, f_{cn} → resistência à compressão normal às fibras da madeira;
- $f_{c90,k}$ → resistência característica à compressão normal às fibras da madeira;
- $f_{c90,m}$ → resistência média à compressão normal às fibras da madeira;
- $f_{c90, máx}$ → resistência máxima obtida em ensaio de compressão normal às fibras;
- $f_{c0,esp}$ → resistência estimada à compressão paralela às fibras da madeira, obtida por meio de correlação linear com a densidade aparente.

Abreviaturas, Siglas e Símbolos (Continuação)

- f_{gv0} → resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva paralela às fibras da madeira;
- f_{gv0-90} → resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva com as peças de madeira coladas ortogonalmente entre si;
- $f_{gv0-\alpha,0,2\%}$ → resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva com as peças de madeira inclinadas de um ângulo α entre si, associada à deformação residual de 0,2%;
- f_{gt90} → resistência da lâmina adesiva à tração normal às fibras da madeira;
- f_m → resistência média;
- $f_{k,est}$ → resistência característica estimada;
- f_{t0} → resistência à tração paralela às fibras da madeira;
- f_{v0} → resistência ao cisalhamento paralela às fibras da madeira;
- gl → graus de liberdades dos efeitos ou dos resíduos de uma análise de variância;
- t → espessura das peças laterais de ligações com três peças;
- tc → espessura da peça central de ligações com três peças;
- n → número de elementos de uma amostra;
- \bar{x} → média amostral de uma variável x;
- Ac → área colada de uma ligação;
- Ca → ligação cavilhada;
- CaPa → ligação cavilhada e parafusada;
- CoCa → ligação colada e cavilhada;
- CoCaPa → ligação colada, cavilhada e parafusada;
- CoCaPr → ligação colada, cavilhada e pregada;
- CoPa → ligação colada e parafusada;
- CoPr → ligação colada e pregada;
- E → módulo de Young, de deformação ou de elasticidade longitudinal do material;
- E_i → notação indicial do módulo de elasticidade na direção do eixo x_i ;
- E_{c0} → módulo de elasticidade da madeira na direção paralela às fibras;
- E_n, E_{c90} → módulo de elasticidade da madeira na direção normal às fibras;
- E_x → módulo de elasticidade longitudinal do material na direção x;
- F → força atuante ou força aplicada;

Abreviaturas, Siglas e Símbolos (Continuação)

- F^e → força atuante ou força aplicada com excentricidade;
 F_{calc} → fator de Fisher calculado na análise de variância;
 F_x → força atuante ou força aplicada na direção x;
 F_u → força última ou força de ruptura obtida em ensaio;
 F_u^e → força última ou força de ruptura aplicada com excentricidade;
 F^{est} → força estimada;
 F_u^{est} → força última ou resistência estimada;
 $F_{u,méd}$ → valor médio da força última ou força de ruptura;
 F_k → força resistente característica;
 $F_{0,2\%}$ → força ou resistência associada à deformação residual de 0,2%;
 $F_{máx}$ → força resistente máxima;
 G → módulo de deformação ao cisalhamento;
 G_i → módulo de deformação do material ou elemento de ordem i;
 G_f → energia de fratura da linha adesiva;
 G_{ij} → notação indicial do módulo de deformação ao cisalhamento no plano x_i e x_j ou relacionado aos eixos x_i e x_j ;
 L, R, T → direções principais da madeira: paralela às fibras, radial e tangencial aos anéis de crescimento;
 L, N → direções principais da madeira: paralela às fibras e normal às fibras;
 LCN → ligação coladas normal;
 LCP → ligação colada paralela;
 LMN → ligação mecânica normal;
 LMP → ligação mecânica paralela;
 Pa → ligação parafusada;
 Pr → ligação pregada;
 P_f → força na fratura;
 S → desvio-padrão amostral;
 S_{lig} → rigidez da ligação.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo geral o estudo teórico e experimental de ligações de peças de madeira efetuadas por meio de adesivos em áreas reduzidas associadas a elementos mecânicos adicionais de pinos, visando uma avaliação de seu comportamento resistente e sua adequação ao emprego como ligação estrutural em emendas de peças em geral, em ligações de peças compostas e em ligações de pórticos e treliças.

Utilizou-se madeira de eucalipto seca em estufa, com tábuas de espessuras de 25 mm e 32 mm. Foram identificadas madeiras das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. A madeira foi separada em duas faixas de densidade, de 550 a 750 kg/m³ e de 750 a 950 kg/m³. Foi utilizada mistura adesiva à base de resorcinol-formaldeído. Foram realizados ensaios de compressão, em corpos-de-prova com três peças de madeira, coladas paralelas entre si ou com as peças laterais ortogonais à peça central. A espessura nominal das peças laterais foi de 24 mm e das peças centrais de 24, 30 e 48 mm. Foram utilizados os seguintes elementos mecânicos adicionais: cavilha central, cavilha central e parafusos de diâmetros reduzidos e parafuso central de maior diâmetro.

As análises estatísticas indicaram que as resistências das ligações coladas paralelas foram influenciadas pela espessura da peça central e pela faixa de densidade da madeira e que não foram influenciadas pelo tipo de elemento mecânico. As rupturas obtidas foram frágeis e as resistências elevadas, quando comparadas às resistências à compressão paralela das correspondentes peças centrais, com eficiência próxima a 100% para relações, entre o comprimento da lâmina de cola e a espessura da peça central, da ordem de quatro a cinco. Nos ensaios sob força excêntrica, ocorreram perdas significativas de resistência e de rigidez.

Os resultados das avaliações das tensões na linha adesiva, nos ensaios experimentais com emprego dos extensômetros elétricos, foram próximos aos obtidos com as análises numéricas. A formulação analítica desenvolvida conduziu a estimativas de força de ruptura próximas às obtidas experimentalmente. As distribuições de tensões cisalhantes na lâmina adesiva, obtidas com a avaliação analítica e com a análise numérica, foram bastante próximas entre si, embora o efeito de concentração de tensões nas extremidades da linha adesiva tenha sido mais acentuado nas avaliações numéricas.

As análises estatísticas dos resultados de ligações coladas normais indicaram que as resistências e rigidezes foram influenciadas pela faixa de densidade da madeira e não pelo tipo de elemento mecânico adicional e pela espessura da peça central. As resistências das ligações foram condicionadas pela baixa rigidez e resistência à compressão normal das peças laterais. As estimativas por meio de avaliações analíticas apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Nos ensaios realizados com força excêntrica, a perda média de resistência variou de quase 0 a 30%, em função do tipo de ligação.

Os bons resultados obtidos nas ligações coladas avaliadas, principalmente as elevadas resistências das ligações coladas paralelas, comprovaram o enorme potencial de uso em estruturas de pequeno a médio porte.

ABSTRACT

This work had the purpose of investigating both theoretically and experimentally the behavior of wood joints of reduced area in which an adhesive was used in conjunction with a mechanical connector (dowel), so as to describe their strength and their use as structural connection in general joints members, in joints of compound members and in joints of de trusses and frames.

Air-dried eucalypt lumber was used in the experiments, of boards with 25 mm and 32 mm thick; it was later determined that they consisted of the species *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*. They were separated into two classes of specific gravity, from 550 to 750 kg/m³ or from 750 to 950 kg/m³. The adhesive used was a commercial resorcinol-formaldehyde resin. Compression tests were conducted in specimens built up of three wood pieces, glued together so that either the three pieces had their grains parallel to the direction of the applied load or the two lateral pieces were so placed that their fibers were perpendicular to the grain of the central piece. The nominal thickness of the lateral pieces was 24mm; the central piece was 24, 30 or 48mm thick. In addition to the adhesive, a central dowel, or a central dowel plus bolts of small diameters or a larger diameter, centrally driven bolt were also used.

Statistical analysis indicated that the strength of the parallel-members joints were influenced by the thickness of the central piece and by the specific gravity of wood, but not by type of the mechanical connector. Rupture occurred suddenly, thus indicating fragility, but strength was high, when compared to the crushing strength of the central member. Efficiency was close to 100% when the hc/tc ratio between the length of the glue line and the thickness of the central member was of the order of 4 to 5. Significant losses of strength and stiffness were detected when the loads were applied off-center.

Strain-gages were used to measure stresses along the glue line. The experimental results were close to those obtained by a numerical analysis. The mathematical formulation so developed gave good estimates of the rupture forces found on the laboratory. Shear stresses in the glue line given by analytical reasoning or by numerical analysis agreed closely, although the effect of stress concentrations at both ends of the glue line was more accentuated when numerical evaluation was used.

Statistical analysis of data from orthogonally-glued members indicated that strength and stiffness were influenced by wood density but not by the presence of mechanical connectors or by the thickness of the central member. The strength of the joints was controlled by the low stiffness and low strength of the lateral members that were loaded perpendicularly to the grain. The analytical evaluations also agreed well with the experimental results. For eccentric loading, the average loss of strength varied from almost nil to about 30%, depending on joint model.

The good results of glued joints assessed in this work, mainly the high strength of parallel-member joints, shows the potential of use of this solution for small and medium size structures.

1

INTRODUÇÃO

1.1 O Uso da Madeira em Estruturas

A madeira apresenta uma série de características que a torna um excelente material para uso ampliado na construção civil, em particular nas estruturas das edificações, destacando-se seu reduzido peso próprio, a boa resistência mecânica e a facilidade de beneficiamento do material. Tais características positivas ficam acentuadas quando a madeira é utilizada em componentes estruturais pré-fabricados, tais como vigas, pilares, pórticos e arcos. A pré-fabricação permite um melhor controle de qualidade e maior otimização do processo construtivo.

Outro fator importante para o estímulo ao uso da madeira em estruturas pré-fabricadas está relacionado à associação de seu emprego com o desejado desenvolvimento sustentável, pelo fato de ser um recurso natural renovável por meio de reflorestamento, ao reduzido consumo energético ao longo de seu beneficiamento em comparação aos demais materiais estruturais e às importantes funções ambientais e ecológicas durante a vida das árvores de origem, como na contribuição ao resgate de carbono da atmosfera e na proteção do solo contra a erosão das águas das chuvas.

O Brasil possui um enorme potencial madeireiro devido à existência da maior floresta natural do mundo na região amazônica, às dimensões territoriais e às características edafoclimáticas, que o tornam adequado para a produção de madeira em florestas plantadas. Apesar deste potencial, o emprego da madeira em estruturas é ainda muito limitado quando comparado ao de países mais desenvolvidos do Hemisfério Norte. Parte significativa dessa limitação tem caráter cultural originado no emprego de técnicas e soluções construtivas deficientes e na ausência de manutenção sistemática, que comprometem a qualidade da construção e a durabilidade do material, conduzindo a um círculo vicioso, no qual a população em geral acredita que a madeira é adequada apenas a usos restritos ou em aplicações provisórias.

Devido à sua origem biológica e à sua constituição anatômica fibrosa orientada, a madeira apresenta elevada variabilidade de suas características físicas e mecânicas e algumas restrições de emprego que estão relacionadas, principalmente, ao seu caráter higroscópico, ao fato de ser um material combustível, à possibilidade de ocorrência de defeitos de crescimento ou originados na secagem e a de ter sua durabilidade comprometida devido a ataque de agentes xilófagos. Para que se possa ter um bom uso da madeira em estruturas e para que seja possível explorar sua beleza estética e sua elevada resistência mecânica, com garantia de durabilidade e custos competitivos, torna-se necessário que sejam empregadas soluções técnicas que permitam utilizar favoravelmente o potencial do material.

Devido aos elevados custos atuais da madeira nativa de grande durabilidade natural e às futuras limitações decorrentes da implantação de políticas que exijam uma utilização racional dos recursos florestais da região amazônica, tornam-se imperativo o apoio governamental e a realização de esforços integrados entre centros de pesquisas e empresas de base florestal para a ampliação da produção e do mercado consumidor de produtos oriundos de florestas plantadas em substituição às nativas no campo da construção civil. Estes esforços devem objetivar tanto o aumento da produção e da melhoria da qualidade da matéria-prima, quanto o desenvolvimento de tecnologias para o emprego mais eficiente dessas madeiras oriundas de florestas plantadas.

A grande plasticidade de algumas espécies do gênero *Eucalyptus*, sob o ponto de vista silvicultural, faz com que se adaptem às mais diferentes regiões e a distintas condições de crescimento. Este fato, aliado à excelente forma dos fustes produzidos, às elevadas taxas de crescimento e principalmente à possibilidade de garantia no suprimento ao longo do tempo, eleva a madeira de eucalipto como a mais promissora matéria-prima para a indústria madeireira, particularmente na região Sudeste do país.

Cabe destacar que apesar da boa adaptação do gênero *Eucalyptus* na maior parte do território nacional, grande parte da madeira atualmente disponível produzida por essas árvores é de qualidade limitada, quando se consideram utilizações mais nobres como em componentes permanentes para a construção civil. A qualidade inferior em boa parte dessas madeiras decorre exatamente dos objetivos com que estas foram introduzidas em grande escala no país, para atender à indústria de celulose e como energia para a siderurgia. Desta forma, para tornar possível uma utilização intensiva da madeira de eucalipto, como matéria-prima competitiva, em aplicações com maior valor agregado, em particular na substituição ou como alternativa às espécies tradicionais nativas para a construção civil, é necessário o aprimoramento tecnológico de toda a cadeia de produção.

Atualmente, existe um estoque razoável de madeira de reflorestamento nas Regiões Sul, Sudeste e no sul da Bahia. Os números das reservas existentes estimadas no Estado de Minas Gerais aproximam-se de 2,0 milhões de hectares, com forte predominância de madeira de árvores do gênero *Eucalyptus*. No entanto, alertas sobre sérias limitações na disponibilidade de madeira de reflorestamento em um futuro próximo têm sido feito por vários especialistas da área, que prevêem uma elevada possibilidade de ocorrência de um apagão florestal, em função dos estoques existentes, das taxas de renovação ou de implantação de novas florestas, do tempo de maturação ou crescimento das árvores, do consumo atual e das possíveis taxas de crescimento da economia interna e das exportações.

Nas estruturas em geral e nas de madeira em particular, muitos de seus componentes principais são executados como estruturas reticuladas, na forma de grelhas, pórticos e

treliças. Tais estruturas exigem, pela própria composição da forma, o emprego de ligações entre seus membros componentes. Também no caso de emprego de peças de maiores dimensões e peças compostas, é necessário o emprego de ligações e emendas.

As treliças caracterizam-se pelo uso de peças com dimensões transversais individuais reduzidas, em comparação com as dimensões da estrutura, e pelas formas trianguladas apresentadas internamente por suas barras componentes. Este tipo de composição faz com que as barras de treliças fiquem solicitadas por esforços principais axiais, conduzindo a estruturas com elevada rigidez e peso próprio reduzido, quando comparadas às estruturas alternativas de alma-cheia resistentes à flexão. As formas treliçadas são utilizadas, principalmente, quando há necessidade de planos inclinados, caso das estruturas de cobertura, e em estruturas de maiores dimensões, quando as soluções alternativas em alma-cheia tendem a apresentar elevado peso próprio e excessivo consumo de material.

O comportamento das treliças estruturais de madeira está condicionado principalmente aos seguintes fatores: geometria e condições de apoio da estrutura, forma e material dos elementos componentes, cargas atuantes, rigidez e resistência das ligações utilizadas. A capacidade resistente das estruturas treliçadas é condicionada por dois fatores fundamentais, sendo o primeiro relacionado à capacidade de carga das barras compridas, devido ao fenômeno da instabilidade por flambagem, e o segundo, ao comportamento e à resistência das ligações de suas barras componentes.

Nas estruturas treliçadas, as peças principais que formam os banzos são em geral contínuas nas ligações e as peças internas, que formam os montantes e as diagonais, apresentam ligações com rigidezes que dependem dos elementos utilizados. Em certas composições construtivas, não se consegue uma perfeita concorrência das barras nos nós da ligação. Tais fatores produzem um comportamento real diferenciado do modelo teórico de treliça, usualmente empregado nas avaliações dos deslocamentos e esforços solicitantes, que considera os nós de ligação entre as barras como rótulas perfeitas e uma concordância da convergência das barras sobre esses nós.

1.2 Ligações de Peças Estruturais de Madeira

Nas emendas e ligações de peças estruturais de madeira em geral e nas ligações entre as barras de treliças em particular, usualmente são empregados elementos mecânicos tais como pinos (pregos, parafusos e cavilhas de madeira), anéis metálicos e chapas de dentes estampados. Em muitas aplicações, as dimensões das peças componentes ficam condicionadas ao número e aos espaçamentos necessários dos pinos nas ligações, devido à limitada capacidade de carga individual de alguns desses elementos. Um outro fator importante no emprego desses elementos de ligação, quando se pretende uma utilização aparente da estrutura, reside no aspecto estético das soluções utilizadas, que pode gerar restrições adicionais ao uso de alguns destes elementos.

As ligações por elementos mecânicos são basicamente discretas ao longo da área de ligação, produzindo concentração de tensões nas áreas restritas de contato entre a madeira e os elementos mecânicos, que mobilizam deformações elevadas da madeira nas regiões em torno dessas áreas.

As ligações com adesivos em áreas contínuas apresentam grande rigidez e boa resistência ao cisalhamento paralelo à superfície colada, sendo empregadas usualmente na confecção de peças de madeira laminada colada (MLC), nas quais as lâminas componentes são coladas com a orientação das fibras paralelas entre si. A utilização de MLC tem sofrido, ao longo das últimas décadas, uma significativa ampliação a partir do surgimento de adesivos comerciais à base de resina sintética. Estes adesivos caracterizam-se por apresentar elevada resistência ao cisalhamento, cura à temperatura ambiente e reduzida influência às variações de umidade da madeira após a colagem. Existem vários estudos disponíveis na literatura e diversas aplicações práticas da técnica de MLC com emprego de madeira de florestas plantadas, em particular com uso de madeira de eucalipto.

O emprego de adesivo em ligações com áreas reduzidas é comum em alguns tipos específicos de peças estruturais, por exemplo na execução de peças compostas afastadas com elementos descontínuos interpostos com ligações coladas. No entanto, a utilização

em ligações de peças estruturais em geral e nas treliças em particular sofre ainda sérias restrições em função do caráter frágil das rupturas e ao limitado conhecimento do comportamento estrutural dessas ligações, em termos de rigidez, de resistência e do processo de ruptura desenvolvido, principalmente em relação às ligações entre peças com fibras inclinadas entre si.

Com o emprego de adesivos em ligações de treliças, estima-se que as ligações sejam pouco deformáveis e o modelo de pórtico com ligações rígidas seja adequado para a análise teórica do comportamento. Como as ligações por elementos mecânicos são mais deformáveis, as análises teóricas mais precisas devem utilizar modelos que considerem o comportamento flexível ou semi-rígido dessas ligações.

Para a definição de um critério de dimensionamento estrutural, de modo consistente com a metodologia de verificação à segurança do Método dos Estados Limites, torna-se necessária uma compreensão adequada dos mecanismos resistentes e dos processos de ruptura associados à aplicação considerada.

A madeira é um material biológico constituído de diferentes elementos anatômicos, os quais diferenciam-se entre si ao longo do tecido lenhoso em função da classe, da espécie, da época e da idade de sua formação, aumentando a importância de identificação do processo de ruptura da madeira, muito embora em determinadas aplicações seja difícil de se ter uma única caracterização que possa ser generalizada.

Nas ligações coladas em áreas reduzidas, vários fatores influenciam seu comportamento, destacando-se a resistência e rigidez da madeira, a resistência e rigidez do adesivo utilizado e a sua afinidade com a madeira, a qualidade da confecção das ligações, a inclinação relativa das peças de madeira, a existência de elementos transversais e o estado de tensões solicitantes nas superfícies de ligação. A distribuição de tensões na superfície adesiva depende, por sua vez, da geometria e arranjo da ligação, do tipo e intensidade dos esforços transmitidos, da rigidez do adesivo e das peças de madeira e, conseqüentemente, das dimensões transversais e inclinação relativa das peças de madeira e da existência de elementos mecânicos transversais.

1.3 Objetivos

Este trabalho teve por objetivo geral o estudo teórico e experimental de ligações de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos mecânicos adicionais de pinos, visando a avaliação de seu emprego como ligação estrutural em emendas de peças em geral, em ligações de peças compostas e em ligações de barras de pórticos e treliças. Como objetivos específicos, este trabalho visa:

- Avaliar a resistência, a rigidez e o processo de ruptura das ligações em função de:
 - inclinação entre as peças componentes;
 - tipo de elemento mecânico adicional;
 - espessura da peça central;
 - dimensões das áreas coladas; e
 - carregamento sob força excêntrica, indutora de torção na lâmina de cola.
- Avaliar a influência dos elementos mecânicos adicionais em relação à facilidade de execução e adequação a um processo de produção industrial.
- Avaliar comparativamente o comportamento de ligações coladas com ligações com emprego apenas de elementos mecânicos.
- Definir uma metodologia simplificada para avaliar a capacidade resistente de ligações coladas.
- Avaliar experimentalmente a distribuição de tensões nas superfícies coladas.
- Avaliar teoricamente o comportamento de ligações coladas por meio de métodos numéricos.

Esse trabalho visa, complementarmente, subsidiar um projeto de desenvolvimento tecnológico de um processo de fabricação industrial de componentes estruturais de madeira com emprego de ligações coladas, em fase de avaliação e aperfeiçoamento.

Os elementos mecânicos de pinos utilizados em associação com as ligações coladas são constituídos de pregos, parafusos ou cavilhas de madeira, tendo sido empregados com a finalidade de cumprir os seguintes objetivos principais:

- Produzir um certo grau de confinamento transversal, de forma a evitar ou minimizar as tensões de tração que possam ocorrer na direção normal ao plano das superfícies coladas, originadas por esforços provocados pelos carregamentos nas condições de serviço ou provenientes de deslocamentos transversais impostos nas fases de transporte e montagem de aplicações práticas.
- Evitar a ocorrência de ruptura explosiva nas ligações, comum em ensaios de avaliação de resistência ao cisalhamento da madeira ou da lâmina de cola.
- Propiciar resistência residual ou pós-ruptura da ligação colada, que deve ser suficiente para evitar o colapso da estrutura, desde que a composição construtiva empregada permita a redistribuição dos esforços atuantes.
- Além desses importantes efeitos positivos, estima-se que os elementos mecânicos, quando utilizados de forma distribuída e localizados próximos ao perímetro externo da superfície colada, possam aumentar a resistência da ligação para esforços combinados que produzam uma torção no plano da lâmina adesiva.

Para maior praticidade deste estudo optou-se pela utilização de madeira oriunda de florestas plantadas do gênero *Eucalyptus*, devido a sua maior disponibilidade e enorme potencial silvicultural da Região Sudeste e na região sul da Bahia, além das boas características mecânicas das madeiras de várias das espécies desse gênero. Foi empregado adesivo sintético à base de mistura resorcinol-formaldeído, tendo em vista a possibilidade de cura à temperatura ambiente, a elevada resistência e rigidez ao cisalhamento e a reduzida influência das variações usuais de umidade da madeira na resistência do adesivo.

Em função das limitações existentes, em termos de tempo, recursos e equipamentos disponíveis para a realização de ensaios experimentais, foram realizados ensaios de ligações apenas sob esforço de compressão, com três peças de madeira de espessuras comerciais e dispostas simetricamente com as fibras alinhadas entre si ou com a peça central com as fibras ortogonais em relação às fibras das peças laterais.

1.4 Descrição do Trabalho

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a constituição química e anatômica da madeira, suas propriedades físicas, suas características de resistências mecânicas e seus processos de ruptura, sobre algumas características particulares e importantes da madeira de eucalipto, sobre as ligações de peças de madeira com elementos mecânicos e com adesivos e, por fim, sobre modelos matemáticos de avaliação do comportamento elástico da madeira.

No terceiro capítulo apresenta-se a descrição dos materiais, dispositivos, componentes, metodologias e sistemas utilizados na caracterização experimental das propriedades da madeira, nas avaliações experimentais e nas análises numéricas das ligações. Apresenta-se também nesse capítulo a formulação de um modelo analítico de avaliação simplificada da distribuição de tensões de cisalhamento e da força de ruptura em ligações de peças de madeira coladas lateralmente submetidas à compressão.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados das avaliações experimentais, das análises estatísticas, das modelagens numéricas e das avaliações analíticas efetuadas. Estão também nesse capítulo, breves discussões sobre os resultados obtidos.

No quinto capítulo apresentam-se, com base nos resultados obtidos das avaliações efetuadas, as conclusões consideradas adequadas em relação aos objetivos propostos e ao nível de conhecimento científico e tecnológico que se conseguiu estabelecer em relação ao tema do presente trabalho.

No Anexo A está a descrição dos ensaios iniciais, de caráter exploratório, de avaliação do comportamento de ligações coladas associadas a elementos mecânicos adicionais de pinos.

No Anexo B encontram-se as tabelas e gráficos dos resultados obtidos nos ensaios de avaliação das resistências e das rigidezes de ligações coladas paralelas.

No Anexo C encontram-se as tabelas e gráficos dos resultados obtidos nos ensaios de avaliação das resistências e das rigidezes de ligações coladas normais.

No Anexo D estão as tabelas e gráficos dos resultados obtidos nos ensaios de avaliação das resistências e das rigidezes de ligações paralelas e normais com emprego apenas de elementos mecânicos.

No Anexo E apresentam-se os resultados das análises estatísticas de resistência e rigidez das ligações.

No Apêndice A tem-se um resumo das recomendações definidas na norma brasileira de “Projeto de estruturas de madeira”, NBR 7190, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT (1997), relativas aos métodos de ensaio para determinação de propriedades da madeira para projeto de estruturas e de resistências de ligações mecânicas das estruturas de madeira.

No Apêndice B apresenta-se a formulação original da equação diferencial de governo das tensões cisalhantes em ligações com três peças coladas lateralmente e comportamento puramente elástico. Apresenta-se também a obtenção da expressão das tensões cisalhantes e da força de fratura estimada, em função da energia de deformação e resistência da junta adesiva na fratura e de parâmetros de rigidez dos componentes da ligação.

2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Avaliação do Comportamento das Estruturas de Madeira

O comportamento resistente da madeira é geralmente considerado usualmente de forma simplificada no âmbito da linearidade elástica, com base na Resistência dos Materiais para elementos de barra ou da Mecânica do Contínuo. No entanto, o comportamento real da madeira, em uma análise mais refinada, é bastante complexo, em função da variabilidade própria inerente ao material, à disposição, geometria e composição dos elementos anatômicos presentes na sua constituição, que lhe conferem características de anisotropia. Em normas de projetos de estruturas de madeira é comum o emprego de formulações semi-empíricas, como alternativas às considerações teóricas desses comportamentos complexos.

As árvores que dão origem às madeiras constituem-se em seres vivos cuja formação sofre as influências de vários fatores, que vão desde a espécie e origem genética até as condições de crescimento, como clima, propriedades do solo, disponibilidade de água, densidade de povoamento e tratos silviculturais. Tais fatores podem produzir grandes

variações dos elementos anatômicos na madeira mesmo para uma determinada espécie, refletindo-se em suas propriedades físicas e características de resistência mecânica. Em madeira proveniente de uma mesma árvore podem ocorrer variações significativas ao longo do comprimento do tronco e, principalmente, da medula à casca (OLIVEIRA, 1997).

A madeira é um material fibroso de origem orgânica, sendo as fibras formadas por células alongadas vazadas que apresentam orientação preferencial no sentido longitudinal, definido pelo eixo vertical da árvore de origem. Em um corte transversal de um tronco de árvore, pode-se notar que o crescimento da árvore se dá em forma de anéis concêntricos formados anualmente, ditos anéis de crescimento, podendo-se definir as direções principais de constituição anatômica da madeira: L, longitudinal ou paralela às fibras da madeira; R, radial aos anéis de crescimento e T, tangencial aos anéis de crescimento.

Na formulação de um modelo macroscópico realista para a madeira, que permita avaliar seu comportamento elástico, sua resistência mecânica e os possíveis modos de ruptura, é necessário que sejam consideradas a constituição dos componentes que formam as paredes dos elementos celulares e suas características anisotrópicas, inerentes à disposição destes elementos. No entanto, devido à complexa estrutura organizacional, às características geométricas e à elevada variabilidade dos elementos anatômicos, ocorre uma enorme dificuldade para definir um modelo matemático que possa representar com perfeição o comportamento mecânico da madeira.

Para uma análise simplificada, mas criteriosa, dos mecanismos resistentes do comportamento estrutural da madeira, visando a interpretação de como se manifestam os processos de rupturas e que conduzam a definições de critérios adequados de dimensionamento, é necessário o entendimento de sua estrutura microscópica e uma análise dos resultados obtidos em ensaios experimentais específicos da aplicação pretendida. Assim, uma caracterização adequada para aplicações práticas não-elementares só é possível no sentido estatístico, a partir da realização de ensaios experimentais e para lotes razoavelmente homogêneos de madeira.

Embora apresente em nível microscópico uma anisotropia mais geral, devido à complexa estrutura de seus elementos anatômicos, a madeira pode, para uma análise macroscópica de seu conjunto, ser considerada um material de propriedades direcionais ortotrópico, em relação aos eixos principais L, R e T.

Nos casos de existências de anomalias na sua constituição, provenientes da fase de crescimento ou de operações de produção do material (abate, desdobro, serragem e secagem), as interpretações dos possíveis comportamentos associados às aplicações estruturais passam a ter caráter específico que dificultam a generalização e, conseqüentemente, a definição de critérios abrangentes de dimensionamento.

2.2 Organização e Constituição dos Elementos Anatômicos da Madeira

Os anéis de crescimento registram a idade da árvore, refletindo também as condições de desenvolvimento da árvore. Em cada anel acrescentado anualmente podem ser distinguidas, muitas vezes de forma nítida, duas partes: uma de cor clara, com células largas de paredes finas, formada durante a primavera e o verão, e outra, de cor escura, com células estreitas de paredes grossas, formada no outono-inverno. A primeira é chamada de lenho inicial, e a segunda, lenho tardio (BODIG e JAYNE, 1982).

Os anéis de crescimento anuais são largos e poucos distintos em essências tropicais de crescimento rápido, apertados e bem configurados nas espécies oriundas de zonas temperadas ou frias. Nas madeiras de clima tropical, a distinção entre o lenho inicial e o lenho tardio é usualmente mais reduzida.

A madeira é formada por diferentes elementos celulares e extrativos, sendo as propriedades físicas e mecânicas da madeira definidas principalmente pela composição da parede celular (BODIG e JAYNE, 1982; MARK, 1987). Além da água que pode estar contida na madeira, a parede dos elementos celulares é formada por holocelulose (celulose + hemicelulose) e lignina. O espaço vazio das células pode estar preenchido por extrativos, que podem influenciar as propriedades físicas do material.

As árvores produtoras de madeira são classificadas em dois grupos vegetais, designados de gimnospermas e angiospermas. O primeiro grupo inclui uma grande parte das árvores de florestas temperadas de ambos os hemisférios, denominadas de coníferas, tendo como principal característica a maior homogeneidade de suas madeiras, decorrente do reduzido número de tipos de células do tecido lenhoso. O grupo das angiospermas predomina nas florestas tropicais, sendo dividido em duas classes, destacando-se as árvores dicotiledôneas como as principais produtoras de madeira, tendo como característica o maior número de tipos de células, resultando em uma estrutura anatômica de maior complexidade (OLIVEIRA, 1997).

A madeira das coníferas é formada por células longitudinais e células radiais chamadas, respectivamente, de traqueídeos e de parênquimas, apresentando também canais de resina. O tipo celular dominante é o traqueídeo, sendo uma célula alongada fechada e afilada nas extremidades, de seção transversal quadrada ou retangular, chegando a constituir até 95% da madeira das coníferas. As células radiais (parênquimas) são alongadas, de diâmetro maior que os traqueídeos e posicionam-se horizontalmente, no sentido da casca para a medula.

A madeira das dicotiledôneas é formada por fibras, vasos, raios e células parênquimas. A maior parte da madeira é constituída de fibras, que são células longas de paredes relativamente grossas e afiladas em suas extremidades, apresentando restrito espaço vazio interno. Os vasos são células alongadas, fechadas no início de sua formação e com posterior dissolução das paredes formando um duto contínuo. Os vasos, em cortes transversais do tronco, aparecem como se fossem poros, apresentando grandes espaços vazios internos.

Na TAB. 2.1, apresentam-se as relações volumétricas entre os elementos anatômicos presentes na madeira e as dimensões das células mais importantes que formam o tecido lenhoso.

TABELA 2.1 - Características Geométricas dos Elementos Anatômicos da Madeira.

Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

Característica	Unid.	Conífera		Dicotiledônea		
		Traqueídeo	Parênquima	Fibra	Vaso	Parênquima
Volume	(%)	85-95	5-12	37-70	6-55	10-32
Dimensões						
Longitudinal (L)	(mm)	2,5-7,0	-	0,6-2,3	0,2-1,3	-
Tangente (T)	(\hat{t} mm)	25-80	-	10-30	20-500	-
Raio médio (R)	(\hat{r} mm)	17-60	-	10-30	20-350	-
Espessura da parede	(\hat{e} mm)	2-7	-	1-11	-	-
L/T		45-105	-	40-100	0,5-4,5	-
L/R		60-135	-	40-100	1-45	-

2.3 Composição Química, Estrutura Organizacional e Características Elásticas das Paredes Celulares

2.3.1 Composição Química da Parede Celular

A parede celular é formada por três componentes principais, de origem polimérica: celulose (40 a 45%), hemiceluloses (20 a 30%) e lignina (18 a 25% em folhosas, 25 a 35% em coníferas). Segundo SEABRIGHT¹, apud OLIVEIRA (1997), as árvores de clima temperado possuem em geral altas proporções destes componentes, podendo alcançar até 98% de sua composição química, enquanto nas árvores tropicais que possuem uma maior quantidade de outras substâncias orgânicas e inorgânicas (extrativos) a porcentagem pode ser reduzida até 90%.

¹ SEABRIGHT, D. Wood chemistry – the essential ingredients. *Asian Timber*, v.14, n.7, p.33-34, 1995.

2.3.2 Celulose

Segundo BODIG e JAYNE (1982) e OLIVEIRA (1997), a celulose constitui-se no principal componente estrutural da madeira, formando um polímero de cadeia linear de unidades de glucose, não-ramificada, empacotado em regiões cristalinas, em grande parte de seu comprimento. Apresenta-se em forma de microfibrilas, que são feixes de 50 a 80 células de celulose, de dimensões não precisamente determinadas, admitindo-se dimensões transversais da ordem de 3,5 nm a 10 nm, dispostas de forma variável ao longo da espessura da parede. Esta formação microfibrilar cristalina da celulose é consequência de pontes de hidrogênio existentes entre cadeias de celulose adjacentes. As forças laterais que mantêm os cristalinos juntos internamente são as responsáveis por diversas características estruturais importantes da cadeia de celulose.

Segundo MARK (1967), um cristalito de celulose perfeito é impermeável à água, solventes aquosos podem ser adsorvidos somente nas superfícies externas, entre as microfibrilas, ou sobre as hemiceluloses associadas, caso a proteção de lignina seja removida. Além disso, apresentam restrições para grandes deformações plásticas, pois as forças intermoleculares de atração dificultam movimentos relativos extensos. Os espaços entre as microfibrilas são preenchidos por hemicelulose, lignina e, complementarmente, pela água em quantidade variável, que desempenha também uma importante função junto à parede celular.

2.3.3 Hemicelulose

As hemiceluloses constituem-se em polímeros de baixo peso molecular, com cerca de 30% da massa total da parede celular, sendo considerada uma celulose modificada na forma de uma substância amorfa, fortemente associadas à celulose, e que se associa mais facilmente à lignina, apresentando diferentes componentes ou substâncias nos vegetais fibrosos em geral e nas madeiras de coníferas e dicotiledôneas em particular.

A madeira, mesmo em seu estado natural, pode ser considerada um compósito (MARK, 1967; BODIG e JAYNE 1982; SZÜCS 1995). As hemiceluloses atuam como matriz na

parede celular onde estão imersas as cadeias de celulose, constituindo-se no mais higroscópico dos componentes primários da parede celular da madeira (OLIVEIRA, 1997).

2.3.4 Lignina

A lignina é considerada a parcela isotrópica de preenchimento da matriz, servindo como material incrustante em torno das microfibrilas. É definida como um polímero fenólico disposto de forma não-ordenada, configurando-se uma substância amorfa, impermeável, pouco elástica, de boa resistência mecânica e insensível à umidade e temperaturas usuais, conferindo considerável rigidez à parede celular (OLIVEIRA, 1997).

2.3.5 Estrutura organizacional nas células dos elementos anatômicos

Segundo BODIG e JAYNE (1982), a estrutura organizacional dos componentes químicos varia para os diferentes tipos de células: traqueídeos, fibras, vasos, células parenquimáticas. No entanto, em todos os tipos de células, as microfibrilas, a hemicelulose e a lignina organizam-se em lamelas ou lâminas.

A lamela média (M) é situada no contorno da célula, tendo a função de colar as células umas às outras, sendo constituída principalmente de lignina. Em seguida tem-se a parede primária (P) que é formada completamente na fase de inicial de crescimento e de definição do tamanho da célula. A parede primária possui uma espessura muito fina, usualmente inferior a 0,1 μm , com reduzida contribuição ao comportamento físico do compósito. A parede primária, em conjunto com a lamela média, forma a camada (M+P), freqüentemente considerada uma única entidade. Após a formação da parte primária, a parede vai tornando-se espessa com a formação da parede secundária, que por sua vez é constituída pelas camadas S1, S2 e S3. A camada S2 é a mais espessa das três, com dimensão média da ordem de 2 μm , cujo valor mais preciso depende do posicionamento do traqueídeo no anel de crescimento. Finalmente, tem-se em geral uma camada rugosa no limite do lume da célula.

Segundo OLIVEIRA (1977), o processo de lignificação da parede celular se dá quando se encerra a fase de alargamento da parede secundária, com início nos cantos da célula, antes da formação da parede secundária, continuando com a lignificação da lamela média e da parede primária. Com a formação da parede secundária, o seu acúmulo segue de forma gradual para as camadas S1 e S2, atingindo até a camada S3. Na FIG. 2.1, tem-se a distribuição dos constituintes químicos em células de traqueídeos.

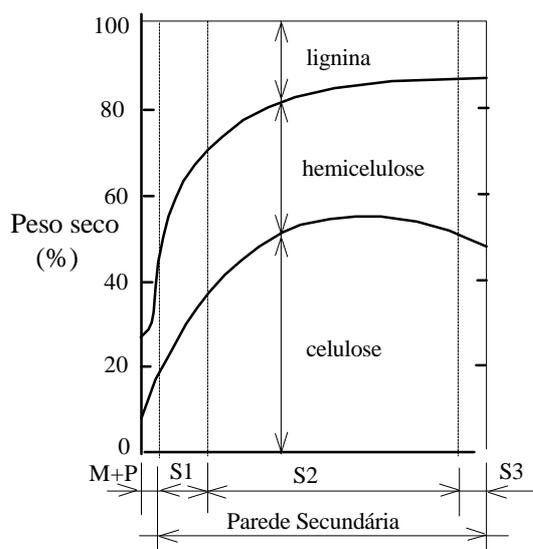


FIGURA 2.1 – Distribuição dos Constituintes Químicos ao Longo das Camadas da Parede de Célula de Traqueídeo. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

A organização dos elementos celulares principais de madeiras de árvores dicotiledôneas é similar a que ocorre nos traqueídeos, embora as espessuras das camadas possam variar consideravelmente para os três tipos de células: fibras, vasos e raios medulares.

Deve-se observar que as microfibrilas apresentam diferentes arranjos direcionais nas diversas camadas que formam as células da madeira. Na camada S2, de maior dimensão, as microfibrilas apresentam direção predominante próxima à direção longitudinal da madeira. Na TAB 2.2, apresentam-se algumas características importantes da parede celular de traqueídeos, relacionadas à dimensão relativa de cada camada e ao ângulo das microfibrilas. Na FIG. 2.2 apresenta-se um modelo esquemático representativo da célula de traqueídeos.

TABELA 2.2 – Algumas Propriedades da Parede Celular. Fonte:
WANGAARD², apud BODIG e JAYNE (1982).

Camada da parede	Espessura relativa (%)	Ângulo médio das microfibrilas (graus)
M-P	~1	Aleatório
S1	8-10	50-70
S2	70-90	10-30
S3	2-8	60-90

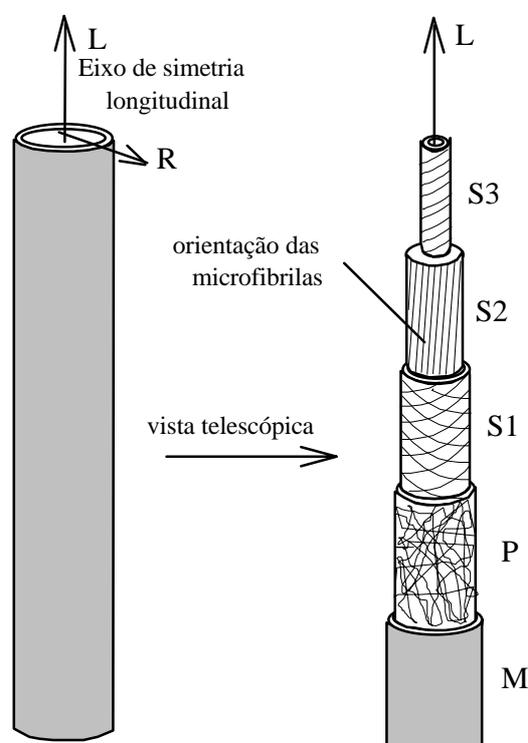


FIGURA 2.2 – Modelo para a Parede Celular de Uma Célula de Traqueídeo,
Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

Além dos componentes anteriormente descritos, as células apresentam também pontuações, que são pequenas aberturas na parede com função de permitir o fluxo de nutriente entre as células na fase de formação da madeira. A existência das aberturas modifica a orientação das microfibrilas na vizinhança destas pontuações.

² WANGAARD, F.F. *The Mechanical Properties of Wood*. New York: Jonh Wiley & Sons, 1950.

As propriedades físicas e características de resistência mecânica da madeira dependem da constituição destes componentes, principalmente pela camada S2 da parede secundária que representa a parte mais espessa da parede, além do tipo e da direção da solicitação atuante. Uma avaliação da resistência da madeira a partir da análise das características das camadas das paredes celulares é um trabalho complexo, embora possa fornecer um modelo que permita entender de forma mais consistente o processo de ruptura das células que formam a madeira.

YOJO e WATAI (1998) apresentam, com base no trabalho de MARK (1967), um estudo do comportamento dos componentes da parede celular, incluindo a definição dos valores das propriedades elásticas, agrupados em cadeia de celulose que formam as microfibrilas e da matriz formada pela lignina, sendo a cadeia de celulose considerada um material ortotrópico, com simetria isotrópica no plano normal ao eixo principal da cadeia de polímeros. Com base nestes valores, é possível avaliar as características elásticas das camadas M+P, S1, S2 e S3 por meio das equações de determinação das propriedades elásticas de materiais compósitos. A partir da identificação dos valores médios das dimensões e das propriedades das diferentes camadas para uma madeira específica, é possível avaliar as características elásticas da parede como um todo, considerando-a um elemento cilíndrico vazado e emprego da mudança de base do tensor de constantes elásticas de cada camada nas direções dos eixos principais da célula.

Na avaliação de uma célula isoladamente obtém-se um comportamento anisotrópico, com o eixo central de simetria geométrica não sendo de simetria para as direções dominantes das microfibrilas nas diferentes camadas. Esta constituição é a responsável pela torção da célula em torno de seu eixo nos ensaios de tração axial. No entanto, para o conjunto de células anisotrópicas que forma a madeira, como umas são coladas às outras, o torcimento é impedido por tensões de cisalhamento oriundas entre as camadas M+P, fazendo com que a resistência mecânica da madeira, diferentemente de uma célula isolada, dependa, além da parede secundária, da camada M+P. Em MARK (1967) são apresentados diversos mecanismos de ruptura possíveis em nível molecular, sendo possível verificar que todas as quatro camadas são importantes na resistência da célula, quando as tensões são calculadas na parede celular.

2.4 Principais Propriedades Físicas da Madeira

2.4.1 Introdução

As principais propriedades físicas da madeira para aplicações tecnológicas são a densidade ou massa específica, o teor de umidade e a retratilidade. A densidade ou massa específica da madeira é definida pela relação entre a massa e o volume de um elemento ou corpo-de-prova. O teor de umidade está relacionado à quantidade de água contida na madeira, sendo definida usualmente pela porcentagem da massa da água em relação à massa seca da madeira. A retratilidade está relacionada à instabilidade dimensional da madeira, que por sua vez está associada à variação da água de impregnação das paredes celulares do tecido lenhoso.

2.4.2 Umidade

A madeira é um material poroso e higroscópico, tendo a propriedade de perder ou absorver água. A quantidade de água contida na madeira, definida pelo seu teor de umidade, é um dos principais fatores que afetam suas resistências mecânicas, sendo seu controle de grande importância para a preservação da madeira contra o ataque de fungos causadores do apodrecimento da madeira. Além disso, a variação da quantidade de água da madeira, quando situada dentro de certos limites, é acompanhada de alterações nas dimensões da madeira, que podem acarretar alguns dos defeitos mais comuns encontrados em peças de madeira.

2.4.3 - Densidade

A densidade ou massa específica é definida como a quantidade de massa contida na unidade de volume, exprimindo a concentração do tecido lenhoso da madeira. Devido ao caráter higroscópico da madeira, é referida a um determinado teor de umidade. Segundo SZÜCS (1992a) e OLIVEIRA (1977), a densidade aparente é extremamente variável de espécie para espécie, além de variar de árvore para árvore e, até mesmo, dentro de uma determinada árvore, em função da posição no lenho ocupada pela

amostra. São consideradas madeiras densas as provenientes de árvores coníferas com massa específica superior a $0,7 \text{ g/cm}^3$ e de folhosas superiores a $0,8 \text{ g/cm}^3$.

Segundo HELLMMEISTER (1983), a densidade da madeira varia em função da espécie e das condições edafoclimáticas de crescimento da árvore de origem, ocorrendo variações em função do posicionamento do corpo-de-prova no tronco da árvore, ocorrendo valores de $0,30$ até $1,20 \text{ g/cm}^3$.

A densidade da madeira é uma de suas propriedades mais significativas, estando diretamente relacionada à retratilidade, às resistências mecânicas da madeira e a uma maior dificuldade de secagem, existindo numerosos trabalhos, de diferentes autores, sobre as correlações existentes entre a densidade da madeira e suas características de rigidez e resistência mecânica.

SZÜCS (1992a) apresenta uma análise comparativa da variação do módulo de elasticidade da madeira em função da densidade, utilizando uma regressão linear de resultados experimentais de 217 lâminas preparadas para a composição de vigas de madeira laminada e expressões de inter-relações definidas respectivamente por BODIG e JAYNE (1982); KOLLMANN³; CÔTÉ e GUITARD⁴. A madeira utilizada foi uma conífera de nome *Picea abies*, considerada em equilíbrio com o ar atmosférico e umidade em torno de 12%. Concluiu que as expressões que definem a inter-relação de um modo generalizado, como as definidas pelos dois últimos autores citados, apresentam um risco de se afastarem dos valores de uma determinada amostragem específica. Concluiu também pela perfeita concordância da regressão linear obtida dos resultados experimentais com a expressão sugerida por BODIG e JAYNE (1982), que utiliza os valores médios que caracterizam determinada madeira, para prever os valores desta mesma madeira para uma dada densidade.

³ KOLLMANN, F.F.P; CÔTÉ Jr., W. A. *Principles of Wood Science and Technology*. New York: Springer – Verlag, 1968. volume 1.

⁴ GUITARD, D. *Mécanique du Matériau Bois et Composites*. Toulouse: Editions CEPADEUS, 1987.

MELO e SIQUEIRA (1992) apresentam uma análise da correlação entre diversas propriedades físicas e resistências mecânicas de 152 espécies da Amazônia. A análise utiliza regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, com ajustes para curvas de potência e exponencial, definidas a partir dos valores médios obtidos de ensaios de cerca de seis corpos-de-prova de cada espécie. Foram analisadas as seguintes propriedades e resistências: densidade básica, densidade verde, contrações radial, tangencial e volumétrica, tensão de ruptura e módulo de elasticidade na flexão, tensão de ruptura na compressão paralela, tensão no limite proporcional na compressão normal, dureza Janka, tensão de ruptura no cisalhamento paralelo e tensão de ruptura na tração normal. Os autores apresentam, para cada par de propriedades ou resistências avaliadas, a equação e o correspondente coeficiente das correlações obtidas, concluindo pela existência de alta correlação entre as propriedades mecânicas e entre essas propriedades com a densidade básica e densidade verde.

2.5 Resistências Mecânicas e Modos de Rupturas de Peças de Madeira

2.5.1 Introdução

Devido à complexidade da constituição química e anatômica da madeira, ainda não se estabeleceu uma teoria unificada que possibilite uma avaliação precisa do comportamento resistente da madeira, nas diferentes condições de solicitações possíveis, até mesmo para peças de madeira consideradas sem defeitos. Devido à ortotropia aproximada do tecido lenhoso, a resistência mecânica e os modos de ruptura de peças de madeira dependem do tipo, do sinal e da direção do esforço solicitante em relação às direções principais da madeira.

De modo geral, a ruptura implica a ocorrência de uma desagregação do material por secção, separação, esmagamento, flambagem ou deslizamento dos elementos anatômicos, fenômeno no qual fica definida a resistência do material dada pela correspondente tensão de ruptura ou tensão máxima resistida pelo mesmo.

Parte dos modos de ruptura da madeira ocorre de forma frágil, com deformações reduzidas, como na tração normal às fibras e, principalmente na tração e no cisalhamento paralelos às fibras. Na compressão paralela ocorrem rupturas com comportamento plástico próximo à ruptura. Na compressão normal às fibras ocorre em geral um processo de ruptura dúctil, com as deformações aumentando indefinidamente para acréscimos de cargas. Neste caso, resistência efetiva corresponde a uma tensão na qual as deformações fiquem limitadas.

Os modos de ruptura a seguir descritos estão relatados em BODIG e JAYNE (1982), ALMEIDA (1992a). Esse último autor cita a existência de superfícies preferenciais de ruptura para sollicitações tangenciais, definidas pelos contornos dos anéis de crescimento e nos planos paralelos e adjacentes aos elementos anatômicos radiais.

2.5.2 – Tração Paralela às Fibras

Os tipos de ruptura mais comuns, em peças de madeira submetidas à tração paralela às fibras, são representados na FIG. 2.3: (a) por tração com superfície de separação lascada ou dentada, (b) por tração associada ao cisalhamento, (c) por cisalhamento com superfície de separação inclinada e (d) por tração com superfície de separação normal ao eixo da peça.

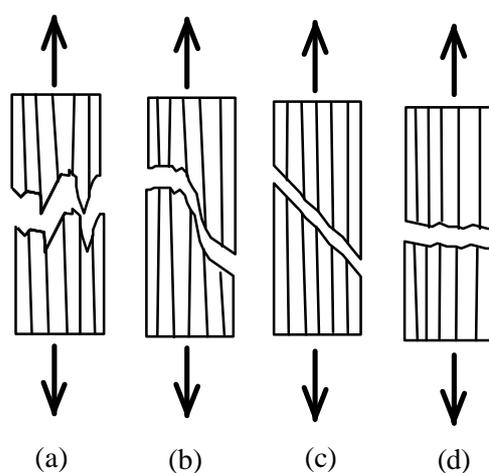


FIGURA 2.3 – Modos de Ruptura de Peças de Madeira na Tração Paralela às Fibras.

Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

Segundo BODIG e JAYNE (1982), a ruptura na tração paralela em madeira de coníferas se inicia no lenho tardio, parcela mais rígida do tecido lenhoso, ocorrendo uma combinação de ruptura por tração e cisalhamento, com desligamento das extremidades dos traqueídeos. Na progressão da ruptura, ocorre o rompimento dos traqueídeos do lenho inicial, porém em seções afastadas das extremidades, conforme representado na FIG. 2.4. Estas rupturas celulares apresentam formas complexas, refletindo a orientação diferenciada das microfibrilas ao longo das paredes celulares.

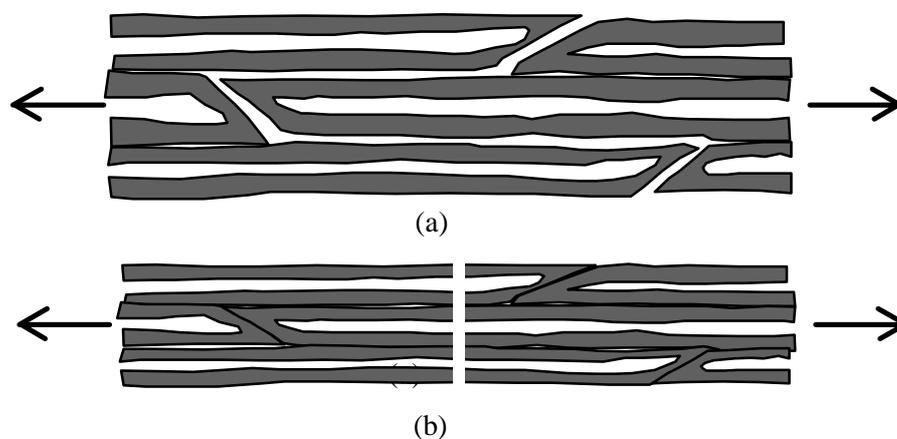


FIGURA 2.4 – Modos de Rupturas Típicas de Traqueídeos sob Tração: a) Em Paredes Espessas de Lenho Tardio; b) Em Paredes Finas de Lenho Inicial. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

2.5.3 – Compressão Paralela às Fibras

Em peças curtas de madeira submetidas à compressão paralela às fibras, os modos de ruptura mais comuns são os representados na FIG. 2.5: a) por esmagamento, com superfície de ruptura paralela às faces carregadas; b) por cisalhamento em cunha, com superfície de ruptura em y; c) por cisalhamento, com superfície de ruptura fortemente inclinada em relação às faces da peça; d) por fendilhamento, com superfície de ruptura levemente inclinada em relação ao eixo da peça; e) por esmagamento e cisalhamento combinados, com a superfície formada por dois trechos paralelos às faces carregadas e um terceiro trecho levemente inclinado em relação ao eixo da peça; f) por fibrilação ou rolamento terminal das fibras.

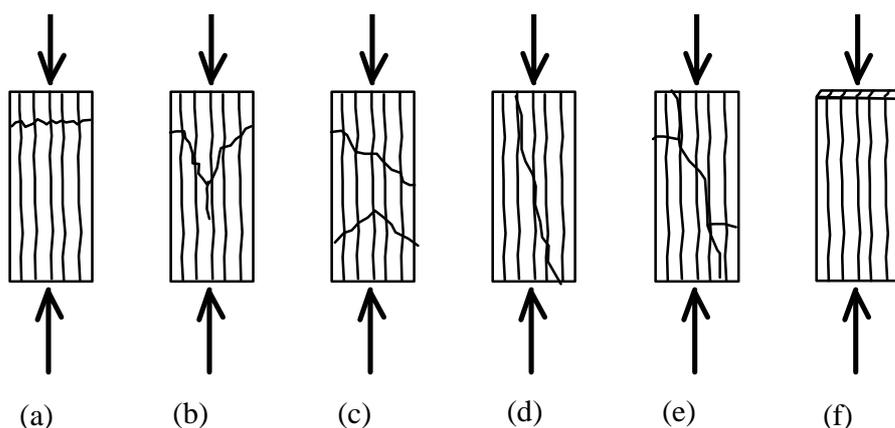


FIGURA 2.5 – Modos de Ruptura na Compressão Paralela às Fibras. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

2.5.4 – Compressão Normal às Fibras

A resistência da madeira à compressão normal é significativamente menor do que à compressão paralela, com valor e modo de ruptura dependentes da proporção carregada da superfície da peça ensaiada e da orientação dos anéis de crescimento. Segundo BODIG e JAYNE (1982) e ALMEIDA (1992a), para solicitações na direção radial ou tangencial ocorre uma compactação do material, com mobilização de grandes deformações. A resistência obtida em ensaios é função de um limite imposto à deformação total ou à deformação plástica.

Devido à constituição e orientação das células presentes no tecido lenhoso, o comportamento da madeira na compressão normal pode ser influenciado pela direção dos anéis de crescimento. A existência das células radiais pode conduzir a uma maior rigidez e resistência para elementos solicitados transversalmente a esta direção. No entanto, devido às diferenças anatômicas existentes na madeira do lenho inicial e do lenho tardio, a madeira solicitada por compressão normal às fibras na direção tangencial aos anéis de crescimento pode apresentar um comportamento mais uniforme, com maior rigidez e resistência. Esta diferenciação é mais acentuada em coníferas de clima temperado, do que em folhosas de regiões tropicais ou semitropicais.

Em ensaios de corpos-de-prova com as superfícies dos anéis de crescimento dispostos inclinados em relação à direção de carregamento, ocorrem rupturas frágeis e eventualmente explosivas, por efeito das componentes de tensões cisalhantes. Na FIG. 2.6b. são representados os diferentes modos de ruptura na compressão normal, definidos por: a) por esmagamento na região no lenho inicial, com carga normal aos anéis de crescimento; b) por cisalhamento na região do lenho inicial, para carga aplicada em plano inclinado em relação aos anéis; c) por esmagamento atravessando os anéis de crescimento, para carga aplicada paralelamente aos anéis.

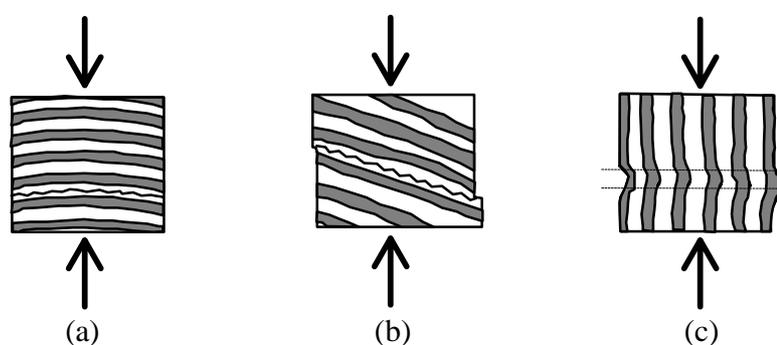


FIGURA 2.6 – Modos de Ruptura na Compressão Normal. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

GEHRI (1998) relata o emprego de elementos de pinos, como barras e parafusos rosqueados, para reforço de áreas localizadas submetidas à compressão normal, visando um aumento da capacidade de carga, redução da área carregada necessária e aumento da rigidez, obtendo experimentalmente um ganho de 100% na resistência e de 200% na rigidez de um elemento de MLC, com madeira de “spruce” e dimensões de 100 x 100 x 185 mm, reforçado com emprego de 2 x 4 parafusos de 7,5 x 152 mm.

Os ensaios normalizados empregam usualmente corpos-de-prova sob tensões uniformes com carregamento em toda área das faces, condição raramente encontrada na prática. Segundo o autor, ocorre uma influência negativa do aumento da altura do corpo-de-prova na resistência à compressão normal. Nos casos práticos como as forças são aplicadas, em geral, apenas ao longo de uma parte do comprimento total das peças, a contribuição das partes adjacentes à área carregada produz uma maior rigidez e capacidade resistente.

O mesmo autor sugere ainda estimar a força resistente ou capacidade de carga efetiva (F_N^e) de uma peça de madeira carregada transversalmente com emprego da expressão:

$$F_N^e = F_N + F_a = b \cdot f_{cn} \cdot L_{ef} \quad (2.1)$$

Onde F_N é a capacidade de carga ou força resistente da área carregada, de valor igual à obtida em ensaios padronizados, mantendo-se o mesmo nível de deformação correspondente à resistência convencional f_{cn} . F_a é a resistência adicional devido à contribuição das áreas adjacentes à área carregada. L_{ef} é o comprimento efetivo função do comprimento L da carga, da altura h e das condições ou tipo de carregamento. Com base em resultados experimentais o referido autor propõe para o comprimento efetivo, em função das condições de carregamento apresentadas na FIG. 2.7 e para $a \geq 0,75 h$, as seguintes expressões:

$$\text{Caso (a): } L_{ef} = L + \frac{h}{3} \leq 4.L \quad (2.2a)$$

$$\text{Caso (b): } L_{ef} = L + \frac{h}{8} \leq 2,5.L \quad (2.2b)$$

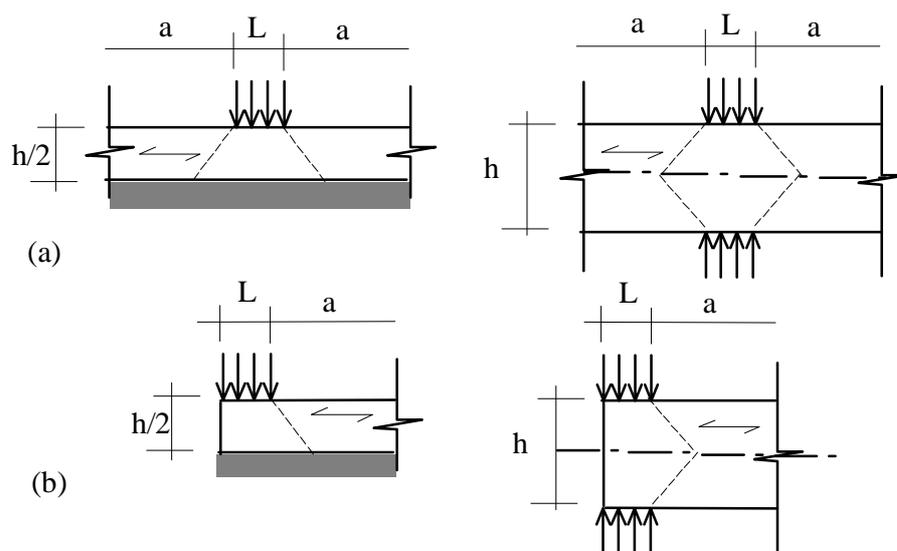


FIGURA 2.7 – Geometria de Carregamentos Usuais de Peças de Madeira Solicitadas por Compressão Normal às Fibras: a) Em Partes Centrais; b) Nas Extremidades. Fonte:

GEHRI (1998)

2.5.5 – Tração Normal às Fibras

Para solicitações de tração normal às fibras, a resistência da madeira é reduzida e as rupturas se dão com caráter eminentemente frágil nas seções de menor resistência. Na FIG. 2.8 são representados os diferentes modos de ruptura, definidos por: a) por tração pura na região do lenho inicial; b) por tração associada ao cisalhamento no lenho inicial, com superfície de ruptura inclinada; c) por tração paralela aos planos radiais, com superfície de ruptura normal aos anéis.

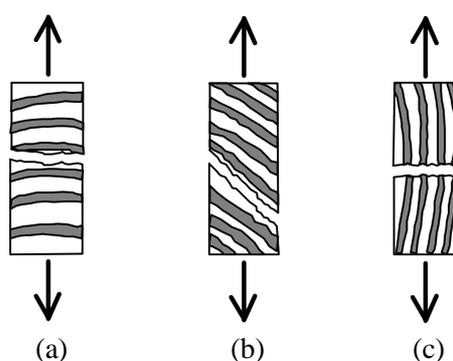


FIGURA 2.8 – Rupturas em Ensaio de Tração Normal às Fibras. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

Embora esta resistência não possa ser utilizada diretamente para fins estruturais, sua avaliação pode ser importante em aplicações onde possam ocorrer como esforços secundários, como em certas ligações de peças estruturais e devido ao efeito de Poisson, em peças comprimidas reforçadas transversalmente com pinos.

A resistência para solicitações na direção tangencial, paralela aos anéis de crescimento, deveria, teoricamente, ser menor do que a resistência para solicitações atuando na direção radial, transversal aos anéis de crescimento, em virtude da existência de elementos anatômicos (raios medulares) nas direções radiais. TANAAMI e LAHR (1995), em ensaios realizados em corpos-de-prova de quatro espécies de madeira, sendo duas coníferas e duas de dicotiledôneas, concluíram com base nos resultados obtidos e na análise estatística efetuada que não há interferência da posição dos anéis de crescimento nos valores da resistência à tração normal.

2.5.6 – Esforços Inclinados em Relação às Fibras

O comportamento mecânico da madeira é fortemente influenciado pela direção das solicitações em relação às fibras, em termos de resistência, rigidez e processo de ruptura. Para avaliação da resistência da madeira submetida a esforços normais inclinados em relação às fibras, têm sido utilizadas expressões semi-empíricas, com precisão de resultados razoável. Entre estas expressões, destaca-se a expressão de HANKINSON⁵, apud BODIG e JAYNE (1982). Nesta expressão, a resistência inclinada é definida a partir das correspondentes resistências, paralela e normal às fibras, na forma:

$$f_{\theta} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \text{sen}^n(\theta) + f_{90} \cdot \text{cos}^n(\theta)} \quad (2.03)$$

Onde f_0 é a resistência paralela às fibras; f_{90} é a resistência normal às fibras e f_{θ} é a resistência inclinada de um ângulo θ em relação às fibras. Na FIG. 2.9 são apresentadas curvas para a resistência estimada inclinada em relação às fibras, obtidas com $n = 2$, $n = 1,5$ e $n = 2,5$ e considerando-se $f_0 = 40$ MPa e $f_{90} = 12$ MPa.

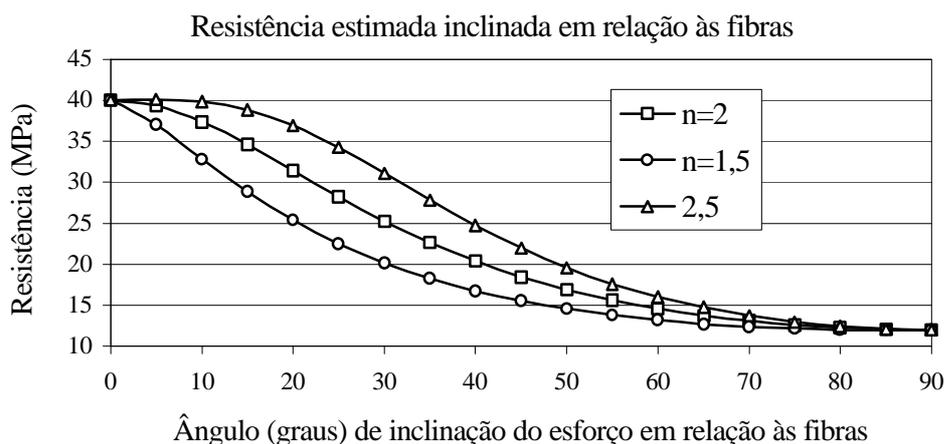


FIGURA 2.9 – Resistência Estimada pela Expressão de Hankinson, em Função do Ângulo de Inclinação do Esforço em Relação às Fibras, para $n = 2$, $1,5$ e $2,5$

⁵ HANKINSON R.L. Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain. *Air Service Information Circular 3* (259), Material Section Paper No. 130, 1921.

A NBR 7190, ABNT (1997), permite ignorar a influência da inclinação das tensões normais em relação às fibras até o ângulo $\theta = 6^\circ$ ($\text{arctg } \theta = 0,10$), sendo a Eq. (2.03) empregada com o expoente $n = 2$.

SZÜCS (1992b) apresenta um estudo comparativo dos resultados da expressão de Hankinson, com a expressão senoidal definida pela Eq. (2.04), proposta pela norma DIN, e com a Eq. (2.05), proposta pelo referido autor com base na decomposição das tensões atuantes segundo o círculo de Mohr, nas direções principais de ortotropia paralela às fibras e normal às fibras.

$$f_{\theta} = f_0 - (f_0 - f_{90}) \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2.04)$$

$$f_{\theta} = f_0 - (f_0 - f_{90}) \cdot \text{sen}^2(\theta) \quad (2.05)$$

Na FIG 2.10 estão representadas as curvas obtidas com essas equações e com emprego da fórmula de Hankinson ($n=2$), para $f_{c0} = 40$ MPa e $f_{c90} = 12$ MPa.

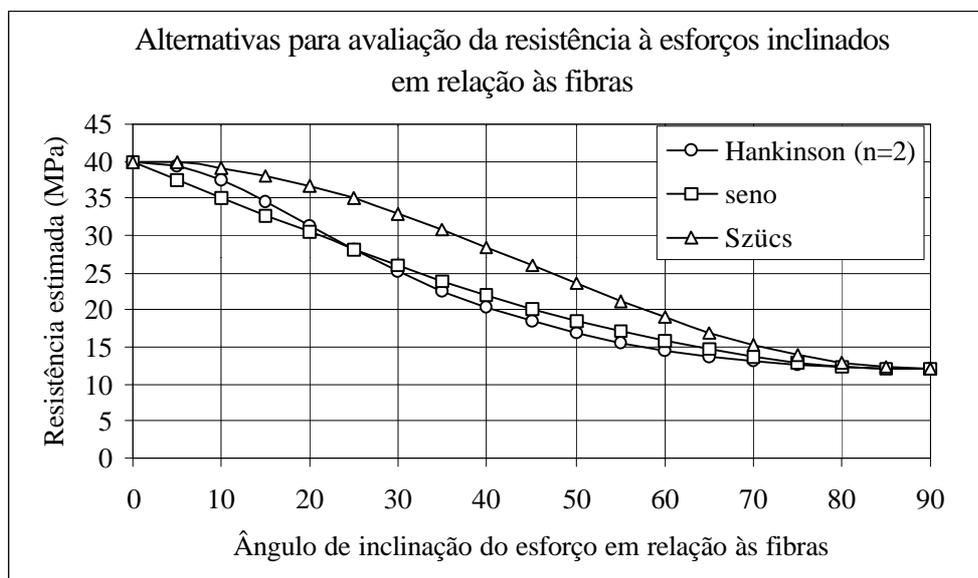


FIGURA 2.10 – Curvas Resultantes de Expressões Alternativas para Estimativa da Resistência à Compressão Inclinada, com $f_{c0} = 40$ MPa e $f_{c90} = 12$ MPa

2.5.7 – Rupturas na Flexão

Nas peças de madeira carregadas transversalmente e submetidas à flexão simples, o tipo de ruptura depende da geometria da viga e da intensidade dos esforços solicitantes. A esbeltez de uma viga fica definida pela relação L/h , sendo L o vão de trabalho e h a altura da seção. Nos casos de vigas esbeltas, com relação L/h elevadas, quando o colapso provocado pela instabilidade lateral pode ser evitado, existe uma tendência de que a ruptura ocorra por efeito da flexão com mobilização de deformações acentuadas. Em peças compactas, com baixa relação L/h , podem ocorrer rupturas por cisalhamento paralelo. No entanto, o processo de ruptura de peças fletidas pode ser fortemente influenciado pela ocorrência de defeitos, em particular quando presentes nas regiões sob esforços de cisalhamento e tração, que produzem rupturas frágeis. Em BODIG e JAYNE (1982), são relatados os casos de ruptura na flexão representados na FIG 2.11, definidos por: (a) a (d) por tração, (e) por compressão, (f) por cisalhamento.

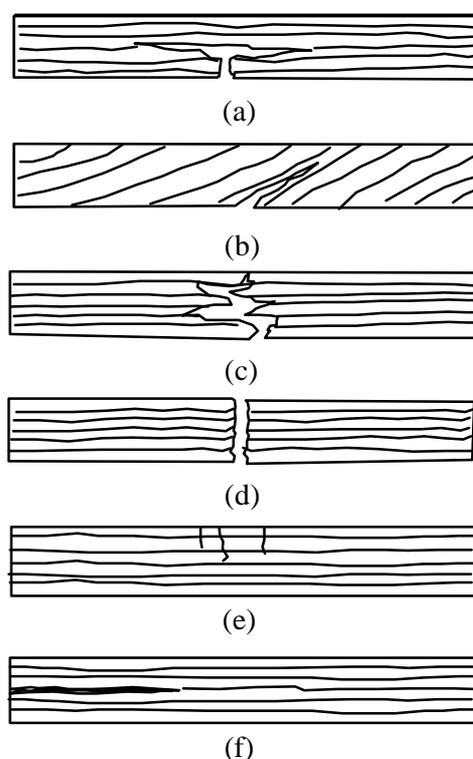


FIGURA 2.11 – Modos de Rupturas na Flexão de Vigas de Madeira. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)

2.5.8 – Rupturas no Cisalhamento

O comportamento na ruptura por cisalhamento é de grande importância em alguns tipos de ligações de peças estruturais de madeira. Este comportamento tem sido estudado no Brasil por meio de realização de ensaios padronizados, com superfície de ruptura paralela às fibras e às direções radial e tangencial. As rupturas ocorrem nas seções mais solicitadas de uma forma frágil, como representado na FIG. 2.12, na superfície tangencial (LT) e na superfície radial (LR).

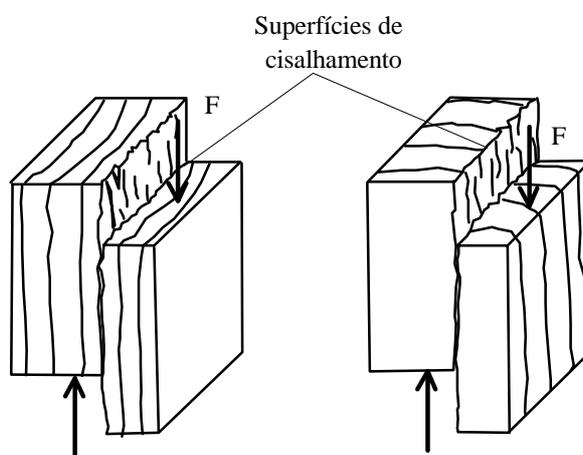


FIGURA 2.12 – Ruptura por Cisalhamento. Fonte: ALMEIDA (1992a)

Na avaliação comparativa da resistência da madeira ao cisalhamento nos planos LR e LT, MENDES (1983), em estudo realizado para cinco espécies folhosas nativas, concluiu com base na análise estatística dos resultados experimentais obtidos, que a resistência no plano LR é menor. Este fato foi atribuído à presença dos raios medulares, que se comportariam como armaduras de costura combatendo o cisalhamento.

A ABNT (1997) recomenda que, na caracterização da resistência ao cisalhamento, o corpo-de-prova deve ser fabricado com o plano da seção crítica paralelo à direção radial da madeira.

2.5.9 – Correlações entre Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

Analisando as correlações existentes entre o peso específico da madeira e diversas propriedades mecânicas da madeira, BODIG e JAYNE (1982) utilizam uma expressão exponencial na forma:

$$Y = a.D^b \quad (2.06)$$

Onde Y é a propriedade mecânica de resistência ou rigidez considerada, D é o peso específico utilizado, a e b são coeficientes que medem a influência da variação do peso específico.

Os coeficientes a e b para diversas propriedades mecânicas são transcritos na TAB. 2.3, com o peso específico obtido de madeira seca em estufa e volume verde e a 12% de umidade. Estes coeficientes foram obtidos da análise estatística de regressão pelos mínimos quadrados, de ensaios experimentais realizados em diferentes espécies, sendo aplicáveis na Eq. (2.06) unicamente para as unidades inglesas indicadas.

Na TAB. 2.4 são apresentados os dados da regressão da avaliação dos parâmetros elásticos (psi) para umidade de 12% e peso específico com volume verde na Eq. (2.06). Os referidos autores sugerem também uma expressão alternativa na forma:

$$Y_1 = Y \left(\frac{D_1}{D} \right)^b \quad (2.07)$$

Onde Y₁ é o valor estimado associado ao valor do peso específico D₁ medido, com Y e b correspondendo a valores conhecidos de uma espécie ou lote de madeira.

TABELA 2.3 – Valores a e b das Relações entre o Peso Específico e as Propriedades Mecânicas. Fonte: MARKWARDT e WILSON⁶, apud BODIG e JAYNE (1982)

Ensaio e Propriedade	Verde		12% de umidade	
	a	b	a	b
Flexão estática				
Tensão no limite de proporcionalidade (psi)	10200	1,25	16700	1,25
Módulo de ruptura (psi)	17600	1,25	25700	1,25
Módulo de elasticidade (10^6 psi)	2,36	1,00	2,80	1,00
Compressão paralela às fibras				
Tensão no limite de proporcionalidade (psi)	5250	1,00	8750	1,00
Módulo de ruptura (psi)	6730	1,00	12200	1,00
Módulo de elasticidade (10^6 psi)	2,91	1,00	3,38	1,00
Compressão normal às fibras				
Tensão no limite de proporcionalidade (psi)	3000	2,25	4630	2,25
Dureza				
Carga paralela às fibras (lb)	3740	2,25	4800	2,25
Carga normal às fibras (lb)	3420	2,25	3770	2,25

MENDES (1983), em estudo realizado com a madeira Peroba-Rosa e metodologia de ensaios do MB-26, ABNT (1940), estabeleceu uma expressão polinomial para avaliar a tensão de ruptura ao cisalhamento, definida por meio da análise estatística de regressão, obtendo uma função linear para o teor de umidade e quadrática para a densidade.

⁶ MARKWARDT, L.J.; WILSON T.R.C. Strength and Related Properties of Wood Grown in the United States. Washington, D.C. *USDA Tech. Bull.* No 479, 1935.

TABELA 2.4 – Dados da Regressão de Avaliação dos Parâmetros Elásticos (Psi) para Umidade de 12% e Peso Específico com Volume Verde. Fonte: BODIG e GOODMAM⁷, apud BODIG e JAYNE (1982)

Y	Grupo de espécies	a	b	Coefficiente de correlação	Coefficiente de variação (%)
E _L	S	7,3544 x 10 ⁶	1,7315	0,898	16,65
	H	3,4196 x 10 ⁶	1,0703	0,933	21,52
E _R	S	3,1485 x 10 ⁵	0,99329	0,729	18,97
	H	3,7078 x 10 ⁵	1,1885	0,965	16,31
E _T	S	2,8666 x 10 ⁵	1,4342	0,783	22,46
	H	2,4055 x 10 ⁵	1,5917	0,988	11,23
G _{LR}	S	2,1881 x 10 ⁵	0,79478	0,543	24,95
	H	2,8253 x 10 ⁵	1,1634	0,947	19,99
G _{LT}	S	1,8466 x 10 ⁵	0,67476	0,477	25,43
	H	2,2218 x 10 ⁵	1,2606	0,947	21,32
G _{RT}	S	4,1156 x 10 ⁴	1,5085	0,550	43,19
	H	8,1395 x 10 ⁴	1,4058	0,915	28,70

MELO e SIQUEIRA (1992) apresentam uma análise das propriedades físicas e mecânicas relativa a 152 espécies de madeira da Amazônia, efetuada pelo Laboratório de Produtos Florestais (LPF-IBAMA). Nesta análise são apresentadas as equações para todos os pares possíveis, obtidas por regressões lineares. Os autores concluem, com base na análise de regressão dos resultados obtidos, que existe alta correlação entre as propriedades mecânicas com a densidade básica e densidade verde. Destacam-se também as boas correlações obtidas entre a dureza Janka e as características mecânicas.

⁷ BODIG, J.; GOODMAM J.R. Prediction of Elastic Parameters for Wood. *Wood Science*, 1973. 5(4): 249-264.

2.6 Utilização de Madeira de Eucalipto em Estruturas

2.6.1 Introdução

Devido às condições edafoclimáticas existentes no Brasil, as florestas plantadas apresentam elevadas taxas de produtividade quando comparadas com as de outros países, conforme pode ser verificado na TAB. 2.5, OLIVEIRA (1997), que considera um paradoxo o fato de um país como a Finlândia, com um período de rotação superior a 100 anos, ter no setor florestal uma das bases de sua economia, enquanto no Brasil esta rotação, para as espécies de crescimento rápido, pode ser considerada de cerca de 20 anos.

TABELA 2.5 – Produtividade Volumétrica de Madeira em Diferentes Países. Fonte: OLIVEIRA (1997)

País	Produtividade (m ³ /ha/ano)
Finlândia	5
Portugal	10
Estados Unidos	15
África do Sul	18
Brasil	25

Embora haja atualmente uma discordância nos números relativos às áreas existentes no Brasil de florestas plantadas, estima-se que esta área seja superior a 4 milhões de ha, com mais de 50% de árvores do gênero *Eucalyptus* e 30% do gênero *Pinus*. Embora os reflorestamentos existentes tenham sido implantados inicialmente com o objetivo de produzir matéria-prima para a indústria de papel e celulose, e de produção de energia via carvão vegetal para a indústria siderúrgica, parte do material destas áreas tem sido usada para a produção de madeira sólida, na forma de painéis ou serrada, devido ao emprego do carvão mineral como agente termorredutor na produção do ferro-gusa, em substituição ao carvão vegetal, e pela necessidade do uso múltiplo da madeira de reflorestamento do setor de celulose (OLIVEIRA, 1997).

Tinha-se no Brasil, no passado não muito distante, a idéia generalizada de que a grande durabilidade natural aos agentes biológicos (fungos e cupins) e a elevada resistência mecânica (em geral associada a madeiras de elevada densidade) seriam as qualidades desejáveis fundamentais da madeira para uso em estruturas. Atualmente nota-se o uso crescente de madeira de densidade não elevada em estrutura, em especial as oriundas de reflorestamentos, devido principalmente aos seguintes fatores:

- Menor desgastes das lâminas, serras e brocas dos equipamentos empregados no processamento (serragem, aplainamento, furação, etc) de madeiras menos densas.
- Busca da racionalização dos processos construtivos por meio da pré-fabricação, que fica facilitada com uso de madeira menos pesada.
- Uso de madeira laminada colada, com fabricação mais facilitada (secagem, aplainamento e prensagem), execução de ligações adesivas mais eficientes e que permite o emprego de madeiras menos resistentes nas regiões menos solicitadas.
- A constatação de que em muitas aplicações há exigências de maiores dimensões das peças por questões estéticas ou arquitetônicas e não-estruturais.
- A usual maior eficiência estrutural na flexão, para peças de mesmo peso, de peças de maiores dimensões de madeira de menor densidade em relação a peças de menores dimensões e maior densidade.
- Desenvolvimento de projetos com soluções técnicas adequadas ao uso da madeira, que garantam condições menos suscetíveis ao ataque de agentes biológicos.
- A utilização de produtos preservativos e manutenção preventiva que garantem grande durabilidade de madeiras sem elevada durabilidade natural.

2.6.2 – A madeira de Eucalipto

A madeira do gênero *Eucalyptus* possui resistências mecânicas variando de média à muito elevada, com um enorme potencial para utilização nos mais variados fins. Entretanto, as madeiras de algumas das espécies do gênero apresentam em relação a algumas propriedades, em função de elevadas retratilidades que possuem, certa dificuldade para usos mais nobres, tais como em movelaria e em acabamentos e esquadrias na construção civil.

Para superar tais dificuldades e desenvolver o mercado de madeira serrada de Eucalipto, torna-se necessário que sejam estabelecidos padrões elevados de qualidade para a matéria-prima que possam ser alcançados por meio de aprimoramento dos processos tecnológicos de produção, que deve se iniciar na melhoria do material genético para implantação de novas florestas e passa pelo aperfeiçoamento das práticas de manejo silviculturais e do processamento primário de serragem e secagem.

Entre as características gerais das árvores do gênero *Eucalyptus*, destaca-se a presença de alborno delgado, com menos de 3 cm, e coloração clara. Segundo AFONSO (1987), o cerne apresenta coloração variada, desde amarelo até variados tons pardos, pardo-avermelhados e vermelhos. Conforme NOGUEIRA (1991), a madeira de eucalipto apresenta massa específica aparente variável, desde as mais leves até as de massa bastante elevada, com valores de densidade variando de 0,40 a 1,20 g/cm³; em geral com pouco brilho, grã direita à reversa, textura fina a média, macia a moderadamente dura ao corte.

Existem numerosos dados de avaliação das propriedades físicas e características mecânicas da madeira de eucalipto na literatura. O IPT (1956) publicou tabelas de resultados de aproximadamente 40 espécies de eucalipto, com descrição de suas propriedades físicas e características mecânicas. NOGUEIRA e LAHR (1992) apresentam os resultados de determinações das principais características mecânicas de resistência e rigidez de 16 espécies de eucaliptos. A NBR-7190, da ABNT (1997), fornece em seu Anexo E os valores médios de características mecânicas da madeira das principais espécies de eucalipto, obtidas com teor de umidade de 12%.

OLIVEIRA (1997), em trabalho sobre a caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil, apresenta um estudo aprofundado sobre as propriedades anatômicas, densidade e massa específica, retratibilidade, durabilidade natural a agentes biológicos xilófagos e estimativas de características mecânicas. Neste trabalho, realizado sobre sete espécies de *Eucalyptus*, destacam-se os estudos das variações de propriedades da madeira na direção radial ao longo da medula-casca e ao longo do comprimento do tronco das árvores.

2.6.3 – O Emprego da Madeira de Eucalipto em Estruturas

A madeira de eucalipto tem tido um emprego crescente em estruturas nos últimos 20 anos, na forma de madeira roliça, na forma de madeira serrada em geral e na forma de madeira laminada colada em particular. O emprego de madeira roliça tem sido comum em diversos componentes estruturais, em geral para construções de arquitetura mais rústica, como colunas, vigas e pórticos. A madeira serrada tem tido uso mais comum em estruturas nas coberturas, como tesouras, terças e caibros e, na forma de madeira laminada colada, tem tido um emprego crescente e bem diversificado, como vigas, colunas, pórticos, arcos e treliças de coberturas.

São inúmeros os relatos de emprego da madeira de eucalipto em estruturas no Brasil, disponíveis na literatura técnica e científica e em revistas informativas, especializadas na área de construção, arquitetura e engenharia. Entre os estudos técnicos e científicos dirigidos ao desenvolvimento do emprego da madeira de eucalipto em estruturas da construção civil, destacam-se os trabalhos apresentados nas diversas edições realizadas ao longo dos últimos 20 anos, do Encontro Brasileiro de Madeira e de Estruturas de Madeira (EBRAMEM), promovidos pelo Instituto Brasileiro de Madeira e de Estruturas de Madeira (IBRAMEM).

2.6.4 – A Madeira Juvenil

A madeira juvenil é constituída pela parte do lenho formada no estágio jovem das árvores, situada mais próxima à medula, apresentando diferenças em relação à madeira adulta em sua anatomia e em diversas propriedades, como por exemplo resistência mecânica menor, OLIVEIRA (1997).

Segundo MAEGLIN⁸ (1987), apud OLIVEIRA (1997), a madeira juvenil é aquela formada nas extremidades da copa, enquanto a árvore ainda é jovem. O período de tempo de formação da madeira juvenil é variável para diferentes espécies e entre

⁸ MAEGLIN, R.R. Juvenile wood, tension wood, and growth stress effects on processing hardwood. In: Applying the latest research hardwood. *Proceedings of the 15th annual hardwood symposium of the Hardwood Research Council*. Memphis, TN: Hardwood Research Council, 1987. 100-8.

árvores de mesma espécie, com grau de distinção em relação à madeira adulta dependente das condições de crescimento e fatores genéticos. As diferenças anatômicas da madeira juvenil em relação à madeira adulta são: o comprimento das fibras, o ângulo fibrilar, proporções dos tipos de células, diâmetro celular, espessura da parede celular, teor de umidade, porcentagem de celulose e lignina. Outros fatores tais como a massa específica, resistência e retratibilidade variam como consequência das alterações anatômicas. Os principais problemas decorrentes da formação de madeira juvenil são a excessiva contração longitudinal, empenamentos maiores, resistência mecânica reduzida e menor densidade, que é considerada um parâmetro tecnológico de grande importância devido às fortes correlações existentes entre esta propriedade e as características mecânicas da madeira.

Conforme o mesmo autor, a grande diferença entre a madeira juvenil presente em espécies coníferas e folhosas reside na magnitude das alterações anatômicas e físicas no sentido radial a partir da medula. Por exemplo, o comprimento de fibras em madeira madura nas coníferas pode ser quatro vezes maior e somente duas vezes maior nas folhosas, quando comparadas à madeira juvenil.

OLIVEIRA (1997) apresenta um conjunto de gráficos que representam a variação da densidade básica média da madeira, na direção radial medula-casca, para sete espécies de *Eucalyptus*, obtido de cinco árvores de cada espécie com idade de cerca de 16 anos. Na FIG. 2.13, reproduz-se o perfil densitométrico da madeira da árvore 2 da espécie *E. grandis*, na altura do DAP, que permite avaliar os gradientes de variações da densidade na direção radial e a identificação nítida da madeira juvenil.

Conforme esse autor, a técnica de densitometria de raios-X consiste na irradiação de amostras de madeira de pequena espessura ($\cong 1,0$ mm), colocadas sobre um filme fotográfico, que depois de revelado é copiado por um aparelho designado microdensitômetro. Como as variações da densidade da madeira produzem variações correspondentes na densidade ótica sobre o negativo de raios-X, a densidade da madeira é obtida da densidade ótica, através de uma cunha de derivação, que também é irradiada pelos raios-X, junto com amostras de madeira.

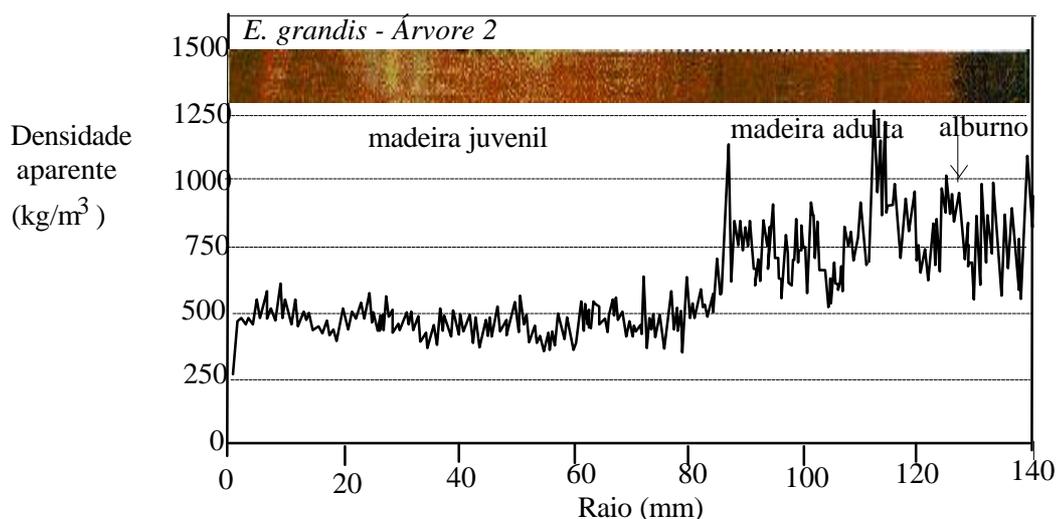


FIGURA 2.13 – Perfil Densitométrico da Madeira de Árvore da Espécie *E. grandis*. Fonte: OLIVEIRA (1997)

Na FIG. 2.14, são reproduzidos os gráficos de valores médios da densidade básica obtidos na altura do DAP, obtidos de cinco árvores de sete espécies de *Eucalyptus*.

Entre as conclusões relatadas, destacam-se:

- A elevada variabilidade da densidade da madeira para as espécies estudadas.
- Ocorrência de densidade significativamente menor da madeira juvenil em relação à madeira adulta, devido à menor espessura das paredes celulares da madeira juvenil.

A menor densidade da madeira juvenil, associada ao fato da ocorrência de maiores ângulos das microfibrilas nas paredes, conduz a uma significativa redução da resistência mecânica desta madeira em relação à madeira adulta. No caso de esforços de tração, esta diferença pode ser mais acentuada devido ao menor comprimento das fibras presentes na madeira juvenil, que reduz o entrelaçamento e as áreas de contato das fibras entre si.

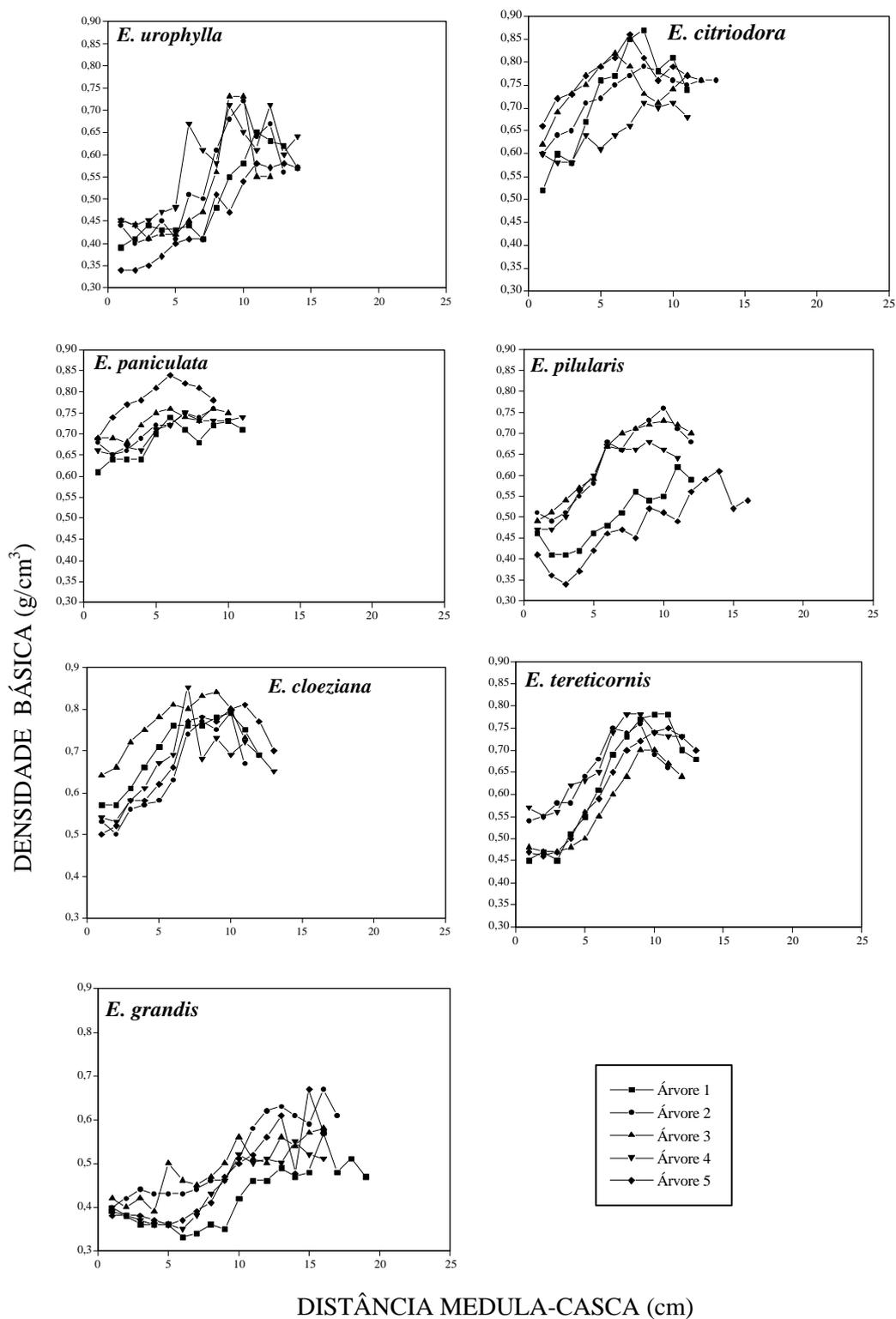


FIGURA 2.14 - Gráficos de Variação da Densidade Básica Média da Madeira, em g/cm³, na Direção Radial Medula-Casca para Cinco Árvores de Sete Espécies de *Eucalyptus* no DAP. Fonte: OLIVEIRA (1997)

2.7 Ligações de Peças Estruturais de Madeira

Nas estruturas de madeira usuais é comum o uso de emendas e ligações entre as peças componentes, em função das dimensões da estrutura e devido à mudança brusca de direção entre as barras de pórticos, grelhas e treliças. O emprego consistente de uma dada ligação em uma estrutura exige o conhecimento dos possíveis processos de rupturas envolvidos, a avaliação de sua resistência por seu valor característico e de sua rigidez, definida pela relação força x deslocamento, por seu valor médio. Além disso, a adequação de uma ligação para uma determinada aplicação envolve diversos aspectos, destacando-se: a facilidade de execução, o comportamento resistente, a durabilidade, os custos e o aspecto estético.

O comportamento resistente depende do tipo, do material, das dimensões e da distribuição dos componentes empregados e das solicitações atuantes. Nas ligações podem ser utilizados adesivos, encaixes diversos e elementos mecânicos de pinos ou conectores. Os pinos podem ser pregos, parafusos, barras, tubos de aço e cavilhas de madeira. Os conectores usuais são de aço na forma de chapas dentadas ou de anel.

As ligações mais simples e usuais são efetuadas por meio de pinos, os quais são embutidos na madeira, ligando lateralmente peças entre si. As ligações com pinos são discretas ao longo da área de contato das peças, com a transmissão dos esforços produzindo concentrações de tensões nas áreas restritas de contato entre o pino e a madeira. Quando a capacidade de carga da ligação é influenciada pelo escoamento dos pinos, o processo de ruptura tende naturalmente a ser dúctil e a resistência da ligação é definida em função de um limite imposto às deformações. No Apêndice A, transcrevem-se as recomendações da NBR 7190, ABNT (1997), para a determinação experimental da resistência de ligações mecânicas por meio de pinos.

GEHRI⁹, apud KAIRI (2001), utiliza o conceito de taxa de ductilidade D_s para analisar a ductilidade de ligações, definida de acordo com a representação da FIG. 2.15, pela

⁹ GEHRI, E. Design of Joints and Frame Corners Using Dowel-Type Fasteners. Bordeaux: 1996. *Proceedings CIB W18 meeting 29*. paper 29-7-6.

relação entre o deslocamento ou deformação da fase elástica com o correspondente valor decorrente do escoamento da ligação, na forma:

$$D_s = v_u / v_y = \epsilon_u / \epsilon_y \quad (2.08)$$

Onde v_y é o deslocamento elástico e v_u o deslocamento total, de valor igual à soma da parcela elástica e da parcela plástica, ϵ_y e ϵ_u são as deformações correspondentes.

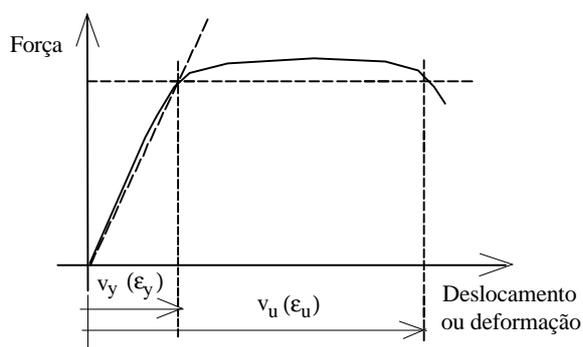


FIGURA 2.15 – Parâmetros para Definição de Taxa de Ductilidade em Ligações.

Fonte: KAIRI (2001)

FRIDMAN (1989) analisou, em ensaios experimentais de vigas de madeira da espécie *Picea abies* (“European spruce”), o comportamento de conectores de chapas metálicas tridimensionais projetados para serem utilizados nas ligações de vigas secundárias com vigas principais, com uso de pregos especiais de fuste rosqueado. Constatou a diversidade de parâmetros que influenciam as relações carga x deformações e a grande influência da rotação das ligações nas deformações de vigas ensaiadas.

GESUALDO e HELLMEISTER (1989), em estudo comparativo do comportamento de treliças de madeira com ligações por meio de parafusos de aço e com cavilhas de madeira de *Eucalyptus citriodora*, observaram a importância das deformações das ligações no comportamento do conjunto, constatando que a estrutura com ligações parafusadas é menos deformável que a estrutura com ligações cavilhadas. Constataram também que os resultados obtidos por meio de análises efetuadas com modelos de treliça e pórtico, considerados com ligações rígidas, apresentaram deslocamentos bem inferiores aos obtidos nos ensaios.

ALMEIDA e FUSCO (1992) e ALMEIDA et al. (1995) apresentam uma metodologia para dimensionamento de ligações pregadas e parafusadas com base no Método dos Estados Limites, empregada no modelo utilizado pela NBR-7190, ABNT (1997). São relatados os modos de ruptura das ligações e definidos modelos simplificados para as relações força x deformação, obtidos com base em resultados experimentais. Os estados limites da ligação ocorrem em função da plastificação dos pinos por flexão ou da madeira por embutimento na região de contato com o pino, desde que sejam respeitadas as disposições construtivas relativas aos espaçamentos mínimos, relações entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino e de pré-furação adequada, cujo conjunto garante a segurança contra o fendilhamento e o cisalhamento da madeira.

ALMEIDA (1992b) analisou o comportamento de uniões pregadas com cobre-juntas de madeira (FTCW), com pregos submetidos à corte duplo, e com cobre-juntas metálicas (FTCS) e pregos submetidos à corte simples, por meio de ensaios de tração ao longo de 128 dias, com as ligações dispostas em série no mesmo dispositivo de ensaio projetado para manter o carregamento constante. Com emprego de relógios comparadores foram medidos, diariamente, os deslocamentos relativos entre as peças ligadas. Foram obtidas relações médias de 5,7 (FTCW) e de 1,42 (FTCS) entre os deslizamentos v_{128} , medidos após 128 dias de aplicação da carga mantida constante e os deslocamentos v_0 , medidos logo após o carregamento. Cerca de 57% (FTCW) e 50% (FTCS) dos deslocamentos adicionais a v_0 foram detectados em medições após 24 horas do carregamento. Foram detectadas recuperações elásticas imediatas com o descarregamento e recuperações adicionais limitadas após 24 horas de descarregamento.

RODRIGUES JÚNIOR (1992) estudou a influência das deformações de ligações por anéis metálicos, empregado-as em vigas composta de quatro elementos sobrepostos horizontalmente. Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos, considerando-se um modelo de comportamento contínuo e elástico-linear das ligações, utilizando o conceito de módulo de rigidez específica da conexão, definido pelo quociente do módulo de escorregamento do conector e seu espaçamento longitudinal.

ARANTES (1995), com o objetivo de estudar o comportamento de vigas compostas com ligações pregadas, por meio da avaliação das deformações normais, da flecha na seção central e do escorregamento longitudinal relativo entre as peças componentes, realizou ensaios de vigas sob ação de forças em quatro pontos, de seção transversal T formadas com duas peças de madeira da espécie angelim pedra e ligações pregadas, com dimensões da ordem de 60 mm x 140 mm e de 30 a 36 mm x 140 mm, respectivamente, para as peças da alma e da mesa. Foram realizados ensaios preliminares para a avaliação da rigidez em corpos-de-prova com emprego da mesma madeira e elemento de ligação das vigas. Concluiu pela boa aproximação entre os resultados experimentais e os obtidos por meio de análises numéricas linear e não-linear, efetuadas com o programa FLOOR e análise linear com uso do programa SAP90.

BARALDI e CALIL JUNIOR (1995) estudaram, por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios experimentais, a adequação do EUROCODE 5, da DIN 1052 e da NBR-7190, ABNT (1982) ao dimensionamento de vigas compostas com seções T, I e caixão. Os autores concluíram pela superavaliação da rigidez da viga composta pela norma brasileira vigente à época em comparação com as normas internacionais utilizadas e com os valores obtidos experimentalmente.

NOGUEIRA et al. (1995) propuseram uma geometria para corpos-de-prova para ensaios de ligações por anéis metálicos, a partir da análise dos corpos-de-prova utilizados em diversas normas internacionais, descrevendo os modos de ruptura observados em ensaios experimentais.

SILVA et al. (1995) avaliaram a resistência de pregos lisos, anelados e espiralados, em ensaios de arrancamento de corpos-de-prova de madeira *Eucalyptus citriodora* e *Pinnus elliottii*, com os pregos sendo cravados com furação prévia e nas direções axial, tangencial e radial. Com base nos resultados experimentais os autores concluíram pela ocorrência de aumento significativo da resistência para pregos não-lisos empregados em madeira macia e uma maior resistência do prego anelado em relação ao espiralado e deste em relação ao liso.

PASSOS e CHAHUD (1995), em uma análise preliminar dos resultados de ensaios experimentais de ligações com parafusos auto-atarraxantes, concluíram pela possível viabilidade do uso destes elementos em ligações de peças estruturais de madeira.

DEMARZO e BARTHOLOMEU (1995) definiram um coeficiente de engastamento parcial, avaliado por meio de ensaios experimentais realizados em peças de madeira de angico preto (*Piptademia macrocarpa*), submetidas à flexão simples, para determinação do grau de engastamento promovido por ligações com conectores metálicos de chapa com dentes estampados.

SOUZA e CHAHUD (1998), em estudo do comportamento de corpos-de-prova em ensaios de resistência da madeira e de ligação entre peças de madeira e de concreto, comparam os resultados experimentais e obtidos por meio de análise numérica. Foram realizados ensaios de resistência da madeira na compressão paralela, compressão normal e tração normal. Os corpos-de-prova de ligações foram confeccionados com peça central de madeira e duas peças laterais de concreto, com emprego de conectores de cisalhamento de madeira ou de cantoneira de aço fixada com pregos na madeira.

Nos ensaios foram obtidos gráficos força x deslocamento para subsidiar a análise comparativa. Na modelagem numérica dos corpos-de-prova de madeira, foram utilizadas análises elásticas tridimensionais. Nas análises das ligações foram realizadas duas modelagens, sendo uma linear com elementos sólidos e outra plástica, com elementos planos e lineares.

Os autores relatam os seguintes resultados para as análises comparativas da resistência da madeira: bons na tração paralela, razoáveis na compressão paralela e com maiores discrepâncias na compressão normal, cujas deficiências foram atribuídas à não-utilização do valor real do módulo de elasticidade transversal da madeira.

Reconhecendo as dificuldades de modelagens numéricas de ligações entre os dois diferentes materiais e admitindo como reduzido o número de ensaios (três) realizados para cada tipo de conector, os autores relatam para as análises comparativas dos

resultados das ligações resultados discordantes para o conector de madeira de seção circular e boa concordância para o conector de madeira de seção retangular. Para os conectores de cantoneira de aço, os resultados foram considerados razoáveis.

CARRASCO e BREMER (1998) realizaram um estudo teórico-experimental de ligações de peças de MLC ortogonais entre si, com emprego de oito parafusos, submetidas a esforços combinados de flexão e cisalhamento, com uso de madeira de pinus e de eucalipto. Com base nos resultados experimentais, os autores concluíram que as ligações com madeiras macias, como a do pinus, podem ser consideradas flexíveis; enquanto para madeiras com características mecânicas altas, como a do eucalipto, as ligações podem ser consideradas semi-rígidas. Concluíram também pela adequação da avaliação da capacidade de carga das ligações parafusadas a partir da soma vetorial das parcelas devidas ao esforço cortante e ao momento fletor, levando-se em conta a direção das fibras e a correspondente resistência da madeira.

RODRIGUES JÚNIOR e FUSCO (1998) realizaram um estudo experimental sobre ligações pregadas de peças de madeira jatobá submetidas a carregamentos cíclicos e estáticos, com número de ciclos de carregamentos não menor que o obtido, admitindo-se que a carga máxima ocorra uma vez por hora durante 10 anos. Os valores das cargas aplicadas foram da mesma ordem de grandeza dos valores característicos inferiores das resistências das ligações, obtidas nos ensaios estáticos segundo os critérios da NBR-7190, ABNT (1997).

Os autores concluíram que as ligações, depois de submetidas a carregamentos cíclicos e levadas à ruptura, apresentaram maior resistência final que as ligações de corpos-de-prova gêmeos submetidos a ensaios estáticos, ocorrendo ampliação da fase de comportamento linear e menores deformações na ruptura. Recomendam a manutenção dos critérios da referida norma para projeto de ligações com pinos submetidas a cargas repetidas, considerando que o coeficiente de modificação K_{mod1} é suficiente para considerar o efeito de repetição dos carregamentos.

MOREIRA e PETRAUSKI (1998) realizaram um estudo comparativo do comportamento resistente de ligações paralelas coladas e com emprego unicamente de elementos mecânicos (pregos, parafusos e conectores de anel), por meio de ensaios à compressão, efetuados em corpos-de-prova com três elementos de madeira jatobá. Nas ligações coladas, foram utilizados parafusos para promoverem uma protensão transversal na madeira na região da ligação. Nas ligações com elementos mecânicos, os mesmos apresentavam grande rigidez relativa em comparação com as peças de madeira e o máximo de aproveitamento da área de contato da ligação, tendo em vista os espaçamentos recomendados pela NBR 7190 da ABNT (1997). Os resultados obtidos comprovaram maior rigidez e maior resistência final das ligações coladas, as quais apresentaram rupturas essencialmente frágeis.

CARRASCO e BREMER (2000), utilizando pinos de segmentos de tubo de aço galvanizado de diâmetro nominal de $\frac{1}{2}$ ", com as extremidades rosqueadas, determinaram, com base em análise experimental realizada com os procedimentos da NBR 7190/97, a resistência ao embutimento de madeira laminada colada de *Eucalypto grandis* nas direções paralela e normal às fibras. Os resultados obtidos comprovaram, como havia sido previsto, o esmagamento da madeira e não a flexão do tubo durante os ensaios, com valores médios para a resistência ao embutimento de 16,33 MPa para os ensaios paralelos às fibras e de 14,69 MPa para os ensaios normais às fibras.

SERAPHIM e FRANCO (2000), em estudo experimental com madeira de eucalipto, sobre a influência da espessura no desempenho de ligações por chapas metálicas de dentes estampados, efetuados em ensaios de tração paralela às fibras da madeira e longitudinais à chapa metálica, relatam uma nítida tendência de diminuição da resistência e da rigidez das ligações em função da espessura da madeira interligada. Os autores justificam tais resultados pelo aumento da excentricidade de carga à medida que aumenta a espessura da madeira. Nos ensaios foram utilizados madeira de *Eucalyptus grandis* e peças com espessuras de 2,5 cm, 4,0 cm, 5,8 cm e 6,0 cm.

VALLE et al. (2000) efetuaram uma avaliação comparativa entre a resistência e a rigidez de embutimento de parafuso na madeira, obtidos por meio de ensaios para

diferentes ângulos de inclinação das fibras da madeira em relação à força no parafuso, com base nos critérios da NBR-7190 (1997) e do Eurocode 5 (1993). Foram realizados ensaios em corpos-de-prova extraídos de uma mesma viga de madeira laminada colada de *Eucalyptus grandis*, com emprego de um parafuso não ajustado ao furo.

O Eurocode 5 estabelece por meio da norma EN 383 (1992) “*Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners*” critérios para a determinação experimental da resistência e da rigidez de embutimento para ligações com um único parafuso. A resistência ao embutimento é definida pelo menor valor da tensão correspondente à força máxima ou limite de 5 mm de deslocamento, obtido no carregamento efetuado após um ciclo de carga e descarga, com força máxima de 40% da resistência correspondente esperada, como representado na FIG. 2.16.

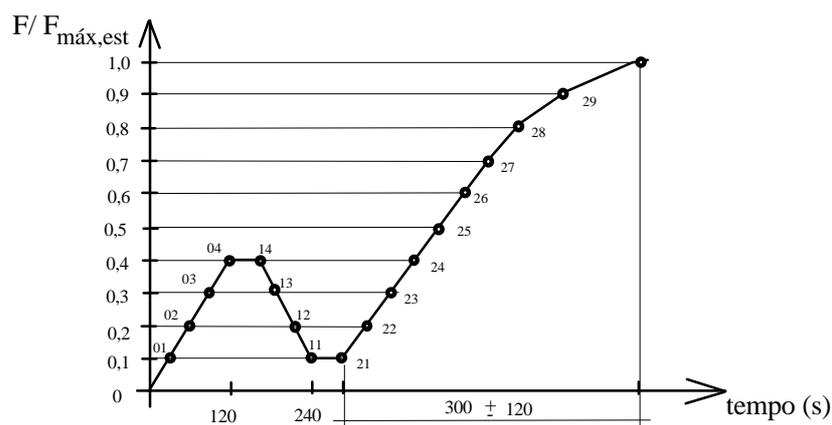


FIGURA 2.16 – Diagrama de Carregamento para Ensaios de Embutimento de Acordo com a EN 383 (1992)

O coeficiente de rigidez de embutimento é definido pela EN 383 (1992), a partir das variações de força e deslocamento do ciclo inicial de carregamento, correspondentes aos valores de 10% e 40% da resistência estimada, na forma:

$$K_{\text{ser}} = \frac{0,4F_{h,\text{est}}}{u_{i,\text{mod}}} \quad (2.09)$$

Onde K_{ser} é o coeficiente de rigidez de embutimento, $F_{h,\text{est}}$ é a força de embutimento estimada para a ligação e $u_{i,\text{mod}}$ é o deslocamento corrigido, definido na Eq. (2.10),

proporcional ao deslocamento no trecho entre os pontos 01 e 04 da FIG. 2.14, podendo ser igualmente obtido pela relação entre força e deslocamento no trecho compreendido entre 10% e 40% da resistência estimada.

$$u_{i,\text{mod}} = \frac{4}{3}(u_{04} - u_{04}) \quad (2.10)$$

Utilizando a metodologia dos ensaios de resistência da NBR 7190/97, os autores definiram a rigidez com base na correlação linear entre a força e deslocamento, obtida no trecho compreendido entre 10% e 50% da resistência estimada, no terceiro carregamento.

Nos ensaios paralelos às fibras foram obtidas rupturas por fendilhamento da madeira, com separação dos mesmos em duas partes. Para os ensaios nos demais ângulos, as rupturas obtidas foram consideradas como provocadas pelos efeitos combinados de tração normal causada pela componente da força perpendicular às fibras e por cisalhamento causado pela componente paralela às fibras.

Os resultados de resistência obtidos pelo Eurocode 5 foram superiores aos da NBR 7190. As rigidezes obtidas com o critério proposto pelos autores, com base na metodologia de ensaio de resistência da NBR 7190, foram significativamente superiores às obtidas com a correlação no trecho inicial de carregamento, da ordem de 2 a 4 vezes. Tais diferenças foram justificadas pelos autores em função das diferenças de metodologias empregadas, pelo fato de que a ligação ao ser colocada em serviço, sem que o parafuso esteja completamente ajustado, sofre um ajuste inicial da folga entre o parafuso e o furo, acompanhado por micro-rupturas, após o qual fica estabelecido um contato mais efetivo entre os dois elementos.

VELOSO et al. (2000), visando uma avaliação das hipóteses empregadas no modelo analítico de determinação das resistências das ligações por pinos metálicos na NBR-7190 da ABNT (1997), realizaram análises com método dos elementos finitos e o programa Ansys, admitindo-se não-linearidade geométrica e comportamento elasto-

plástico e isotrópico dos dois materiais, com aplicação de carregamento crescente até atingir o estado limite último da ligação. Foram utilizadas diferentes relações t/d (3,7; 5,12; 8,33 e 12,5) e considerado o emprego de madeira classe C-60 do grupo das dicotiledôneas e prego comum.

A ligação foi discretizada por meio de elementos planos de quatro nós e dois graus de liberdade (u_x e u_y) para representar a madeira e elementos de barra com dois nós e três graus de liberdade (u_x , u_y e θ_z) para o prego, com emprego de elementos de dois nós e um grau de liberdade (u_y) tipo contato nas interfaces entre a madeira e o pino, que permitem transmitir apenas esforços de compressão. Adicionalmente, foram empregados elementos de mola de dois nós e um grau de liberdade (u_y) para evitar deslocamentos de corpo rígido das peças, decorrentes da simplificação do fenômeno tridimensional para o bidimensional.

Entre as principais conclusões relatadas no trabalho, destacam-se os bons resultados obtidos pela análise numérica em relação às hipóteses empregadas por ALMEIDA¹⁰ (1990), para o cálculo da carga de segundo limite da ligação, apesar do reconhecimento pelos autores de limitações na modelagem utilizada em relação ao modelo físico real.

MOREIRA et al. (2002) apresentaram um modelo simplificado para determinação da rigidez equivalente de barras axialmente solicitadas, considerando as influências das deformações das ligações. Tais influências ficam definidas a partir das relações carga x deslocamento, obtidas em ensaios experimentais de ligações na compressão utilizando-se de diferentes elementos mecânicos. Para uma avaliação preliminar comparativa das deformações destas ligações, efetuou-se uma análise do comportamento do conjunto através de modelagem pelo método dos elementos finitos utilizando-se elementos isoparamétricos quadrilaterais quadráticos conforme representação na FIG. 2.17a, considerando-se comportamento elástico-linear e continuidade nas interfaces das peças componentes da ligação.

¹⁰ ALMEIDA, P.A.O. *Estruturas de Grande Porte de Madeira Composta*. 1990. 278p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

A partir da análise das curvas força x deslocamento obtidas experimentalmente, apresentadas na FIG. 2.17b, os autores, desprezando a faixa inicial de carregamento, observaram que o comportamento das ligações coladas se aproximam de uma reta, com inclinação bastante próxima à obtida pela análise pelo MEF e pelo modelo elástico-linear. As curvas das ligações por elementos mecânicos apresentam inclinações significativas em relação do MEF. A rigidez aparente de cada ligação foi definida pelo coeficiente angular da curva $P \times \delta$, com os deslocamentos representando a soma do deslizamento relativo entre as peças de madeira e a deformação na madeira. A rigidez efetiva da ligação foi obtida descontando-se as deformações estimadas da madeira.

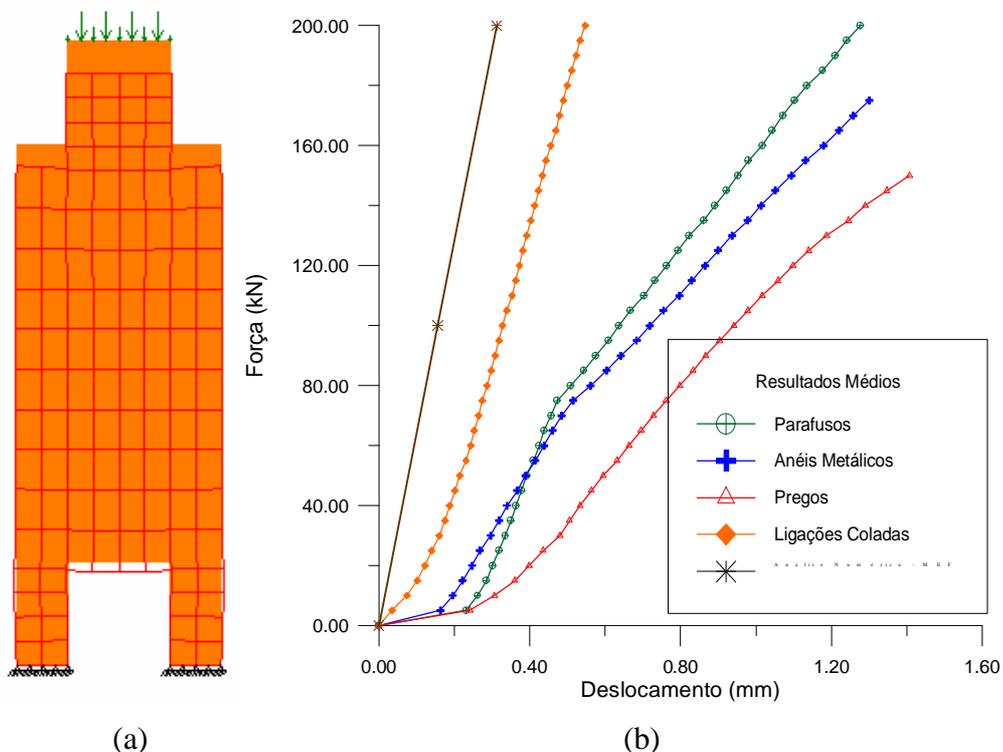


FIGURA 2.17 a) Modelagem (MEF) dos Corpos-de-Prova de Ligação e Configuração Deformada; b) Curvas Força x Deslocamento. Fonte: MOREIRA e LÚCIA (2002)

Nesse trabalho os autores propõem para a obtenção da rigidez aparente da ligação utilizar a metodologia básica recomendada pela NBR-7190/97 para obtenção da resistência e definir a rigidez aparente pela inclinação da reta de correlação obtida no diagrama $P \times \delta$, entre os pontos correspondentes a 10% e 50% da resistência estimada, no terceiro carregamento.

2.8 Ligações por Meio de Adesivos

2.8.1 Introdução

Os adesivos podem ser empregados em ligações estruturais de peças de madeira basicamente em três diferentes formas. Seu emprego clássico refere-se à fabricação de peças de madeira laminada colada, cuja técnica tem origem registrada no início do século XIX, consistindo da colagem contínua entre si de lâminas ou tábuas de espessuras não elevadas na direção paralela às fibras.

Uma segunda importante aplicação refere-se ao uso de adesivos em parafusos e barras rosqueadas embutidos na madeira. Esta técnica tem sido empregada em diversos tipos de ligações e uso de adesivo epóxi. GUAN (1998) cita, além do custo competitivo, aplicações em fixação de colunas de madeira em fundações de concreto, em ligações de peças de madeira em pórticos, em apoios de vigas, em uniões de lamelas de estruturas de cobertura e no combate ao fendilhamento da madeira em regiões de entalhes, furos e ligações. Usualmente as barras são introduzidas em furos efetuados com folga de 1 a 3 mm em relação ao diâmetro da barra, que é posteriormente preenchido com a injeção de resina adesiva. Nas ligações com parafusos auto-atarrachantes, o furo é menor que o diâmetro do parafuso, sendo parcialmente preenchido com resina adesiva e a seguir submetida a uma penetração forçada do parafuso. Nas ligações as barras e parafusos podem ser dispostos alinhados, normais ou inclinados em relação às fibras da madeira, dependendo da geometria, dos esforços transmitidos e do efeito desejado.

A terceira alternativa refere-se ao emprego de ligações de peças de madeira coladas lateralmente em áreas reduzidas, tais como em ligações de elementos interpostos descontínuos de peças compostas e em ligações entre peças de estruturas de pórticos ou de treliças. A resistência e rigidez destas ligações são influenciadas por vários fatores, destacando-se as tensões atuantes nas superfícies da ligação colada, a resistência da madeira e do adesivo e a inclinação relativa das peças de madeira. A distribuição de tensões por sua vez depende das dimensões, da geometria e do arranjo da ligação, da rigidez do adesivo, dos esforços transmitidos e da existência de elementos transversais.

CARRASCO (1984) apresenta uma importante contribuição ao estudo das ligações estruturais de peças de madeira coladas em áreas reduzidas, com uma extensa descrição e caracterização do comportamento físico-químico de diferentes tipos de adesivos, das condições requeridas para aplicação e dos empregos usuais dos principais adesivos.

2.8.2 Resistência de ligações coladas

A NBR 7190 da ABNT (1997) define métodos experimentais para determinação de resistências de ligações coladas da madeira laminada colada, na tração paralela às fibras em emendas dentadas e biseladas, no cisalhamento paralelo às fibras e na tração normal às fibras, transcritos no Apêndice A.

A AMERICAM SOCIETY TESTING AND MATERIALS (ASTM) D 905 (1994) utiliza o corpo-de-prova representado na FIG. 2.18. Neste modelo de corpo-de-prova, o ângulo de inclinação das fibras de qualquer uma das peças ligadas pode ser modificado com facilidade.

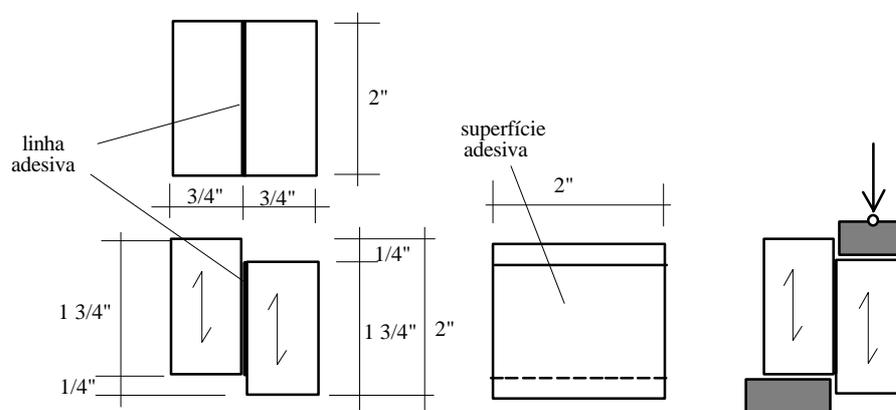


FIGURA 2.18 – Corpo-de-Prova e Esquema do Ensaio de Cisalhamento na Ligação Colada. Fonte: ASTM D 905 (1994)

CARRASCO (1984) e MOREIRA e PETRAUSKI (1998), utilizaram para determinação da resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva corpos-de-prova submetidos à compressão com três elementos de madeira e duas superfícies coladas, como representado na FIG. 2.19.

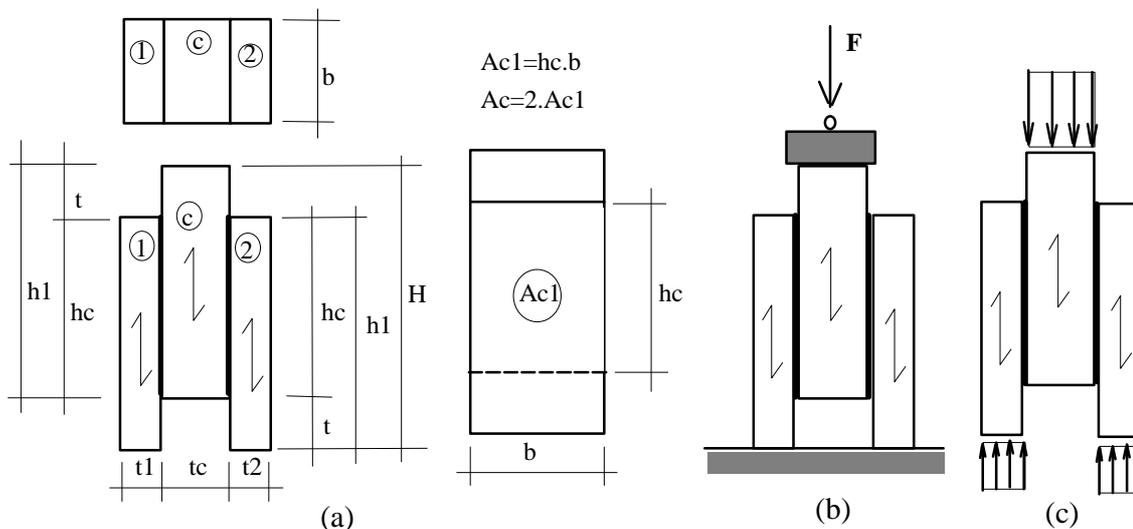


FIGURA 2.19 a) Corpo-de-Prova Simétrico de Ligação Adesiva com Três Elementos e Duas Superfícies Coladas; b) Esquema do Ensaio; c) Tensões Uniformes Admitidas no Contorno

CARRASCO (1984), em uma avaliação experimental preliminar da afinidade do adesivo à base de resorcinol com três espécies de madeira: eucalipto citriodora, pinho-do-paraná e peroba-rosa, em ensaios de compressão em corpos-de-prova com três elementos, obteve, para a madeira de elevada densidade de eucalipto citriodora, resistência da linha adesiva bem inferior à resistência ao cisalhamento da madeira, evidenciando uma maior dificuldade de penetração do adesivo. As resistências na linha adesiva para as outras duas espécies foram bem próximas às das respectivas madeiras.

Em ensaios de ligações de corpos-de-prova com três elementos submetidas à compressão, com emprego de madeira peroba-rosa e dois diferentes adesivos, resorcinol e epóxi, o referido autor obteve, além das tensões cisalhantes e normais atuantes na ruptura, valores do módulo de deformação da ligação, obtidos em análise de regressão da relação entre as tensões cisalhantes médias atuantes e as deformações relativas, ocorridas entre a peça central e as peças laterais. Foram efetuadas também análises estatísticas de correlação da influência da umidade e da densidade.

Com base em hipóteses simplificadas de distribuições de tensões normais à superfície colada e admitindo uma distribuição uniforme das tensões cisalhantes, o referido autor obteve para três espécies de madeira, gráficos força de ruptura esperada x comprimento da linha de adesivo. Concluiu que para valores reduzidos do comprimento da linha de adesivo a ruptura se dá por tração normal e para comprimentos maiores a ruptura ocorre por cisalhamento, com o limite superior correspondendo à resistência das peças ligadas por esmagamento da madeira.

Nesse mesmo trabalho o referido autor realizou ensaios para avaliar a durabilidade ou a variação da resistência de ligações com adesivos com o tempo. Foram confeccionados 22 pares semelhantes de corpos-de-prova, metade com adesivo à base de resorcinol e metade à base de epóxi. Após a confecção dos corpos-de-prova, foi ensaiado um elemento de cada par. Os demais foram armazenados por cinco anos e meio em local sujeito a variações ambientais de umidade (40 a 90%) e de temperatura (0 a 40⁰ C) e depois ensaiados. Após a correção dos valores obtidos experimentalmente para o teor de umidade de 12%, o autor conclui que estatisticamente, com risco de 5%, não ocorreu variação da tensão de cisalhamento média na área colada e nem do módulo de deformação, em função das variações climáticas ocorridas ao longo do tempo.

A partir da formulação de expressões analíticas da distribuição das tensões e da análise estatística de resultados de ensaios experimentais, CARRASCO avaliou a influência da inclinação das fibras das peças ligadas na resistência da ligação colada. Foram realizados ensaios de cisalhamento na compressão, tração, flexão e torção, com emprego de madeira peroba-rosa e adesivo à base de resorcinol, e inclinações relativas entre as fibras das peças ligadas ou entre as peças e talas laterais das ligações de 0⁰, 15⁰, 30⁰, 45⁰, 60⁰, 75⁰ e 90⁰.

Nos ensaios de cisalhamento, foram utilizados corpos-de-prova com dois elementos com largura de 50 mm e comprimento da linha de adesivo de 45 mm, com uma das peças gradativamente inclinada em relação à da outra peça, como esquematizado na FIG. 2.20a. O autor concluiu que a fórmula de Hankinson pode ser considerada válida para a determinação da tensão de cisalhamento resistente de ligações coladas na

compressão inclinada às fibras. As tensões médias de ruptura extremas obtidas foram de 13,04 MPa para peças alinhadas e de 5,48 MPa para peças ortogonais. A melhor adequação aos resultados experimentais foi obtida com o expoente $n=2,15$ na expressão de Hankinson.

Nos ensaios de tração foram utilizadas emendas centradas com talas laterais, com largura de 50 mm e comprimento da linha de adesivo de 45 mm em cada lado da ligação, como esquematizado na FIG. 2.20b. Os resultados obtidos indicaram que para inclinações elevadas, a partir de 75° , a ruptura se dá por tração normal às fibras da madeira nas talas laterais. Para inclinações menores, a partir de 30° , ocorre ruptura da linha adesiva por cisalhamento. Para valores intermediários de inclinação podem ocorrer os dois tipos de rupturas. Em relação ao emprego da fórmula de Hankinson, o valor de $n = 4$ resultou na melhor adaptabilidade das curvas aos resultados experimentais.

Na avaliação da resistência ao cisalhamento na flexão e na torção foram realizados ensaios de flexão com forças aplicadas em quatro pontos, emenda centralizada por meio de talas com largura de 50 mm e comprimento da linha de adesivo de 50 mm para cada lado da ligação, como esquematizado na FIG. 2.20b e c.

No cisalhamento na flexão, as talas da emenda foram coladas na face inferior e na face superior das peças ligadas. As causas das rupturas aproximaram-se das obtidas nos ensaios à tração, isto é, para inclinações elevadas, a partir de 75° , ocorre ruptura da tala tracionada. Para inclinações menores, a partir de 30° , ocorreram rupturas da linha adesiva, na região tracionada ou na região comprimida. Para inclinações de 45° , ocorreram rupturas da linha adesiva devido ao cisalhamento ou por ruptura na tala por tração. As tensões cisalhantes médias obtidas, respectivamente, para as fibras das peças de ligação paralelas e normais as das peças ligadas, foram de 9,9 MPa e 5,34 MPa. A melhor adequação da fórmula de Hankinson foi obtida com $n = 2,6$.

Na avaliação da resistência ao cisalhamento na torção foram utilizadas talas laterais paralelas ao plano de flexão. As causas das rupturas se aproximaram dos ensaios

anteriores. As médias das tensões cisalhantes de ruptura obtidas nos ensaios, para o modelo de distribuição de tensões admitido, foram de 11,39 MPa e de 3,65 MPa, respectivamente, para as ligações paralelas e normais.

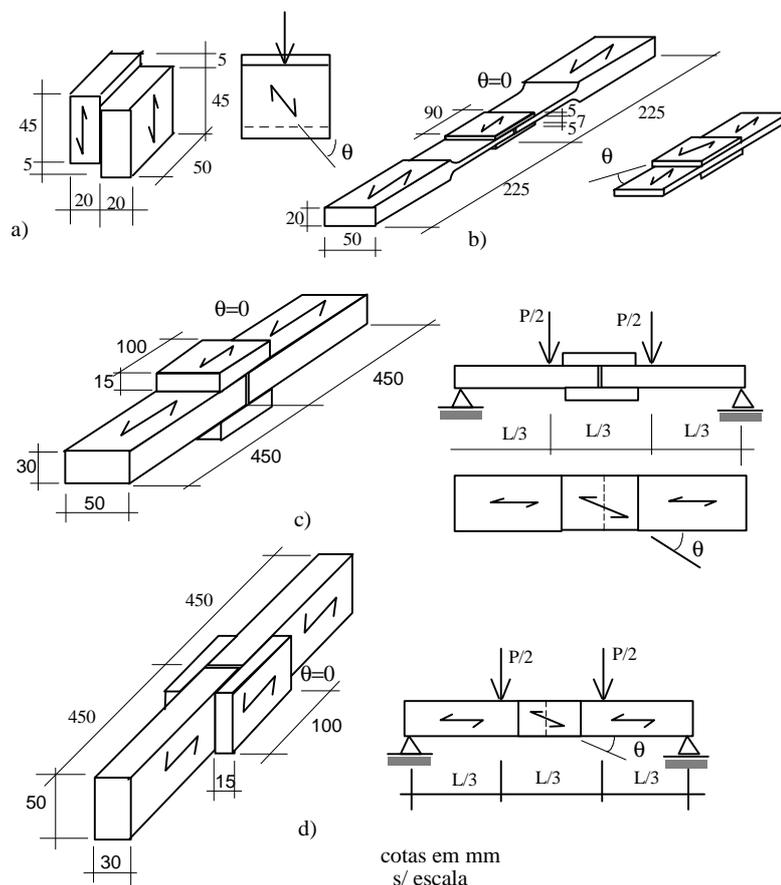


FIGURA 2.20 - Corpos-de-Prova com Representação do Ângulo de Inclinação das Talas Laterais Coladas e Esquema Estático dos Ensaios de: a) Cisalhamento ou Compressão com Duas Peças; b) Tração; c) Flexão; d) Torção

CARRASCO (1995) realizou em estudo específico sobre a adesividade da madeira de eucalipto citriodora com emprego de adesivo a base de resina resorcinol. Admitindo a dificuldade de se obter uma ligação estrutural dessa madeira com adesivo, em função principalmente de sua elevada densidade, o autor avaliou por meio de ensaios experimentais a resistência de ligações para diversas alternativas para a mistura adesiva e diluente, visando maximizar a resistência. Partindo da formulação recomendada pelo fabricante do adesivo, utilizou o álcool e o formol como diluentes em diferentes proporções, e o formol como componente da mistura. Concluiu que os melhores

resultados foram obtidos com emprego da mistura adesiva da resina resorcinol com o formol, utilizado na proporção de 5:1.

PETRAUSKI (2000), em trabalho experimental de tesouras treliçadas de laminado colado de *Eucalyptus grandis*, avaliou a resistência no cisalhamento paralelo às fibras e o percentual de falha na madeira de juntas coladas com emprego de adesivo à base de mistura resorcinol-formoldeído, metodologia de ensaio e corpos-de-prova da D-905 ASTM (1994), estudou as melhores alternativas de combinações das seguintes variáveis: pressão de colagem, quantidade de adesivo e número de faces de aplicação do adesivo.

Foram realizados ensaios segundo um arranjo fatorial de 4 x 4 x 2 de diferentes tratamentos, correspondendo a: diferentes pressões de colagem (0,2; 0,7; 1,1 e 1,5 MPa), diferentes quantidades de adesivo (150, 200, 250 e 300 g/m²) e número de faces de aplicação do adesivo (uma ou duas faces). Foram realizadas 20 repetições para cada tratamento, totalizando 640 corpos-de-prova ensaiados. Nesse mesmo trabalho foram realizados também ensaios de caracterização da resistência da madeira na compressão paralela às fibras, na flexão estática e no cisalhamento paralelo às fibras.

Os ensaios dos corpos-de-prova com adesivo nas duas faces obtiveram melhor resistência média e menor desvio padrão em relação aos que receberam adesivo em apenas uma face. Com o aumento dos valores da pressão de colagem e da quantidade de adesivo foram obtidos aumento da resistência e diminuição da variabilidade dos resultados. Os percentuais de falha na madeira acompanharam em geral a variação da resistência, isto é, cresceram com incremento da pressão de colagem e da quantidade de adesivo. No entanto, os maiores percentuais ocorreram em juntas com adesivo aplicado em apenas uma face. Por meio de análise de regressão dos resultados, foram obtidas equações de inter-relação da resistência com a pressão de colagem e com a quantidade de adesivo.

As resistências ao cisalhamento das juntas coladas foram consideradas plenamente satisfatórias em relação à da madeira sólida. Os valores médio e característico para a

resistência da madeira, corrigidos para o teor de umidade de 12%, foram de 12,95 MPa e 10,5 MPa. A resistência média das juntas coladas foi de 13,64 MPa.

A NBR 7197/97 estabelece que em madeira laminada colada a resistência da junta colada deve ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira. Analisando os resultados em relação à exigência da NBR 7190/97, o autor conclui que 14 dos diferentes tratamentos seriam rejeitados; basicamente, os associados às menores quantidades de adesivo e às com menores pressões de colagem.

Nesse mesmo trabalho o autor apresenta avaliação da adequação do modelo de Hankinson para resistência de juntas coladas no cisalhamento da lâmina de cola com diferentes ângulos entre as fibras das peças de madeira. Foram ensaiados 20 corpos-de-prova para ângulos de 0, 45⁰ e 90⁰ e 16 corpos-de-prova para os ângulos de 15⁰, 30⁰, 60⁰ e 75⁰, confeccionados com emprego de 250 g/m² de adesivo, com aplicação nas duas faces, pressão de colagem de 1,1 MPa, tempo em aberto nulo e em fechado de 30s. Em ensaios adicionais avaliou também a resistência à tração normal ao plano de colagem.

Com base nos resultados obtidos, transcritos na TAB. 2.6, o autor conclui que é adequado o uso do modelo de Hankinson, com $n = 2$, para estimar a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola com inclinação relativa das fibras das peças de madeira. O valor de $n = 2,04$ conduziu ao melhor resultado na previsão da resistência média para ângulos de 0 a 90⁰, com coeficiente de determinação de 0,86. O intervalo de confiança com 95% de probabilidade definiu os seguintes extremos: $1,9325 \leq n \leq 2,1722$.

TABELA 2.6 – Resistências Médias de Juntas Coladas com Diferentes Ângulos entre as Fibras, Corrigidas para o Teor de Umidade de 12%. Fonte: PETRAUSKI (2000)

Ângulo (graus)	0	15	30	45	60	75	90
Resistência média (MPa)	13,17	11,31	9,88	7,34	6,29	5,44	4,99
Desvio-padrão	1,38	1,70	1,77	0,92	0,90	1,04	0,72

2.8.3 Distribuição de tensões cisalhantes em ligações coladas

Em um trabalho sobre ligações adesivas simétricas com três elementos, submetidas à forças de tração e compressão, como representada na Figura 2.21, GUSTAFSSON e SERRANO (1998) apresentam uma avaliação da distribuição de tensões cisalhantes na superfície adesiva e da correspondente força de fratura, considerando o comportamento elástico linear para os materiais, a ocorrência de fratura frágil e certos parâmetros obtidos experimentalmente.

Os referidos autores apresentam ainda uma avaliação comparativa das forças de fratura estimadas com a formulação desenvolvida, em função do comprimento da lâmina de adesivo, com os resultados teóricos obtidos com análise numérica por meio do MEF e com os valores obtidos experimentalmente por GLOS e HORSTMAN¹¹. Por fim apresentam uma avaliação comparativa das forças de ruptura de ligações, obtidas teoricamente e experimentalmente, em função da orientação dos ângulos entre as peças componentes da ligação.

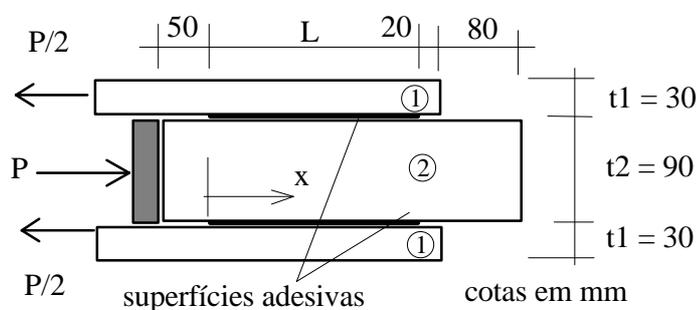


FIGURA 2.21 – Ligação Adesiva Simétrica com Três Peças Sob Tração e Compressão.

Fonte: GUSTAFSSON e SERRANO (1998)

Segundo VOLKERSEN¹², apud GUSTAFSSON e SERRANO (1998), a equação de governo do problema, considerando um comportamento elástico linear para as peças de

¹¹ GLOS, P.; HORSTMAN, H. Strength of Glued Lap Timber Joints, East Berlin: 1989. *Proceedings CIB-W18A meeting 22*, paper 22-7-8, pp 1-17

¹² VOLKERSEN, O. Die Schubkraftverteilung in Leim, Niet- und Bolsenverbindungen. *Energie ind Technik*, 1953. pp 68-71, 103-108, 150-154

madeira e para a lâmina de adesivo um comportamento elástico-linear de junta sob cisalhamento, com as tensões cisalhantes constante ao longo de uma ordenada x na superfície colada, $\tau = \tau(x)$, é definida pela equação diferencial:

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \omega^2 \tau(x) = 0 \quad (2.11)$$

Onde o fator ω , conforme HART-SMITH (1973), GUSTAFSSON e SERRANO (1998) e AICHER e KLOCK (2001) é definido pela expressão:

$$\omega = \left[\frac{G}{t_3} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

E_1, t_1 e E_2, t_2 , representam, respectivamente, o módulo de elasticidade e a espessura dos correspondentes aderentes, G_3 é o módulo de deformação elástico por cisalhamento da junta adesiva e t_3 é a espessura da lâmina de adesiva.

A relação G_3/t_3 representa a resistência da junta adesiva ao deslocamento relativo das peças coladas, estando relacionada à energia de fratura (G_f) da linha adesiva e tensão cisalhante de início da fratura τ_f , na forma:

$$\frac{G_3}{t_3} = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \quad (2.13)$$

A solução da Eq. (2.11), considerando-se a compatibilidade das deformações nas extremidades da lâmina adesiva e uma distribuição uniforme de tensões normais nos elementos 1 e 2, para o caso representado na FIG. 2.21 de solicitações por forças de tração – compressão, é expressa como:

$$\tau(x) = \left(\frac{P \cdot \omega}{2b} \right) \frac{\cosh(\omega(L - x))}{\sinh(\omega L)} \quad (2.14)$$

A tensão cisalhante máxima ocorre em $x = 0$, valendo:

$$\tau_{\text{máx}} = \tau(0) = \left(\frac{P \cdot \omega / 2b}{\tanh(\omega L)} \right) \quad (2.15)$$

Com $\tau_{\text{máx}} = \tau_f$, resulta a correspondente força de fratura P_f :

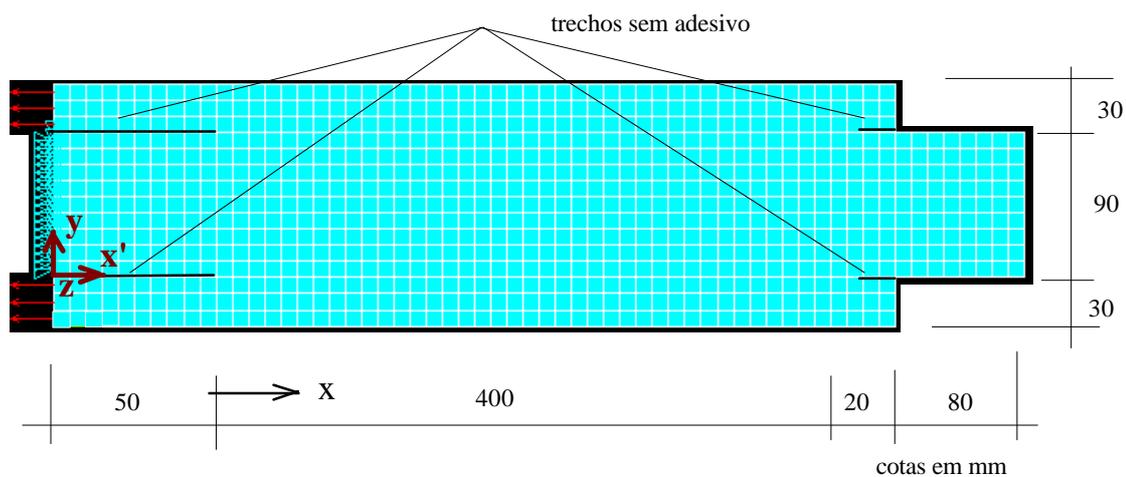
$$\tau_f = \left(\frac{P_f \cdot \omega / 2b}{\tanh(\omega L)} \right) \Rightarrow P_f = \frac{2b\tau_f \tanh(\omega L)}{\omega} \quad (2.16)$$

A resistência normalizada é definida pela relação entre a tensão cisalhante média e a tensão cisalhante máxima na ruptura na forma:

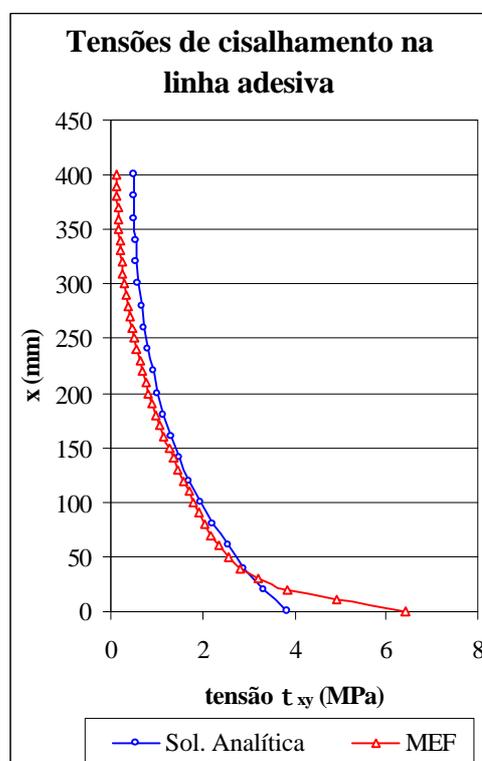
$$\frac{\left(\frac{P_f}{2 \cdot bL} \right)}{\tau_f} = \frac{\tanh(\omega L)}{\omega L} \quad (2.17)$$

No Apêndice B, apresenta-se a formulação da equação diferencial de governo das tensões cisalhantes em juntas adesivas simétricas com três elementos e o desenvolvimento das soluções para a distribuição de tensões cisalhantes e para a estimativa das forças de fratura de ligações adesivas simétricas com três elementos submetidos à tração-compressão.

A título de uma avaliação preliminar das soluções analíticas, apresentam-se os resultados do estudo de caso da ligação representada na FIG. 2.21 e relatado em GUSTAFSSON e SERRANO (1998), com emprego dos mesmos parâmetros: $b = 150$ mm, $L = 400$ mm, $t_1 = 30$ mm, $t_2 = 90$ mm, $\tau_f = 3,85$ MPa, $G_f = 800$ N.m/m², e $E_1 = E_2 = 11000$ MPa. A análise pelo MEF foi efetuada com o sistema Ansys, considerando um problema de estado plano de tensões e emprego de uma malha regular de elementos quadriláteros quadráticos de 8 nós de 10 mm de lado, conforme a FIG. 2.22a. As avaliações das tensões cisalhantes na linha adesiva efetuadas pela Eq. (2.14) e com o MEF são apresentadas na FIG. 2.22b.



(a)

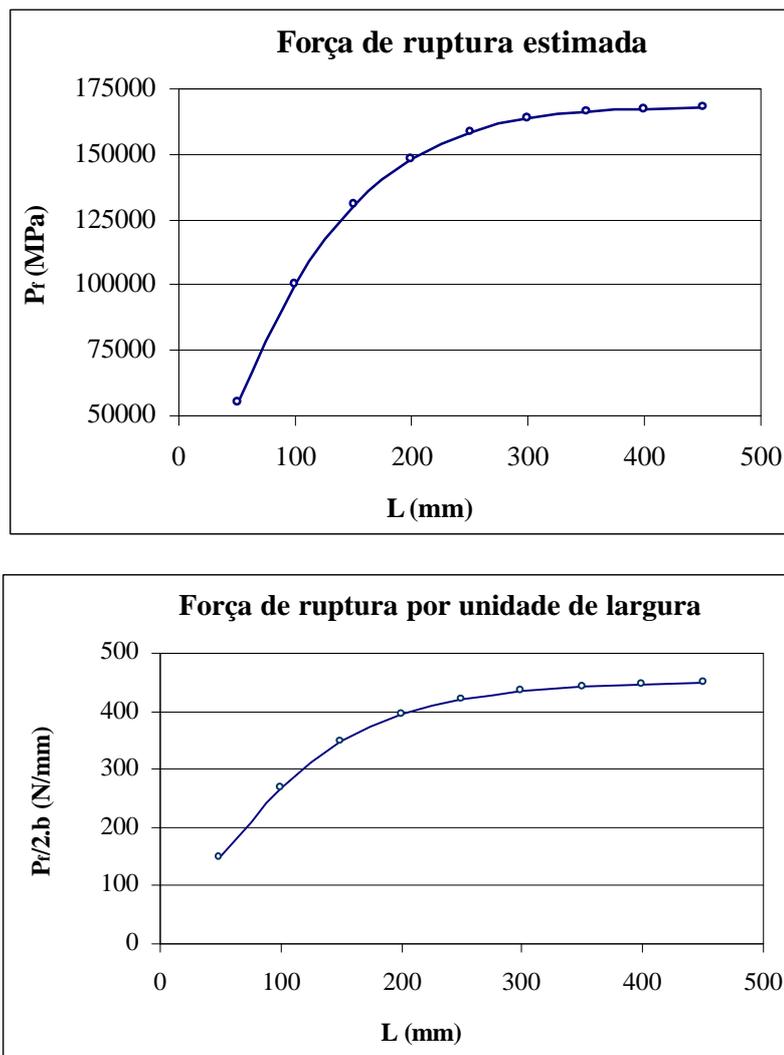


(b)

FIGURA 2.22 a) Modelagem da Ligação com Elementos Finitos; b) Tensões Cisalhantes (MPa) na Linha Adesiva

Na FIG. 2.22b observa-se uma razoável concordância entre os resultados da expressão analítica e do MEF, com o efeito de concentração das tensões de cisalhamento próximo ao bordo carregado, sendo mais acentuado no resultado do MEF.

A variação da força de ruptura, definida na Eq. (2.16), e da força de ruptura por unidade de largura em função do comprimento L são representadas na FIG. 2.23. As curvas obtidas indicam que o valor estimado da força resistente P_f é linearmente proporcional à tensão τ_f , apenas para valores de ωL reduzidos, neste caso para valores a $L \sim 200$ mm.



(b)

FIGURA 2.23 – a) Gráficos da Resistência ou Força de Ruptura Estimada e da Resistência ou Força de Ruptura por Unidade da Largura da Ligação Adesiva em Função do Comprimento da Linha de Cola

2.9 Modelos Matemáticos para Análise do Comportamento Mecânico da Madeira

2.9.1 Introdução

Devido à constituição e organização de seus elementos anatômicos, a madeira apresenta diferentes comportamentos mecânicos em função da direção e sinal das solicitações atuantes, com limitadas informações disponíveis na literatura das relações tensão x deformação até a ruptura, em particular de ensaios realizados com controle de incremento de deformações, principalmente na tração normal às fibras e na tração e cisalhamento paralelos às fibras.

De modo geral, a madeira é considerada um material de comportamento frágil, com exceção da compressão normal às fibras, cujo comportamento tende a ser dúctil. Na compressão paralela, apesar do início de plastificação próximo à ruptura, seu comportamento não pode ser considerado dúctil.

2.9.2 Tensões e Deformações em Um Ponto

O emprego de notação tensorial cartesiana permite uma representação matemática condensada. Nesta representação, os índices subscritos (1, 2, 3) representam os eixos do sistema ortogonal de referência (x,y,z) e a ocorrência da mesma letra de índice duas vezes em um mesmo termo representa somatório, resultando:

$$a_i a_i = \sum_{i=1}^3 a_i a_i = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \quad (2.18a)$$

$$a_{ii} = \sum_{i=1}^3 a_{ii} = a_1 + a_2 + a_3 \quad (2.18b)$$

O estado de tensões em um ponto é definido por um tensor de segunda ordem, que pode ser escrito em notação indicial como σ_{ij} , com $i, j = 1, 2, 3$ para problemas em 3-D, cujas componentes podem ser representadas na forma vetorial como na FIG. 2.24.

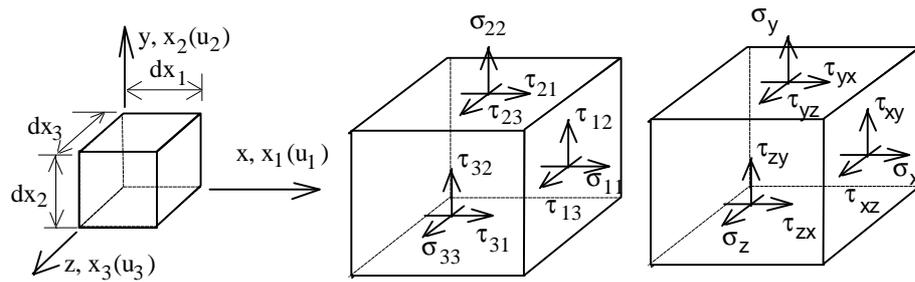


FIGURA 2.24 – Estado de Tensão em Um Elemento Infinitesimal no Sistema Cartesiano $x(x_1)$, $y(x_2)$ e $z(x_3)$

O componente genérico σ_{ij} do tensor de tensões fica perfeitamente definido pelos seus índices: o primeiro indica a direção normal da face e o segundo a direção de atuação. As componentes σ_{ii} são designadas de tensões normais e as componentes σ_{ij} , para $i \neq j$, são designadas de tensões tangenciais ou cisalhantes, sendo representadas usualmente por σ_i e τ_{ij} . No equilíbrio do elemento, as influências das forças de volume são infinitesimais de ordem superior e podem ser desprezadas, resultando das condições de equilíbrio de momentos a exigência de simetria do tensor de tensões, $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ para $i \neq j$ e que apenas seis componentes do tensor de tensões são independentes.

Sob efeito de ações, um corpo genérico sofre modificações de sua configuração inicial, passando da posição inicial x_i para a posição deformada $x_i + u_i$, onde u_i representa o componente do deslocamento na direção x_i . Em um regime de pequenos deslocamentos, em que as derivadas de primeira ordem sejam suficientemente reduzidas para que as derivadas de ordem superiores e os produtos de derivadas parciais de u_i possam ser desprezadas, o tensor de deformações é definido pelas relações cinemáticas:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.19)$$

Onde a vírgula, representa derivação em relação à direção indicada: $u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j$, sendo as distorções angulares, definidas por:

$$\gamma_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) = 2\epsilon_{ij}, \text{ para } i \neq j \quad (2.20)$$

2.9.3 Relações Constitutivas para Material Isotrópico Elástico-Linear

Para materiais de comportamento elástico-linear as relações constitutivas tensão-deformação são definidas pela lei de Hooke generalizada, ver TIMOSHENKO e GOODIER (1980), BODIG e JAYNE (1982), como:

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (2.21)$$

Onde δ_{ij} é a matriz delta de Kronecker, valendo:

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 1, \text{ para } i = j \\ \delta_{ij} &= 0, \text{ para } i \neq j \end{aligned} \quad (2.22)$$

λ e μ são as constantes de Lamé, valendo:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.23)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.23b)$$

E é o módulo de Young ou de elasticidade do material, ν é o coeficiente de Poisson e G é o módulo de cisalhamento.

A Eq. (2.21) pode ser reescrita, em termos das constantes G e ν , na forma:

$$\sigma_{ij} = \frac{2G \cdot \nu}{1 - 2\nu} \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} + 2G \cdot \varepsilon_{ij} \quad (2.24)$$

As relações inversas são definidas como:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1 + \nu} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \right) \quad (2.25)$$

A Eq. (2.24) pode ser escrita de forma mais concisa como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \quad (2.26)$$

Onde C_{ijkl} é o tensor de rigidez de quarta ordem de constantes elásticas:

$$C_{ijkl} = \frac{2G\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + G(\delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk}) \quad (2.27)$$

As relações constitutivas inversas definidas na Eq. (2.25) podem ser reescritas como:

$$\epsilon_{ij} = D_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (2.28)$$

Onde D_{ijkl} é o tensor flexibilidade, inverso de C_{ijkl} , sendo definido por:

$$D_{ijkl} = \frac{(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{2\nu}{(1+\nu)} \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + \delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk} \right] \quad (2.29)$$

Os componentes do tensor de tensões podem ser escrito na forma vetorial como $\{\sigma\} = \{\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \tau_{12} \ \tau_{23} \ \tau_{13}\}^T$. De forma análoga, as deformações podem ser escritas como $\{\epsilon\} = \{\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3 \ \gamma_{12} \ \gamma_{23} \ \gamma_{13}\}^T$. Considerando-se a Eq. (2.20), as relações constitutivas definidas pela Eq. (2.26) e sua inversa, dada pela Eq. (2.28), podem ser escritas na forma matricial como:

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (2.30)$$

e:

$$\{\epsilon\} = [C]^{-1}\{\sigma\} = [D]\{\sigma\} \quad (2.31)$$

Onde a matriz de rigidez de relações constitutivas $[C]$ e a matriz de flexibilidade $[D]$, são definidas, respectivamente, por:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & & & \\ \nu & (1-\nu) & \nu & & & \\ \nu & \nu & (1-\nu) & & & \\ & & & \frac{(1-2\nu)}{2} & & \\ & & & & \frac{(1-2\nu)}{2} & \\ & & & & & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[D] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & & & \\ -\nu & 1 & -\nu & & & \\ -\nu & -\nu & 1 & & & \\ & & & 2(1+\nu) & & \\ & & & & 2(1+\nu) & \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Para problemas de estado plano de tensões, no plano x,y, tem-se $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$, resultando para as relações constitutivas de interesse:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.34)$$

As relações inversas valem:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

As deformações γ_{yz} e γ_{xz} são nulas e a componente ϵ_z é não nula, valendo:

$$\epsilon_z = \frac{-\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) = \frac{-\nu}{1-\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (2.36)$$

Para problemas de estado plano de deformações, tem-se $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$, resultando para as relações constitutivas de interesse:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.37)$$

As relações inversas valem:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{(1+\nu)}{E} \begin{bmatrix} (1-\nu) & -\nu & 0 \\ -\nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

Neste caso, $\tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ e a tensão σ_z é não nula, valendo:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.39)$$

2.9.4 Modelo Elástico-Linear Ortotrópico

Conforme LEKHNITSKII (1981), um material possui um plano de simetria elástica se em cada ponto de um corpo deste material, para todas duas direções que sejam simétricas em relação ao plano considerado, têm-se as mesmas propriedades elásticas. Em geral, diferentes pares de direções simétricas apresentam diferentes propriedades entre si. Um material no qual, em cada ponto, existam três planos mutuamente ortogonais de simetria elástica, que sejam paralelos em todos os pontos, é designado de ortotrópico, sendo as três direções normais aos planos de simetria elásticas definidas como direções ou eixos principais.

Para um corpo de material com comportamento ortotrópico elástico-linear, com as direções principais definidas pelos eixos x_1 , x_2 e x_3 , quando os eixos geométricos são coincidentes com os eixos principais, as relações constitutivas são definidas por:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

Os parâmetros elásticos podem ser obtidos por meio de ensaios sob estados de tensões simples nas direções principais, com medições das correspondentes deformações:

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad \nu_{ij} = \frac{-\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad \text{e} \quad G_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\gamma_{ij}}; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.41)$$

A consideração da independência da ordem de aplicação das ações na energia de deformação acumulada em um corpo, prova a ocorrência de simetria da matriz de flexibilidade das relações constitutivas, resultando que apenas três valores de ν_{ij} são independentes e relações:

$$\frac{-\nu_{ij}}{E_i} = \frac{-\nu_{ji}}{E_j} \quad (2.42)$$

Para problemas de estado plano de tensões, as relações constitutivas de um material ortotrópico nas direções dos eixos principais x_1 e x_2 são definidas por:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

As relações constitutivas inversas, definidas por meio da matriz de rigidez, valem:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

Com a simetria definida na Eq. (2.42), os coeficientes da matriz de rigidez valem:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_1 E_2}{E_2 - E_1 (v_{21})^2}, \quad C_{12} = C_{21} = \frac{E_1 E_2 v_{21}}{E_2 - E_1 (v_{21})^2}, \\ C_{22} &= \frac{E_1 E_2}{E_1 - E_2 (v_{12})^2}, \quad C_{33} = G_{12} \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.9.5 Modelo Ortotrópico para a Madeira

Na análise do comportamento mecânico de um bloco de madeira, quando se despreza a curvatura dos anéis de crescimento e a não-homogeneidade do material, pode-se utilizar o modelo ortotrópico com os eixos de principais de elasticidade definidos pelos eixos L, R e T, como representado na FIG. 2.25. As relações constitutivas nestas direções principais podem ser escritas na forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -v_{RL}/E_R & -v_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -v_{LR}/E_L & 1/E_R & -v_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -v_{LT}/E_L & -v_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

A consideração de relações constitutivas simétricas conduz a:

$$\frac{v_{LR}}{E_L} = \frac{v_{RL}}{E_R}, \quad \frac{v_{LT}}{E_L} = \frac{v_{TL}}{E_T} \quad \text{e} \quad \frac{v_{RT}}{E_R} = \frac{v_{TR}}{E_T} \quad (2.47)$$

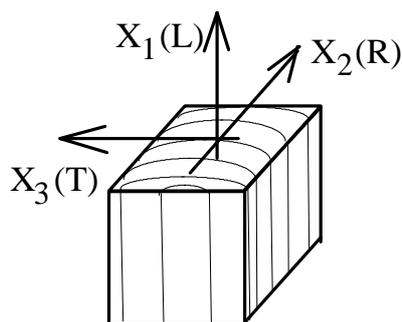


FIGURA 2.25 – Direções Principais da Madeira e do Modelo Ortotrópico

Segundo BODIG e JAYNE (1982), as relações entre os módulos de elasticidade nas três direções principais da madeira variam com as espécies, o teor de umidade, a temperatura, a velocidade de carregamento e diversos outros fatores, sendo aceito de um modo aproximado as seguintes relações:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (2.48a)$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (2.48b)$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1 \quad (2.48c)$$

GOODMAN e BODIG¹³, apud BODIG e JAYNE (1982), relacionam valores médios para os coeficientes de Poisson da madeira, transcritos na TAB. 2.7.

TABELA 2.7 – Valores Médios dos Coeficientes de Poisson da Madeira. Fonte: GOODMAN e BODIG (1973), apud BODIG e JAYNE (1982)

Coeficiente	Coníferas (softwood)	Dicotiledôneas (hardwood)
ν_{LR}	0,37	0,37
ν_{LT}	0,42	0,50
ν_{RT}	0,47	0,67
ν_{TR}	0,35	0,33
ν_{RL}	0,041	0,044
ν_{TL}	0,033	0,027

¹³ GOODMAN J.R.; BODIG, J. Orthotropic Elastic Properties of Wood. *J. Struct. Div.* 1973. ASCE 96 (ST11):2301-2319.

2.9.6 Transformações dos Tensores de Tensão e Deformação

Conhecidas as componentes do tensor de tensões σ_{ij} , referidas a um sistema de referência de eixos ortogonais x_i , as componentes do tensor de tensões σ'_{ij} , referidas a um outro sistema de eixos ortogonais x'_i , podem ser obtidas como:

$$\sigma'_{kl} = \sigma_{ij} \cdot l_{ki} \cdot l_{lj} \quad (2.49)$$

Onde $l_{ij} = \frac{\partial x'_i}{\partial x_j} = \cos(x'_i, x_j)$ é o cosseno diretor dos eixos x'_i e x_j dado na TAB. 2.8.

TABELA 2.8 – Cossenos Diretores l_{ij}

	x (x_1)	y (x_2)	z (x_3)
x' (x'_1)	l_{11}	l_{12}	l_{13}
y' (x'_2)	l_{21}	l_{22}	l_{23}
z' (x'_3)	l_{31}	l_{32}	l_{33}

As relações inversas são escritas de forma semelhante, como:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{kl} \cdot l_{ki} \cdot l_{lj} \quad (2.50)$$

As relações definidas na Eq. (2.49) e suas inversas, definidas na Eq. (2.50), podem ser escritas em forma matricial, respectivamente, como:

$$[\sigma'] = [R_{x,x'}] [\sigma] [R_{x,x'}]^T \quad (2.51a)$$

$$[\sigma] = [R_{x,x'}]^T [\sigma'] [R_{x,x'}] \quad (2.51b)$$

Onde $[R_{x,x'}]$ é a matriz ortogonal de rotação de eixos, definida pelos cossenos diretores dos eixos x'_i em relação aos eixos x_i dados na TAB. 2.8.

No caso particular de o novo sistema de eixos coordenados x'_i ser obtido pela rotação do sistema x_i em relação a um dos eixos do sistema inicial x_i , por exemplo de um ângulo θ em relação ao eixo $z(x_3)$, com $x'_3 = x_3$ como representado na FIG. 2.26, a matriz de rotação dos cossenos diretores vale:

$$[R_{x,x'}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

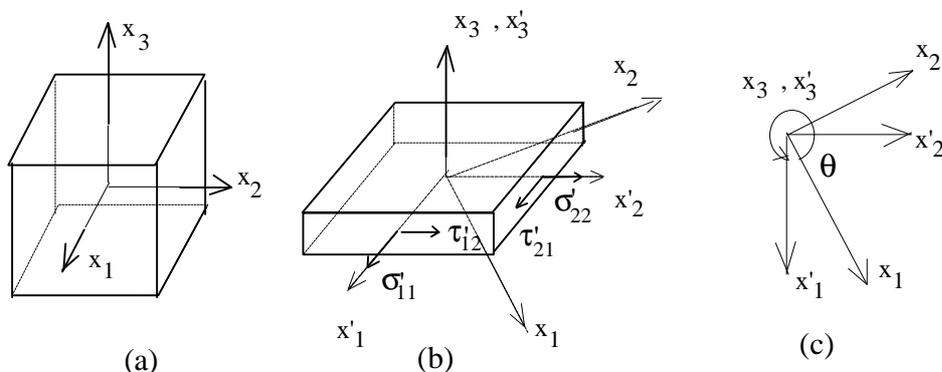


FIGURA 2.26 - a) Sistema de Eixos x_i ; b) Tensões nas Faces com Normais x'_1 e x'_2 ;
c) Ângulo θ de Rotação dos Eixos x'_1 e x'_2

O tensor de tensões, referido ao sistema x'_i , é definido por:

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma_{11}c^2 + 2\sigma_{12}s.c + \sigma_{22}s^2 & (\sigma_{22} - \sigma_{11})s.c + \sigma_{12}(c^2 - s^2) & \sigma_{13}c + \sigma_{23}s \\ & \sigma_{11}s^2 - 2\sigma_{12}s.c + \sigma_{22}c^2 & -\sigma_{13}s + \sigma_{23}c \\ \text{Sim.} & & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Onde $c = \cos\theta$ e $s = \text{sen}\theta$.

Para o tensor de deformações, com $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}\gamma_{ij}$ para $i \neq j$, podem ser obtidas relações equivalentes às estabelecidas na Eq. (2.49) a (2.53) para o tensor de tensões.

As relações definidas nas Eq. (2.49), explicitada na Eq.(2.53) para o caso particular considerado e sua congênere válida para as deformações, podem ser obtidas diretamente

pelas condições de equilíbrio de tensões e compatibilidade de deformações. Assim, seja o elemento infinitesimal de um problema de estado plano, como representado na FIG. 2.27a. As condições de equilíbrio, representadas na FIG. 2.27b, conduzem a:

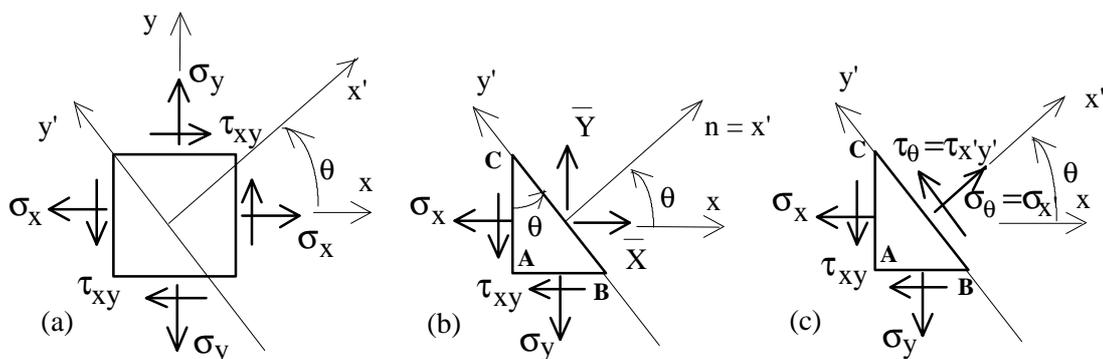


FIGURA 2.27 – a) Estado de Tensões nas Direções x e y ; b) Tensões Resultantes nas Direções x e y na Face BC , Definida pelo Ângulo θ entre a Normal n e o Eixo x ; c) Tensões na Face BC nas Direções $x'=n$ e y'

$$\bar{X} = \sigma_x \cdot l_{n,x} + \tau_{xy} l_{n,y} \quad (2.54a)$$

$$\bar{Y} = \sigma_y \cdot l_{n,y} + \tau_{xy} l_{n,x} \quad (2.54b)$$

Onde \bar{X} e \bar{Y} são as tensões atuantes ao longo da face BC nas direções x e y , $l_{n,x} = \cos\theta$ e $l_{n,y} = \sin\theta$, são os cossenos diretores da normal em relação aos eixos x e y . As componentes do tensor de tensões na face BC , representadas na FIG. 2.27c, são obtidas pela soma das projeções de \bar{X} e \bar{Y} , resultando:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = \sigma_{x'} &= \bar{X} \cdot \cos\theta + \bar{Y} \cdot \sin\theta \\ &= \sigma_x \cdot \cos^2\theta + \sigma_y \cdot \sin^2\theta + 2\tau_{xy} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (2.55a)$$

$$\begin{aligned} \tau_\theta = \tau_{x'y'} &= \bar{Y} \cdot \cos\theta - \bar{X} \cdot \sin\theta \\ &= (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \tau_{xy} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{aligned} \quad (2.55b)$$

Usualmente, considera-se convencionalmente que, numericamente, o ângulo θ é positivo para rotações no sentido contrário aos dos ponteiros do relógio e as tensões normais são consideradas positivas quando de tração. Utilizando as relações trigonométricas apropriadas, as Eq. (2.55) podem ser escritas na forma alternativa:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (2.56a)$$

$$\tau_{\theta} = \tau_{x'y'} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (2.56b)$$

As componentes de tensões na face definida pelo eixo normal y' , inclinado do ângulo $\theta_{y',x} = \theta_{x',x} + \pi/2 = \theta + \pi/2$, podem ser obtidas a partir da Eq. (2.56a), resultando:

$$\begin{aligned} \sigma_{y'} &= \sigma_x \cdot \sin^2 \theta + \sigma_y \cdot \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta - \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2.57)$$

As relações geométricas entre as deformações em um elemento infinitesimal, como representado na FIG. 2.28, permitem a obtenção das deformações referidas aos eixos x' e y' inclinados de um ângulo θ em relação aos eixos x e y .

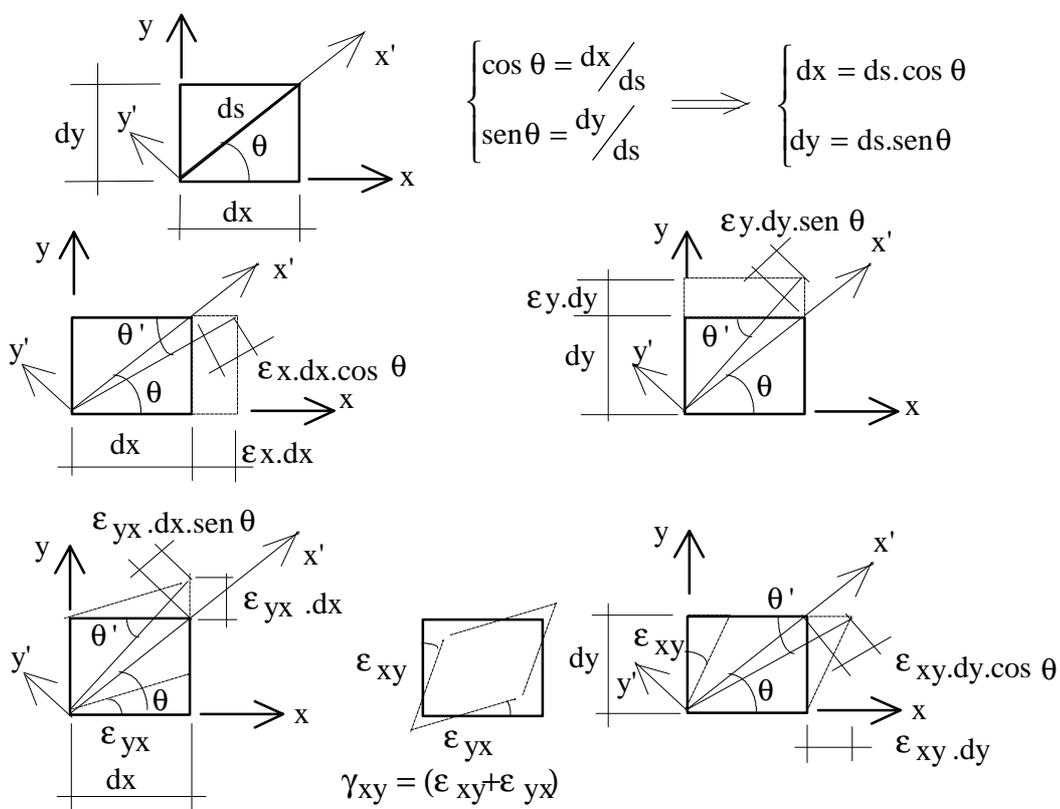


FIGURA 2.28 – Relações Geométricas entre Deformações em Elemento Infinitesimal

As deformações $\varepsilon_{x'}$ são definidas por:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x'} = \varepsilon_{\theta} &= \frac{\varepsilon_x \cdot dx \cdot \cos\theta}{ds} + \frac{\varepsilon_y \cdot dy \cdot \sin\theta}{ds} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{xy} (dx \cdot \sin\theta + dy \cdot \cos\theta)}{ds} = \\ &= \varepsilon_x \cdot \cos^2\theta + \varepsilon_y \cdot \sin^2\theta + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = \\ &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cdot \cos 2\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cdot \sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.58)$$

Na direção y' , com $\theta_{y',x} = \theta_{x',x} + \pi/2 = \theta + \pi/2$, resulta da Eq. (2.58):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{y'} &= \varepsilon_x \cdot \sin^2\theta + \varepsilon_y \cdot \cos^2\theta - \gamma_{xy} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \\ &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cdot \cos 2\theta - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cdot \sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.59)$$

A rotação α do eixo x' , inclinado de um ângulo $\theta_{x',x}$ em relação ao eixo x , devido às deformações, vale:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\varepsilon_x \cdot dx \cdot \sin\theta}{ds} - \frac{\varepsilon_y \cdot dy \cdot \cos\theta}{ds} - \frac{1}{2} \frac{\gamma_{xy} \cdot dx \cdot \cos\theta}{ds} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{xy} \cdot dy \cdot \sin\theta}{ds} \\ &= \varepsilon_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta - \varepsilon_y \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cdot (-\cos^2\theta + \sin^2\theta)\end{aligned}\quad (2.60)$$

De forma semelhante, a rotação β do eixo y' , com $\theta_{y',x} = \theta_{x',x} + \pi/2 = \theta + \pi/2$, vale:

$$\begin{aligned}\beta &= -\frac{\varepsilon_x \cdot dx \cdot \sin\theta}{ds} + \frac{\varepsilon_y \cdot dy \cdot \cos\theta}{ds} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{xy} \cdot dx \cdot \cos\theta}{ds} - \frac{1}{2} \frac{\gamma_{xy} \cdot dy \cdot \sin\theta}{ds} \\ &= -\varepsilon_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \varepsilon_y \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta)\end{aligned}\quad (2.61)$$

O decréscimo resultante do ângulo $x'Oy'$ vale:

$$\begin{aligned}\gamma_{\theta} = \gamma_{x'y'} &= \beta - \alpha = -2 \cdot \varepsilon_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + 2 \cdot \varepsilon_y \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \gamma_{xy} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ &= 2 \cdot (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \gamma_{xy} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ &= (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cdot \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cdot \cos 2\theta\end{aligned}\quad (2.62)$$

Alternativamente, as relações de mudança de sistema de eixos de referência podem ser obtidas com emprego de representação vetorial para os componentes dos tensores de tensão e deformação, na forma:

$$\{\sigma'\} = [T]\{\sigma\} \quad (2.63)$$

$$\{\varepsilon'\} = [T]\{\varepsilon\} \quad (2.64)$$

Onde $\{\sigma'\}$, $\{\sigma\}$ e $\{\varepsilon'\}$, $\{\varepsilon\}$ são as representações vetoriais das componentes dos tensores de tensão e deformação referidos, respectivamente, aos eixos x'_i e x_i . $[T]$ é a matriz de transformação. No caso de problemas de estado plano, os vetores das componentes independentes dos tensores correspondentes são definidos por: $\{\sigma'\} = \{\sigma'_{11} \ \sigma'_{22} \ \tau'_{12}\}^T$, $\{\varepsilon'\} = \{\varepsilon'_{11} \ \varepsilon'_{22} \ \varepsilon'_{12}\}^T$ e $\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \tau_{12}\}^T$, $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{12}\}^T$. A matriz $[T]$ é dada por:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ -\sin\theta \cdot \cos\theta & \sin\theta \cdot \cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

As relações inversas são definidas como:

$$\{\sigma\} = [T]^{-1}\{\sigma'\} \quad (2.66)$$

$$\{\varepsilon\} = [T]^{-1}\{\varepsilon'\} \quad (2.67)$$

Onde:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin\theta \cdot \cos\theta & -\sin\theta \cdot \cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

2.9.7 Transformações da Matriz de Flexibilidade de Material Ortotrópico para Rotações do Sistema de Referência

As relações constitutivas de um dado material ortotrópico, definidas por meio da matriz de flexibilidade nas direções dos eixos principais x_i , como na Eq. (2.40), podem ser obtidas nas direções de um outro sistema de eixos ortogonais x'_i , por meio da transformação:

$$D'_{ij} = D_{mn} \cdot q_{im} \cdot q_{jn} \quad (2.69)$$

Onde D_{ij} e D'_{ij} são os coeficientes da matriz de flexibilidade referidos, respectivamente aos eixos x_i e x'_i . Os coeficiente q_{ij} são dados na TAB. 2.9, sendo obtidos por combinações de produtos dos cossenos diretores definidos na TAB. 2.8, ver LEKHNITSKII (1981).

TABELA 2.9 – Valores de q_{ij} das Expressões de Transformação da Matriz de Flexibilidade

i, j	1	2	3	4	5	6
1	l_{11}^2	l_{12}^2	l_{13}^2	$l_{12}l_{13}$	$l_{13}l_{11}$	$l_{12}l_{11}$
2	l_{21}^2	l_{22}^2	l_{23}^2	$l_{23}l_{22}$	$l_{23}l_{21}$	$l_{22}l_{21}$
3	l_{31}^2	l_{32}^2	l_{33}^2	$l_{33}l_{32}$	$l_{33}l_{31}$	$l_{32}l_{31}$
4	$2l_{31}l_{21}$	$2l_{32}l_{22}$	$2l_{33}l_{23}$	$l_{33}l_{22} + l_{32}l_{23}$	$l_{33}l_{21} + l_{31}l_{23}$	$l_{31}l_{22} + l_{32}l_{21}$
5	$2l_{31}l_{11}$	$2l_{32}l_{12}$	$2l_{33}l_{13}$	$l_{33}l_{12} + l_{32}l_{13}$	$l_{33}l_{11} + l_{31}l_{13}$	$l_{31}l_{12} + l_{32}l_{11}$
6	$2l_{21}l_{11}$	$2l_{12}l_{22}$	$2l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$

No caso particular de o novo sistema de eixos coordenados x'_i ser obtido do sistema x_i , pela rotação de um ângulo θ em relação ao eixo z (x_3), com $x'_3 = x_3$ como representado na FIG. 2.26, os cossenos diretores são definidos pelos correspondentes coeficientes da

matriz da Eq. (2.52). Os valores dos coeficientes q_{ij} não-nulos resultantes, são apresentados na TAB. 2.10, em função do ângulo θ .

TABELA 2.10 – Valores de q_{ij} para Rotação do Sistema x_i de um Ângulo θ em
Relação ao Eixo $z (x_3)$

i, j	1	2	3	4	5	6
1	$\cos^2 \theta$	$\sin^2 \theta$	0	0	0	$\sin \theta \cos \theta$
2	$\sin^2 \theta$	$\cos^2 \theta$	0	0	0	$-\sin \theta \cos \theta$
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	$\cos \theta$	$-\sin \theta$	0
5	0	0	0	$\sin \theta$	$\cos \theta$	0
6	$-2\sin \theta \cos \theta$	$2\sin \theta \cos \theta$	0	0	0	$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta$

Empregando-se, alternativamente, a forma vetorial para as componentes dos tensores de tensão e deformação, as relações constitutivas para o caso geral são definidas com o emprego da matriz de flexibilidade na forma da Eq. (2.31), sendo explicitadas para material ortotrópico pelas Eq. (2.40) e (2.43), para problemas 3D e 2D. Substituindo-se as Eq. (2.66) e (2.67) na expressão geral das relações constitutivas, resulta:

$$[T]^{-1}\{\varepsilon'\} = [D][T]^{-1}\{\sigma'\} \quad (2.70)$$

Pré-multiplicando ambos os lados por $[T]$, resulta:

$$\{\varepsilon'\} = [T][D][T]^{-1}\{\sigma'\} = [D']\{\sigma'\} \quad (2.71)$$

com:

$$[D'] = [T][D][T]^{-1} \quad (2.72)$$

cuja expressão define a matriz de flexibilidade das relações constitutivas no sistema x'_i em função da correspondente matriz no sistema x_i e da matriz de transformação $[T]$ e sua inversa $[T]^{-1}$. Para problemas de estado plano de tensões, as relações constitutivas de interesse no sistema x'_i podem ser escritas como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon'_1 \\ \varepsilon'_2 \\ \gamma'_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{13} \\ D'_{12} & D'_{22} & D'_{23} \\ D'_{13} & D'_{23} & D'_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \tau'_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.73)$$

Onde o tensor $[D']$ é obtido pela Eq. (2.72), a partir do tensor $[D]$ e das matrizes $[T]$ e $[T]^{-1}$, resultando:

$$\begin{aligned} D'_{11} &= D_{11} \cdot c^4 + (2D_{12} + D_{33})s^2 \cdot c^2 + D_{22} \cdot s^4 \\ D'_{22} &= D_{11} \cdot s^4 + (2D_{12} + D_{33})s^2 \cdot c^2 + D_{22} \cdot c^4 \\ D'_{12} = D'_{21} &= (D_{11} + D_{22})s^2 \cdot c^2 + D_{12}(s^4 + c^4) - D_{33} \cdot s^2 \cdot c^2 \\ D'_{33} &= 4(D_{11} + D_{22} - 2D_{12})s^2 \cdot c^2 + D_{33}(c^2 - s^2)^2 \\ D'_{23} = D'_{32} &= -2(D_{11} \cdot s^2 - D_{22} \cdot c^2) \cdot s \cdot c - (2D_{12} + D_{33}) \cdot s \cdot c(c^2 - s^2) \\ D'_{13} = D'_{31} &= -2(D_{11} \cdot c^2 - D_{22} \cdot s^2) \cdot s \cdot c + (2D_{12} + D_{33}) \cdot s \cdot c(c^2 - s^2) \end{aligned} \quad (2.74)$$

Onde $s = \text{sen}\theta$ e $c = \text{cos}\theta$.

Considerando-se a simetria do tensor de constantes elásticas, as relações constitutivas nas direções dos eixos principais definidas na Eq (2.43) podem ser escritas como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ & 1/E_2 & 0 \\ \text{Sim.} & & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.75)$$

Substituindo-se os valores de D_{ij} na Eq. (2.74), resultam:

$$\begin{aligned}
D'_{11} &= \frac{c^4}{E_1} + \left(-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 \cdot c^2 + \frac{s^4}{E_2} \\
D'_{22} &= \frac{s^4}{E_1} + \left(-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 \cdot c^2 + \frac{c^4}{E_2} \\
D'_{12} = D'_{21} &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 \cdot c^2 - \frac{\nu_{12}}{E_1} \\
D'_{33} &= 4 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 \cdot c^2 + \frac{1}{G_{12}} \\
D'_{13} = D'_{31} &= \left[2 \left(-\frac{c^2}{E_1} + \frac{s^2}{E_2} \right) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) (c^2 - s^2) \right] s \cdot c \\
D'_{23} = D'_{32} &= \left[2 \left(-\frac{s^2}{E_1} + \frac{c^2}{E_2} \right) - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) (c^2 - s^2) \right] s \cdot c
\end{aligned} \tag{2.76}$$

Como os coeficientes D'_{13}, D'_{23} e D'_{31}, D'_{32} são não nulos, ocorre um acoplamento entre os efeitos normais e cisalhantes para faces inclinadas em relação aos planos de simetria elástica. Assim, para faces submetidas a um estado de tensões onde atua apenas τ'_{12} , ocorrem, além de deformações cisalhantes, também deformações normais:

$$\begin{aligned}
\gamma'_{12} &= D'_{33} \cdot \tau'_{12} \\
\varepsilon'_1 &= D'_{13} \cdot \tau'_{12} \\
\varepsilon'_2 &= D'_{23} \cdot \tau'_{12}
\end{aligned} \tag{2.77}$$

De forma análoga, se apenas tensão normal é aplicada, por exemplo σ'_1 , resultam:

$$\begin{aligned}
\varepsilon'_1 &= D'_{11} \cdot \sigma'_1 \\
\varepsilon'_2 &= D'_{21} \cdot \sigma'_1 \\
\gamma'_{12} &= D'_{31} \cdot \sigma'_1
\end{aligned} \tag{2.78}$$

Estes efeitos de acoplamento entre os efeitos normais e cisalhantes não estão presentes quando as tensões são aplicadas nas direções dos eixos principais ou ortotrópicos. Em blocos de madeira cujos eixos não coincidam com os eixos principais, estes efeitos são os responsáveis pela distorção, devido a ganho ou perda de umidade. O coeficiente D'_{11} pode ser utilizado como valor estimado do módulo de elasticidade na direção inclinada de um ângulo θ em relação às fibras.

2.9.8 Determinação Experimental das Constantes Elásticas da Madeira

Nas aplicações práticas da madeira nas estruturas é usual a consideração de um modelo simplificado da madeira, no qual se considera o comportamento do material como transversalmente isotrópico, isto é, as diferenças entre as propriedades elásticas de diferentes direções no plano normal à direção das fibras normais são desprezadas. Assim, em problemas de estado plano, o tensor de flexibilidade é definido como:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1/E_L & -v_{NL}/E_N & 0 \\ -v_{LN}/E_L & 1/E_N & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LN} \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Onde L indica a direção das fibras e N indica uma direção genérica normal às fibras.

No ensaio de compressão simples, paralelo às fibras da madeira, como representado na FIG. 2.29a, resultam as seguintes condições de contorno:

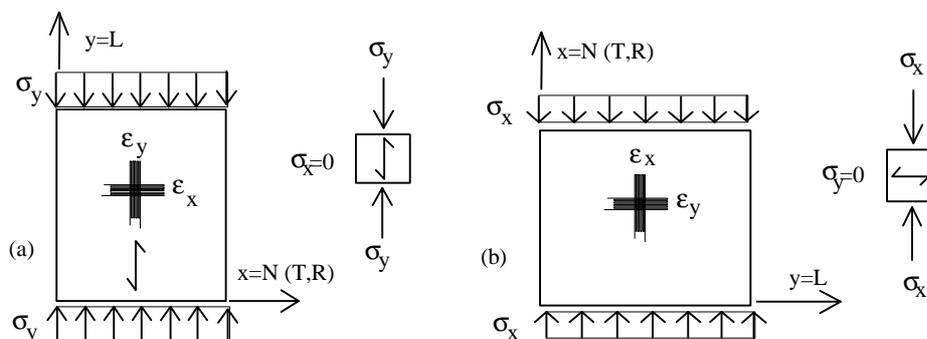


FIGURA 2.29 – Corpo-de-Prova, Posicionamento dos Extensômetros e Tensões Atuantes em Ensaio de Compressão Simples da Madeira: a) Paralelo às fibras; b) Normal às Fibras

$$\begin{cases} \sigma_L = \sigma_y = p_y = P_y/A \\ \sigma_N = \sigma_x = 0 \\ \tau_{NL} = \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (2.80)$$

As relações constitutivas que podem ser estabelecidas são definidas por:

$$\varepsilon_x = \frac{-v_{yx}}{E_y} \sigma_y \text{ ou } \varepsilon_N = \frac{-v_{LN}}{E_L} \sigma \Rightarrow -\sigma_y = \frac{E_y}{v_{yx}} \varepsilon_x \text{ ou } -\sigma_L = \frac{E_L}{v_{LN}} \varepsilon_N \quad (2.81)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} \text{ ou } \varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} \Rightarrow -\sigma_y = E_y \cdot (-\varepsilon_y) \text{ ou } -\sigma_L = E_L \cdot (-\varepsilon_L) \quad (2.82)$$

De forma análoga, no ensaio de compressão normal às fibras, como representado na FIG. 2.29b, resultam as seguintes condições de contorno:

$$\begin{cases} \sigma_L = \sigma_y = 0 \\ \sigma_N = \sigma_x = p_x = P_x/A \\ \tau_{NL} = \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (2.83)$$

As relações constitutivas que podem ser estabelecidas são definidas por:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} \text{ ou } \varepsilon_N = \frac{\sigma_N}{E_N} \Rightarrow -\sigma_x = E_x \cdot (-\varepsilon_x) \text{ ou } -\sigma_N = E_N \cdot (-\varepsilon_N) \quad (2.84)$$

$$\varepsilon_y = \frac{-v_{xy}}{E_x} \sigma_x \text{ ou } \varepsilon_L = \frac{-v_{NL}}{E_N} \sigma_N \Rightarrow -\sigma_x = \frac{E_x}{v_{xy}} \varepsilon_y \text{ ou } -\sigma_N = \frac{E_N}{v_{NL}} \varepsilon_L \quad (2.85)$$

Assim, a partir do ensaio de compressão paralela e normal às fibras e com o auxílio de extensômetros elétricos dispostos como na FIG. 2.29, é possível obter diretamente os valores de E_L , E_L/v_{LN} e E_N , E_N/v_{NL} , pelas correlações representadas na FIG. 2.30.

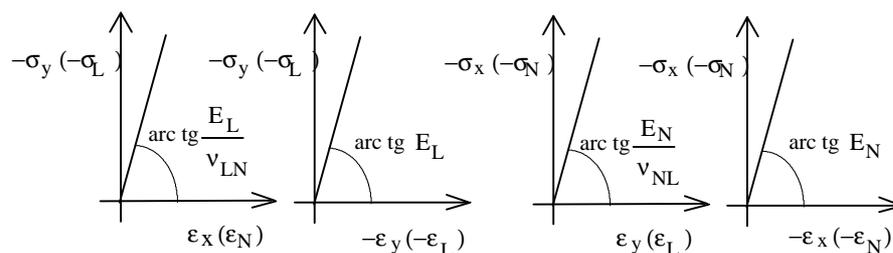


FIGURA 2.30 – Gráficos Tensão x Deformação e Correspondentes Constantes Elásticas Obtidos em Ensaio de Compressão Paralela e Normal às Fibras

Para determinação do módulo de cisalhamento G_{LN} , a alternativa mais direta consiste em obter G_{LN} pela relação $G_{LN} = \tau_{LN}/\gamma_{LN}$, com os valores da distorção angular γ_{LN} e da tensão cisalhante τ_{LN} sendo obtidos por meio de ensaio de elemento prismático sob tensão uniaxial, com as fibras da madeira inclinadas em relação às direções das tensões principais e uso de extensômetros elétricos, como representado na FIG. 2.31.

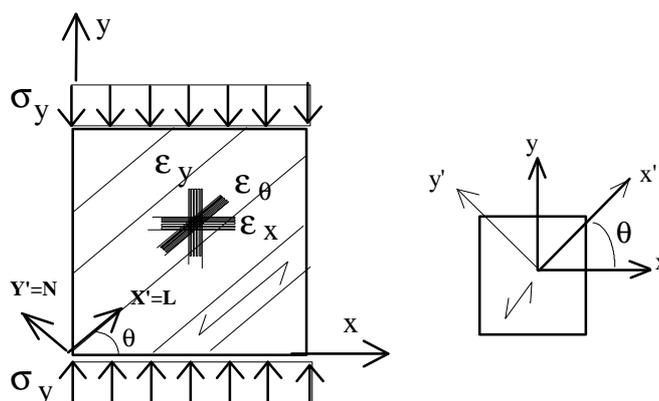


FIGURA 2.31 – Esquema de Ensaio de Compressão Simples Inclinada em Relação às Fibras da Madeira para Determinação do Módulo de Cisalhamento G_{LN}

Nas condições representadas na FIG. 2.30, são conhecidas as tensões aplicadas σ_y e $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$. Com o emprego dos extensômetros elétricos podem ser obtidas as variações das deformações lineares ϵ_x , ϵ_y e $\epsilon_\theta = \epsilon_L$, para uma dada variação de σ_y .

Conhecidas as deformações ϵ_x , ϵ_y e ϵ_θ , pode-se obter γ_{xy} com o emprego da Eq. (2.58), na forma:

$$\gamma_{xy} = (\epsilon_\theta - \epsilon_x \cdot \cos^2 \theta - \epsilon_y \cdot \sin^2 \theta) / (\sin \theta \cdot \cos \theta) \quad (2.86)$$

A partir dos valores das deformações ϵ_x , ϵ_y e $\gamma_{xy}/2$ e das tensões σ_y , σ_x e τ_{xy} , podem ser obtidos os correspondentes valores em relação aos eixos principais, definidos pelas deformações ϵ_L , ϵ_N e $\gamma_{LN}/2$ e tensões σ_L , σ_N e τ_{LN} , com emprego das Eq. (2.63) a (2.65).

No caso de $\theta = \pm \pi/4$, $\cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 0$ e as operações anteriores ficam simplificadas, resultando da Eq. (2.62):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma_{x'y'} &= \frac{1}{2} \gamma_{LN} = (\epsilon_y - \epsilon_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \Rightarrow \\ \gamma_{LN} &= 2(\epsilon_y - \epsilon_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (2.87)$$

De modo semelhante, da Eq. (2.55b) resulta:

$$\tau_{x'y'} = \tau_{LN} = (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (2.88)$$

O valor de G_{LN} fica definido como:

$$G_{LN} = \frac{\tau_{LN}}{\gamma_{LN}} = \frac{(\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{2(\epsilon_y - \epsilon_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} = \frac{\sigma_y / 2}{(\epsilon_y - \epsilon_x)} \quad (2.89)$$

3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Inicialmente foi realizado um conjunto de ensaios de ligações visando uma avaliação preliminar do comportamento resistente de ligações coladas associadas a diferentes elementos mecânicos de pinos. A partir da análise dos resultados obtidos nesses ensaios, definiu-se um programa de ensaios experimentais para avaliar o comportamento resistente de ligações de peças de madeira coladas lateralmente em áreas reduzidas com três diferentes alternativas de elementos mecânicos adicionais. A seguir foram efetuadas avaliações experimentais das tensões em pontos da linha adesiva de ligações paralelas e avaliações teóricas das distribuições de tensões na linha adesiva em ligações paralelas e normais, por meio de análises numéricas com o método dos elementos finitos. Utilizou-se também um modelo analítico desenvolvido para ligações coladas submetidas à compressão que permite, a partir de parâmetros obtidos experimentalmente, uma avaliação aproximada da capacidade resistente das ligações e da distribuição de tensões cisalhantes na superfície adesiva.

Na avaliação da resistência e rigidez de ligações de peças de madeira coladas lateralmente em áreas reduzidas associadas a elementos mecânicos de pinos, foram realizados ensaios de compressão em corpos-de-prova de ligações simétricas com três elementos. Nas ligações paralelas, as peças componentes dos corpos-de-prova foram alinhadas paralelamente à direção de aplicação da carga. Nas ligações normais, as peças laterais foram posicionadas ortogonalmente à direção da peça central e à de aplicação da carga.

A parte experimental deste trabalho foi realizada com madeira oriunda de florestas plantadas do gênero *Eucalyptus*. As ligações coladas foram executadas com emprego de mistura adesiva à base de resorcinol-formaldeído, de nome comercial Cascophen RS 216M, da Alba Química S.A.

A confecção dos corpos-de-prova foi realizada na oficina do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LPFMM/DEF/UFV), no qual foram realizados os ensaios de caracterização das propriedades da madeira e parte dos ensaios de ligações. Uma outra parte dos ensaios de ligações foi conduzida no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas do Departamento de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (LAEES/DEES/UFMG).

3.2 Avaliação Preliminar da Resistência de Ligações Coladas

Com o objetivo de obter uma avaliação preliminar de ligações coladas associadas a elementos mecânicos de pinos, em relação à resistência e adequação do processo de fabricação, foram confeccionados e submetidos a ensaios de compressão, corpos-de-prova com três peças de madeira de *Eucalyptus saligna* com as seguintes ligações:

- Colada e cavilhada (CoCa).
- Colada, cavilhada e pregada (CoCaPr).
- Colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa).

- Colada e parafusada (CoPa).
- Pregada (Pr).
- Parafusada (Pa).
- Cavilhada (Ca).

No Anexo A apresenta-se a descrição dos materiais, dimensões dos corpos-de-prova, disposição dos elementos mecânicos e metodologia dos ensaios realizados.

3.3 Propriedades da Madeira

3.3.1 Introdução

Na avaliação experimental do comportamento resistente de ligações coladas em áreas reduzidas associadas a elementos mecânicos de pinos, foi utilizada madeira do gênero *Eucalyptus*. A madeira foi adquirida da Aracruz Produtos de Madeira S.A., sob nome comercial Lyptus, separadas em paletes classificados comercialmente como madeira classe 1 e selecta, com pelo menos duas espécies identificadas: *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. O lote inicialmente disponível tinha cerca de 600 tábuas e volume de 9 m³ de madeira seca em estufa, com espessuras de 25 mm e 32 mm, largas e comprimentos variados.

A madeira, embalada nos paletes da serraria de origem, permaneceu no pátio externo do LPFMM/DEF/UFV por cerca de seis meses. Em função da constatação da existência de elevada variação da densidade aparente das tábuas da madeira adquirida, da conhecida correlação existente entre a densidade e as resistências mecânicas e da importância da relação da densidade com a eficiência das ligações, decidiu-se efetuar todo o estudo de avaliação do comportamento e de caracterização da resistência da madeira e das ligações, a partir da divisão da madeira em duas faixas de densidades, uma de menor e outra de maior densidade.

Com esta finalidade, efetuou-se a determinação da densidade aparente de cada uma das tábuas, as quais foram armazenadas a seguir em um estaleiro coberto. Como a densidade aparente das tábuas variava de cerca de 500 kg/m^3 até cerca de 1.000 kg/m^3 , as tábuas foram separadas em oito diferentes sub-lotes com variação de 50 kg/m^3 , indo de 550 a 950 kg/m^3 , com descarte das tábuas com densidade fora dessa faixa. As duas diferentes faixas de densidade foram definidas pelos limites de 550 a 750 kg/m^3 para a de menor densidade e de 750 a 950 kg/m^3 para a de maior densidade.

Como não existe uma definição normalizada explícita, a madeira da faixa de menor densidade pode ser considerada como sendo de baixa a média densidade e a de maior densidade como sendo de média a alta densidade. Para fins de simplificação da nomenclatura em geral e dos corpos-de-prova em particular, a madeira das duas referidas faixas foram designadas, respectivamente, de baixa ou menor densidade (BD) e alta ou maior densidade (AD).

Após a separação das tábuas em faixas de densidade, foi efetuada uma avaliação da resistência e do módulo de elasticidade da madeira na compressão paralela, com emprego de corpos-de-prova de seção quadrada, com espessura delgada igual à da tábua de origem, após a operação de aparelhamento e comprimento igual a três vezes a espessura. Com o objetivo de melhor avaliar as correlações existentes entre a densidade aparente e as propriedades de resistência mecânica da madeira, os corpos-de-prova foram obtidos de quatro tábuas selecionadas aleatoriamente em cada diferente faixa de 50 kg/m^3 de densidade, para a confecção dos corpos-de-prova.

Após a avaliação do comportamento na compressão paralela, foram confeccionados os corpos-de-prova para os ensaios de avaliação das propriedades da madeira e do comportamento resistente das ligações coladas. Após a realização de cada conjunto ou série de ensaios, foi retirada uma amostra de cada corpo-de-prova para a determinação da densidade aparente e do teor de umidade. Os resultados das propriedades mecânicas foram corrigidos para o teor de umidade de referência de 12%.

Os ensaios de determinação das propriedades da madeira e das ligações coladas foram conduzidos segundo os preceitos básicos da NBR-7190/1997. Entretanto, devido à falta de normalização de alguns ensaios, à elevada variabilidade da densidade aparente existente no lote de madeira adquirido e à disponibilidade de máquinas de ensaio que permitem a aplicação de carregamento com controle das deformações, alguns procedimentos foram adaptados, visando uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nos comportamentos estudados.

A adaptação mais relevante foi no modo de aplicação do carregamento nos ensaios realizados, tendo-se utilizado, com exceção de parte dos ensaios das ligações coladas paralelas, carregamentos com controle do incremento das deformações, com taxa constante ajustada de modo a se obter uma duração do ensaio entre três a oito minutos.

3.3.2 Propriedades Avaliadas

Os ensaios de caracterização das propriedades da madeira foram realizados no LPFMM/DEF/UFV. Com o objetivo de avaliar as correlações existentes entre a densidade aparente e as propriedades de resistência mecânica da madeira, foram selecionadas aleatoriamente três tábuas em cada diferente faixa de densidade para a confecção dos corpos-de-prova, totalizando 24 corpos-de-prova para cada propriedade, sendo 12 obtidos da madeira de menor densidade e outros 12 da madeira de maior densidade.

Foram realizados ensaios de caracterização das seguintes propriedades de resistência da madeira:

- Compressão paralela às fibras.
- Compressão normal às fibras.
- Cisalhamento paralelo às fibras.
- Tração paralela às fibras.
- Cisalhamento na lâmina adesiva, paralelo às fibras.

- Cisalhamento na lâmina adesiva com as fibras da madeira normais entre si.
- Cisalhamento na lâmina adesiva, com as fibras das peças de madeira com inclinações variáveis entre si.
- Tração normal à lâmina de cola.

Foi caracterizado o módulo de elasticidade da madeira, na compressão paralela às fibras e na compressão normal às fibras. Nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade na compressão paralela foram utilizados corpos-de-prova delgados, com lado igual à espessura das tábuas de origem. Na caracterização da resistência ao cisalhamento da madeira, da resistência e do módulo de elasticidade na compressão normal, foram empregados corpos-de-prova obtidos da colagem de duas peças retiradas da mesma tábua de origem.

Na avaliação do comportamento resistente ao cisalhamento de juntas coladas com diferentes inclinações relativas das peças ligadas, foram confeccionados corpos-de-prova retirados de outras 12 tábuas selecionadas aleatoriamente da madeira de menor densidade. De cada tábua, foram confeccionados corpos-de-prova de cisalhamento com inclinações relativas de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° , com as fibras do elemento de menor comprimento, que recebe a carga do dispositivo móvel do ensaio, paralelas à força aplicada, enquanto as fibras do elemento de maior comprimento foram sendo inclinadas gradativamente para os diferentes corpos-de-prova.

Nos ensaios de cisalhamento de juntas coladas, em função da mobilização de deformações crescentes para inclinações mais acentuadas entre as peças ligadas, a resistência da junta foi definida pela tensão média correspondente a uma deformação residual de 0,2%, obtida da curva tensão x deformação e a partir da reta de correlação definida pelo trecho compreendido entre 10% e 50% da resistência máxima.

A resistência à compressão normal foi obtida de forma semelhante, utilizando-se como resistência máxima o valor da tensão do final do ensaio, interrompido quando o crescimento da força aplicada ficava muito reduzido.

3.3.3 Resistência Característica Estimada da Madeira

A NBR 7190/97, em seu Anexo B, “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, estabelece que na investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos, cada lote não deve ter volume superior a 12 m³, com número mínimo de corpos-de-prova para a caracterização das propriedades da madeira sendo igual a seis para caracterização simplificada de espécies usuais e 12 para caracterização mínima de espécies pouco conhecidas.

Demonstra-se, ver Anexo F, que o intervalo de confiança da estimativa do valor médio da população (μ) pelo valor médio de uma amostragem (\bar{x}), para uma distribuição normal, é função do tamanho da amostra e do desvio padrão da população. Assim, para um coeficiente de variação de 15% e intervalos de confiança de 90% ou de 95% são necessários, respectivamente, 24 ou 35 resultados para que se possa assumir que $\mu = \bar{x}$.

Neste trabalho obteve-se, para cada propriedade estudada, o valor da resistência característica estimada ($f_{k,est}$), por meio da expressão:

$$f_{k,est} = K_E \cdot \bar{x} \quad (3.01)$$

Onde K_E é o coeficiente da relação entre a resistência característica estimada ($f_{k,est}$) da população e a média amostral, obtido a partir dos resultados de ensaios de n amostras aleatórias de média (\bar{x}) e desvio padrão (S), valendo:

$$K_E = 1 - 1,645 \cdot K_{\sigma,est} (S / \bar{x}) \quad (3.02)$$

Com as seguintes considerações adicionais:

- i) Ocorrência de distribuição normal para as resistências;
- ii) Intervalo de confiança de $(1-\alpha)$ para a média amostral (\bar{x}) em relação à média da população (μ), com relação entre α e número de resultados disponíveis n dado por:

$$2 \cdot Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq 2 \cdot d_{\mu} \quad (3.03)$$

Onde $Z_{\alpha/2}$ é a abscissa da curva normal padrão associada ao intervalo de confiança $(1-\alpha)$, σ é o desvio padrão da população e d_i é o erro amostral da média, definido pelo máxima diferença que se admite entre $\hat{\mu}$ e \bar{x} . Para um intervalo de confiança de $1-\alpha = 95\%$ ($\alpha/2 = 2,5\%$), $Z = 1,96$. Para $1-\alpha = 90\%$ ($\alpha/2 = 5\%$), $Z = 1,645$;

iii) Obtenção do desvio padrão estimado da população (σ_{est}) pela expressão:

$$\sigma_{est} = S \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2}} = K_{\sigma,est} \cdot S \quad (3.04)$$

Onde $K_{\sigma,est} = \sqrt{(n-1)/\chi^2}$ é o coeficiente da relação entre o desvio padrão estimado da população (σ_{est}) o desvio padrão amostral (S), χ^2 é a abscissa associada à área acumulada superior da curva de distribuição qui-quadrado, com $P(\chi^2) = 1-\beta$, sendo β a probabilidade de insucesso ($\sigma < \sigma_{est}$), para $\phi = n-1$ graus de liberdade, sendo n o número de ensaios da amostra.

Os valores característicos estimados neste trabalho foram obtidos com $\beta = 50\%$, considerando-se um coeficiente de variação da amostra $S/\bar{x} \geq 0,1$ e a igualdade da média da população (μ) e da média amostral (\bar{x}), com margens de erro função do número de ensaios realizados, como definido na Eq. (3.03). Conseqüentemente, para um número reduzido de ensaios, tais valores devem ser entendidos como preliminares e obtidos apenas para efeitos de comparação. Na TAB. 3.1 são listados valores de χ^2 e $K_{\sigma,est}$, para $\beta = 0,5$ e diversos $\phi = n-1$.

TABELA 3.1 – Valores de χ^2 e $K_{\sigma,est}$, para diversos valores de $\phi = n-1$

$\phi = n-1$	5	10	11	12	13	14	15	16	17	18
χ^2	4,531	9,342	10,34	11,34	12,34	13,34	14,34	15,34	16,34	17,34
$K_{\sigma,est}$	1,05	1,035	1,031	1,029	1,026	1,024	1,023	1,021	1,02	1,019
$\phi = n-1$	19	20	21	22	23	25	30	40	50	100
χ^2	18,34	19,34	20,34	21,34	22,34	24,34	29,34	39,34	49,33	99,33
$K_{\sigma,est}$	1,018	1,017	1,016	1,015	1,015	1,013	1,011	1,008	1,007	1,003

3.4 Resistência e Rigidez Experimental de Ligações Coladas

3.4.1 Introdução

Na caracterização da resistência de ligações coladas associadas a elementos mecânicos de pinos, os corpos-de-prova foram confeccionados com emprego de três diferentes tratamentos:

- Colado e cavilhado (CoCa).
- Colado e parafusado (CoPa).
- Colado, cavilhado e parafusado (CoCaPa).

Foi utilizado adesivo comercial Cascophen M-216, da Alba Química S. A. Nas ligações cavilhadas, foram empregadas cavilhas de madeira de *Hymenaea spp.*, popularmente conhecida como jatobá, com diâmetro nominal de 22 mm, partidas e coladas. As ligações coladas e parafusadas foram realizadas com emprego de parafusos ou barras rosqueadas de aço com diâmetro de 12,5 mm ou 16,0 mm. Nas ligações coladas, cavilhadas e parafusadas foram utilizados além das cavilhas, parafusos de aço de 8,0 mm ou de 9,5 mm dispostos próximo ao contorno da área colada.

3.4.2 Corpos-de-Prova dos Ensaio Iniciais

A avaliação da resistência das ligações foi efetuada por meio de ensaios de compressão de corpos-de-prova simétricos, com três peças componentes de madeira, para ligações paralelas e ligações normais. Nas ligações paralelas as três peças foram alinhadas entre si, com as fibras da madeira paralelas à direção do carregamento, como representado na FIG. 3.1. Nas ligações normais, as peças laterais foram posicionadas ortogonalmente à peça central, com o carregamento tendo sido aplicado na direção das fibras da peça central, como representado na FIG. 3.2a.

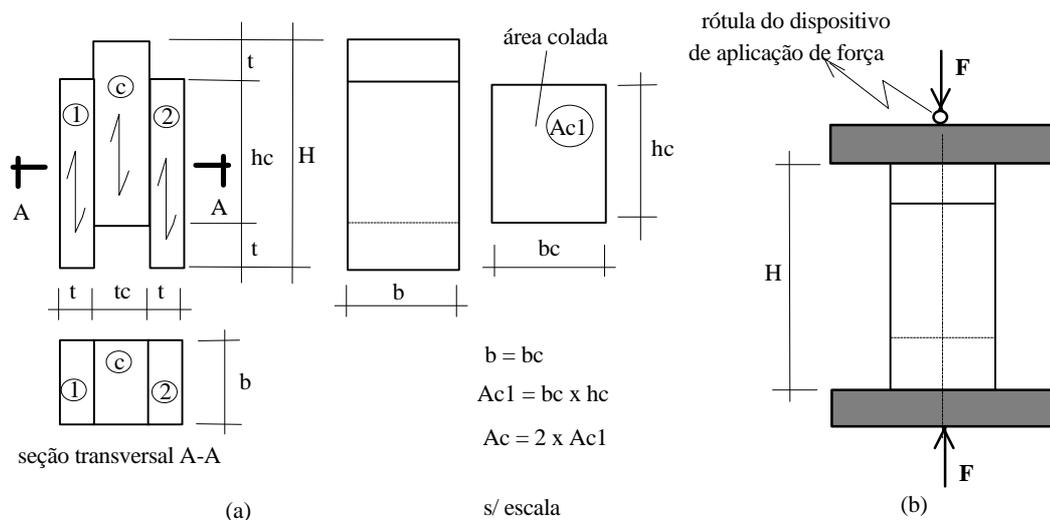


FIGURA 3.1 - a) Geometria dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Ligações Coladas Paralelas, com Três Elementos Alinhados; b) Esquema dos Ensaio

Nos ensaios de avaliação das rigidezes das ligações, foram utilizados relógios comparadores em duas faces opostas como representado na FIG. 3.2.

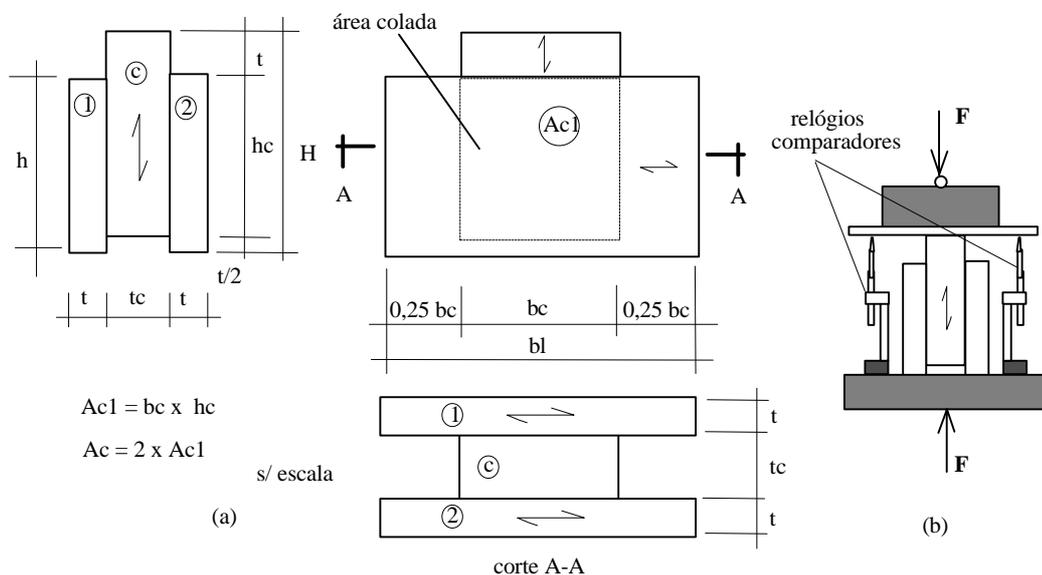


FIGURA 3.2 - a) Geometria dos Corpos-de-Prova para Ensaio de Ligações Coladas Normais; b) Esquema dos Ensaio com Relógios Comparadores Dispostos em Duas Faces Opostas

Os corpos-de-prova foram confeccionados com as seguintes dimensões nominais: espessura das peças laterais de nominal (t) de 24 mm, espessuras das peças centrais (t_c) de 24 mm, 30 mm e 48 mm e larguras das peças centrais (bc) com de 72 mm, 96 mm, 120 mm e 144 mm, correspondendo, respectivamente, às relações bc/t de 3, 4, 5 e 6.

Nas ligações paralelas, foram utilizadas para a altura da lâmina adesiva (hc) relações hc/bc de 1,0 e 1,5 conforme TAB. 3.2. Nas ligações normais, a altura da lâmina adesiva (hc) foi igual à largura da peça central, conforme a TAB. 3.3. Os corpos-de-prova foram confeccionados por série $tc/bc/hc$. As diferentes relações bc/t e hc/t utilizadas foram estabelecidas com o objetivo de avaliar, na faixa de interesse, a variação da resistência da ligação adesiva em relação à resistência da peça central ou das peças laterais.

TABELA 3.2 – Dimensões dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas Paralelas

Dimensões relativas			Dimensões nominais (mm)	
bc/t	hc/bc	(hc/t)	bc (mm)	hc (mm)
3	1	3	72	72
3	1,5	4,5	72	108
4	1	4	96	96
4	1,5	6	96	144
5	1	5	120	120
5	1,5	7,5	120	180
6	1	6	144	144
6	1,5	9	144	216

TABELA 3.3 – Dimensões dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas Normais

Dimensões relativas			Dimensões nominais (mm)	
bc/t	hc/bc	(hc/t)	bc (mm)	hc (mm)
3	1	3	72	72
4	1	4	96	96
5	1	5	120	120
6	1	6	144	144

Foram confeccionados dois corpos-de-prova para cada geometria, espessura t_c , tipo de elemento mecânico e faixa de densidade da madeira, totalizando 288 ligações paralelas e 144 ligações normais. Nos corpos-de-prova com $bc = hc = 72$ mm, não foi possível o emprego simultâneo de cavilha e parafusos, devido às reduzidas dimensões, sendo os corpos-de-prova correspondentes apenas colados (Co).

Nas FIG. 3.3 a 3.6, estão representados os corpos-de-prova de ligações coladas com os diferentes elementos mecânicos para, respectivamente, $bc = hc$ (mm): 72, 96, 120 e 144.

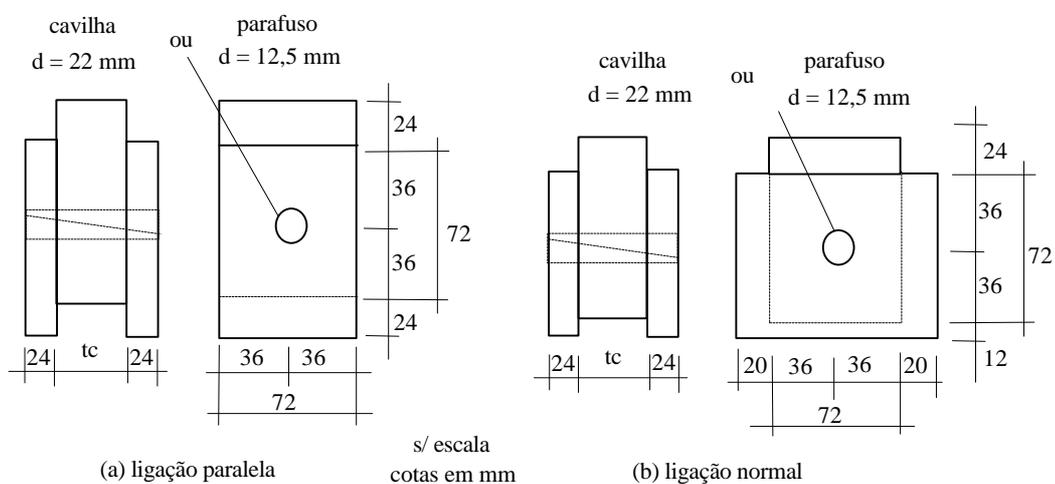


FIGURA 3.3 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para $bc = hc = 72$: a) Paralelas; b) Normais

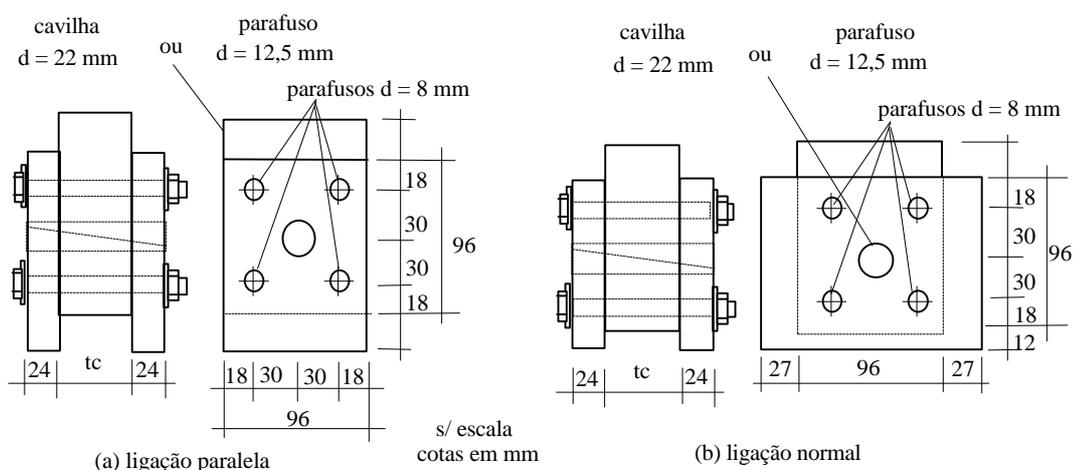


FIGURA 3.4 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para $bc/hc = 96$: a) Paralelas; b) Normais

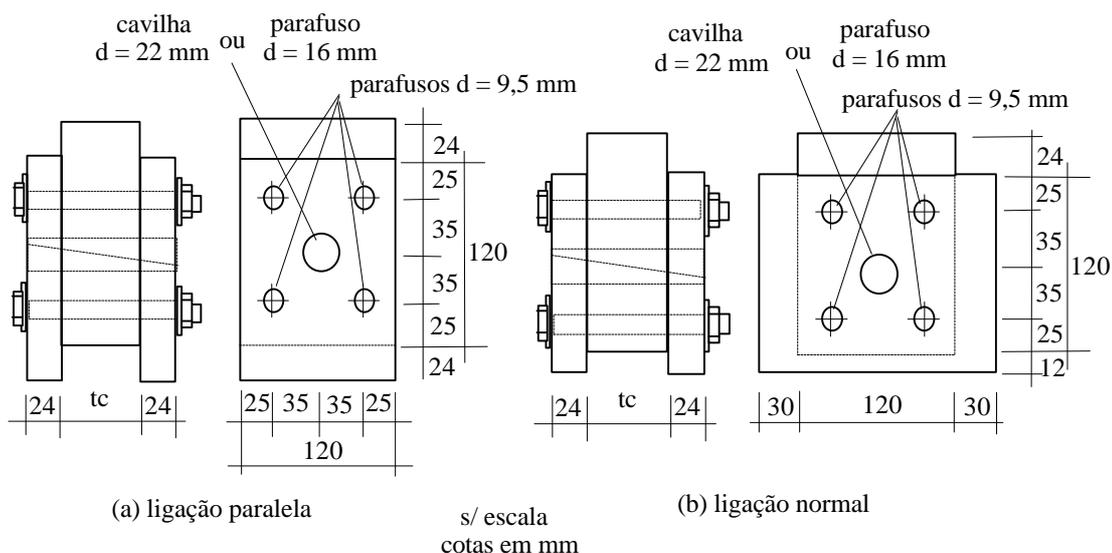


FIGURA 3.5 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para $bc = hc = 120$: a) Paralelas; b) Normais

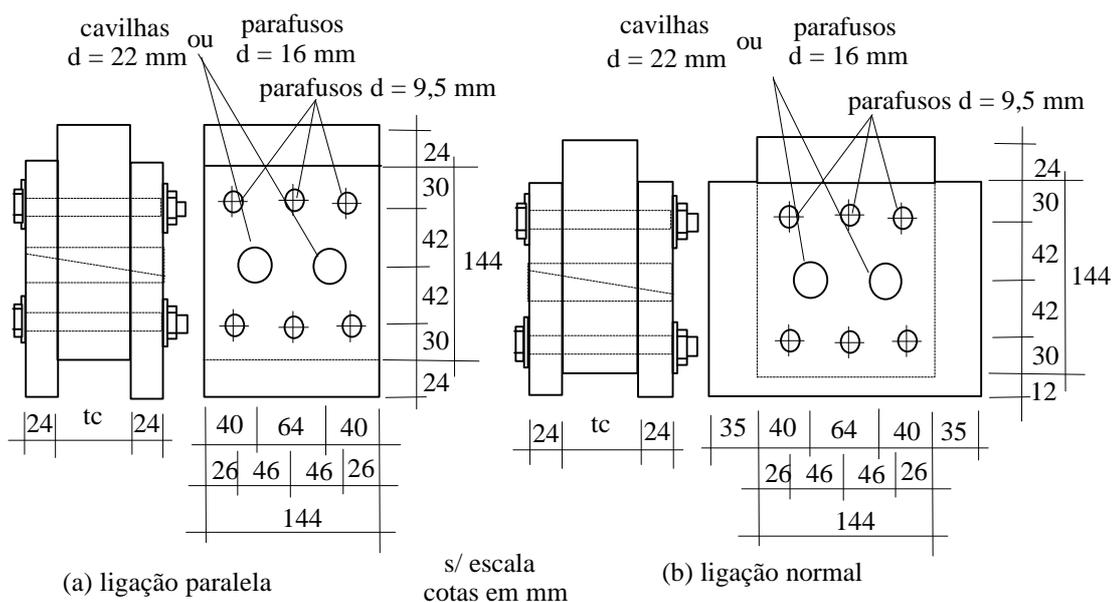


FIGURA 3.6 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para $bc = hc = 144$: a) Paralelas; b) Normais

Nas FIG. 3.7 e 3.8, estão representados os corpos-de-prova das ligações coladas paralelas associadas com elementos mecânicos, respectivamente, para as seguintes dimensões de bc/hc , com $hc = 1,5 bc$: 72/108, 96/144, 120/180 e 144/216.

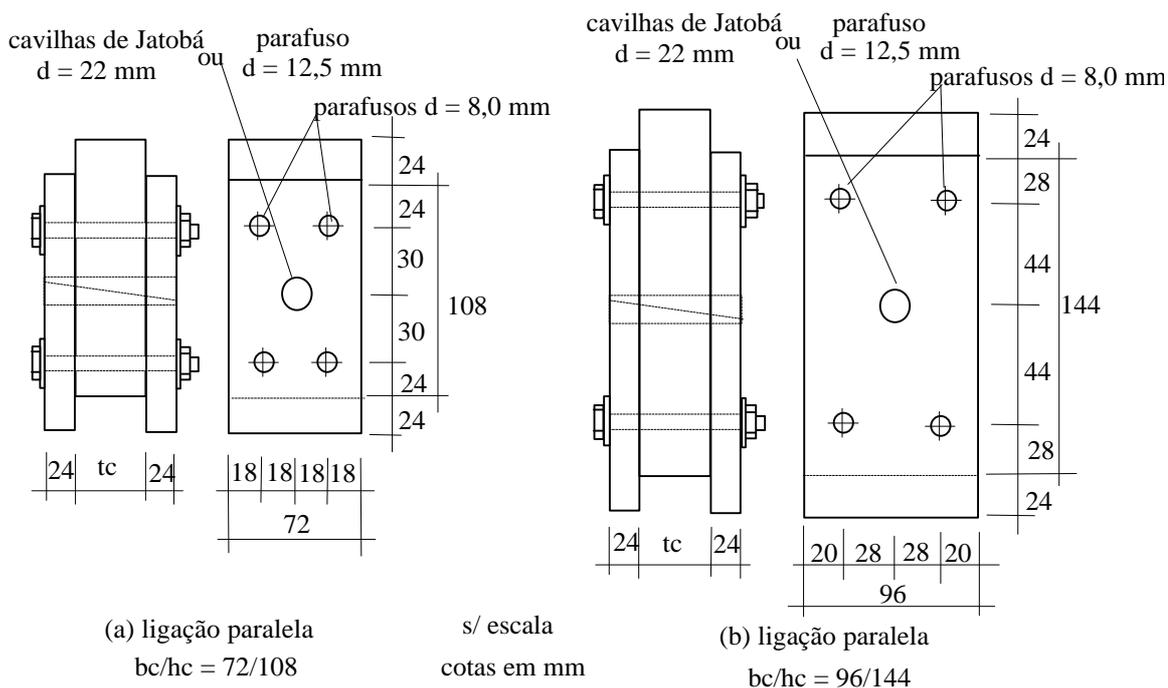


FIGURA 3.7 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para Relações bc/hc: a) 72/108; b) 96/144

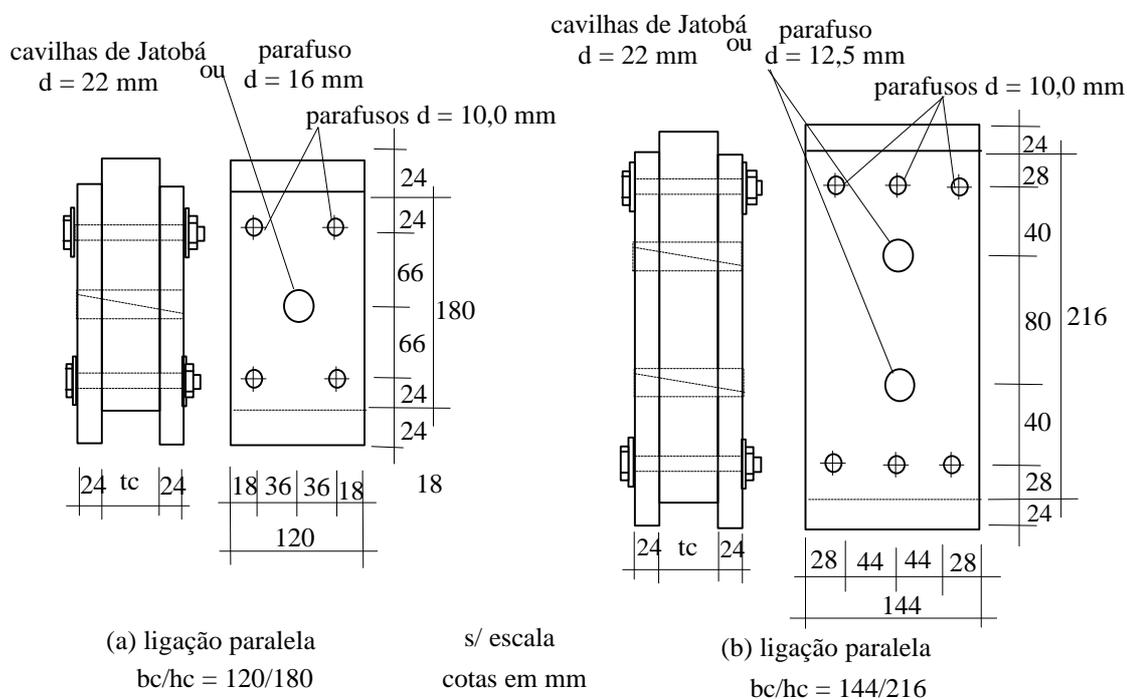


FIGURA 3.8 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova das Ligações Coladas, para Relações bc/hc: a) 120/180; b) 144/216

3.4.3 Corpos-de-Prova dos Ensaio Complementares

Com o objetivo de se obter um maior número de resultados de resistência e avaliar a rigidez das ligações coladas, confeccionou-se um conjunto complementar de corpos-de-prova, com dimensões $b_c = h_c = 120$ mm. Para cada tipo de ligação e para cada espessura de peça central, foram confeccionados cinco corpos-de-prova paralelos e seis normais, totalizando, respectivamente 45 corpos-de-prova paralelos e 54 normais.

Para uma avaliação preliminar da influência de momentos de torção na lâmina adesiva, no comportamento das ligações coladas, parte dos ensaios destes corpos-de-prova foi realizada com aplicação de força excêntrica. Para cada tipo de ligação e espessura de peça central, foram ensaiados dois corpos-de-prova de ligações paralelas e dois normais.

A partir da análise dos resultados dos ensaios anteriores, verificou-se a ocorrência de forte interferência da resistência e rigidez à compressão normal das peças laterais, nos ensaios das ligações coladas normais. Para avaliar esta influência foram realizados ensaios, com duas repetições para cada tratamento, em uma série especial de corpos-de-prova, confeccionados com madeira de menor densidade, espessura da peça central $t_c = 30$ mm, dimensões $b_c = h_c = 120$ mm e comprimento das peças laterais $b_l = 360$ mm, como representado na FIG. 3.9.

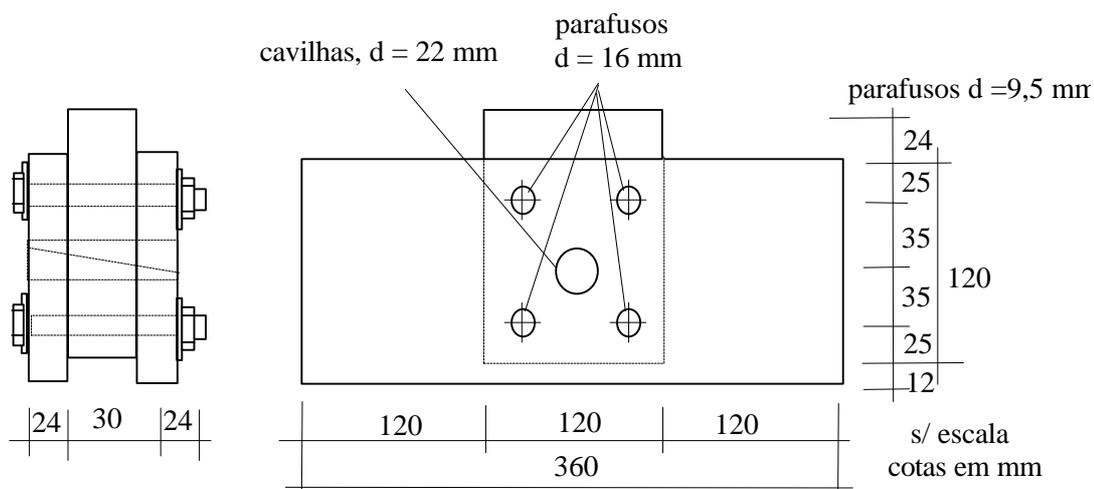


FIGURA 3.9 - Geometria e Disposição dos Elementos Mecânicos dos Corpos-de-Prova de Ligações Coladas Normais, com $b_l = 360$ mm

3.4.4 Métodos de Ensaio

Ligações coladas paralelas

Os ensaios iniciais de avaliação da resistência de ligações coladas paralelas foram realizados com aplicação de força de compressão centrada crescente, por séries de corpos-de-prova com mesmas dimensões bc/hc . Foi utilizada máquina universal de ensaio de 400 kN do LPFMM/DEF/UFV, com controle de incremento de força e com velocidade ajustada de forma a obter a ruptura do corpo-de-prova entre 3 e 8 minutos.

Os ensaios complementares de corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm foram efetuados no LAEES/DEES/UFMG em máquina universal de ensaio com controle eletrônico, com capacidade de 300 kN e carregamentos com controle de deformações. Nestes ensaios, os resultados dos deslocamentos da máquina de ensaio foram ajustados, por meio de equações de correlações, com os resultados de ensaios realizados com emprego de transdutores de deslocamentos, construídos com extensômetros elétricos. Nos ensaios das ligações com força excêntrica foi utilizada uma excentricidade $e = bc / 6 = 20$ mm.

A rigidez de cada ligação foi obtida da curva força x deslocamento, pelo coeficiente angular da reta de correlação do trecho entre 10% e 50% da força máxima aplicada ou resistida pela ligação durante a realização do ensaio. Nas ligações sob força centrada, em função das diferenças observadas, foram avaliadas também as rigidezes para o trecho entre 20% e 50% da força máxima, visando ampliar a eliminação da influência do trecho inicial, considerado de acomodação do corpo-de-prova e dos dispositivos de carregamento utilizados nos ensaios.

Ligações coladas normais

Os ensaios de avaliação das resistências das ligações coladas normais foram realizados sequencialmente por tipo de ligação e em ordem crescente de dimensões bc/hc dos corpos-de-prova. Inicialmente, foram ensaiados os corpos-de-prova de madeira de menor densidade, de ligações coladas e cavilhadas, com emprego de máquina universal

de ensaios de 400 kN do LPFMM/DEF/UFV, com controle de força e sem medições das deformações. Com o crescimento das dimensões dos corpos-de-prova, detectou-se a ocorrência de ductilidade no processo de ruptura, com estufamento da parte inferior das peças laterais, indicando o esgotamento da capacidade resistente e escoamento das peças laterais por compressão normal. Em alguns ensaios ocorreram deslocamentos relativos crescentes entre as peças de madeira, para forças aplicadas mais elevadas.

A partir da constatação desses fenômenos, decidiu-se pelo monitoramento das deformações e os demais ensaios das séries iniciais de ligações coladas normais foram realizados em máquinas universais de ensaios com controle eletrônico. Inicialmente, utilizou-se a máquina de 100 kN do LPFMM/DEF/UFV, com o carregamento sendo aplicado com taxa de deslocamento constante e medição dos deslocamentos por meio do extensômetro embutido no equipamento. Nestes ensaios o comportamento das ligações normais foi monitorado por meio de gráficos força x deslocamento traçados continuamente pelo equipamento em tempo real.

A força resistente máxima da ligação foi definida pela força máxima aplicada ao corpo-de-prova até a ocorrência de ruptura da ligação ou do escoamento do conjunto, detectado quando o crescimento da força tornava-se reduzido em relação ao incremento dos deslocamentos. Em alguns ensaios foi atingido o limite de força da máquina.

A resistência da ligação foi definida pelo valor convencional $F_{0,2\%}$, correspondente à deformação específica residual de 0,2%, sendo obtida no gráfico força x deformação específica, pela interseção da curva obtida no ensaio com a reta paralela à reta de correlação do trecho inicial de carregamento, compreendido entre 10% e 50% da força máxima aplicada, deslocada de 0,2%. O comprimento L_0 utilizado para a determinação das deformações foi definido pelo valor da altura média (h_c) da lâmina adesiva.

Os ensaios complementares de ligações coladas normais, de corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm, foram realizados no LAEES/DEES/UFMG em máquina de ensaio EMIC com controle eletrônico, com capacidade 300 kN. Os carregamentos foram aplicados com controle de deformações.

Nos ensaios utilizados para determinação da rigidez da ligação, foram utilizados adicionalmente dois relógios comparadores com precisão de 0,001 mm, dispostos em faces opostas. Nos demais ensaios, os resultados dos deslocamentos da máquina de ensaio foram ajustados, por meio de equações de correlações, com os resultados de ensaios realizados com emprego dos relógios comparadores. Nos ensaios das ligações com força excêntrica foi utilizada uma excentricidade $e = bc / 6 = 20$ mm.

A rigidez de cada ligação foi obtida da correspondente curva força x deslocamento, pelo coeficiente angular da reta de correlação do trecho inicial compreendido entre 10% e 50% da força máxima aplicada ou resistida pela ligação durante a realização do ensaio.

3.4.5 Estimativa da Resistência Característica de Ligações

A NBR-7190 da ABNT (1997) permite a caracterização mínima da resistência de ligações a partir do ensaio de seis corpos-de-prova, como transcrito no Apêndice A. Os valores característicos das resistências de ligações apresentados neste trabalho foram obtidos considerando-se a igualdade da média da população (μ) e da média amostral (\bar{x}), com margens de erro função do número de ensaios disponíveis, como definido na Eq. (3.03). Conseqüentemente, para um número reduzido de ensaios, tais valores devem ser entendidos como estimativas preliminares e obtidos para efeitos de comparação. A metodologia utilizada é detalhada no Anexo E e descrita sucintamente item 3.3.3.

3.5 Resistência e Rigidez Experimental de Ligações com Pinos

Com o objetivo de efetuar uma avaliação comparativa, realizou-se uma série de ensaios de ligações com emprego unicamente de elementos mecânicos. Os corpos-de-prova utilizados foram confeccionados com madeira de menor densidade, com as mesmas dimensões das ligações coladas com $bc = hc = 120$ mm, emprego dos mesmos elementos mecânicos igualmente posicionados: cavilhado (Ca), parafusado (Pa) e cavilhado e parafusado (CaPa).

Foram efetuadas duas repetições de cada ensaio para cada configuração (paralela e normal), para cada tratamento ou tipo de ligação e para cada espessura da peça central, totalizando $2 \times 2 \times 3 \times 3 = 36$ corpos-de-prova confeccionados.

Os ensaios foram realizados em máquina de ensaio eletrônica EMIC de 300 kN do LAEES/DEES/UFMG, com carregamentos aplicados por meio de deslocamentos crescentes. A resistência de cada ligação foi definida pelo cruzamento da reta paralela à reta de correlação do trecho inicial de carregamento, deslocada de 0,2%, com a própria curva de carregamento. O trecho inicial de carregamento foi definido entre 10% e 50% da força máxima aplicada ou resistida. A rigidez de cada ligação foi obtida pelo coeficiente angular da reta de correlação do trecho compreendido entre 10% e 50% da resistência da ligação.

3.6 Avaliação Numérica do Comportamento de Ligações Coladas

Para avaliar o comportamento teórico de ligações coladas foram realizadas análises numéricas pelo método dos elementos finitos com o emprego do sistema Ansys 5.4, considerando-se comportamento elástico-linear e estado plano de tensões. Os objetivos principais das análises numéricas foram avaliar a distribuição de tensões na superfície adesiva e a rigidez do corpo-de-prova.

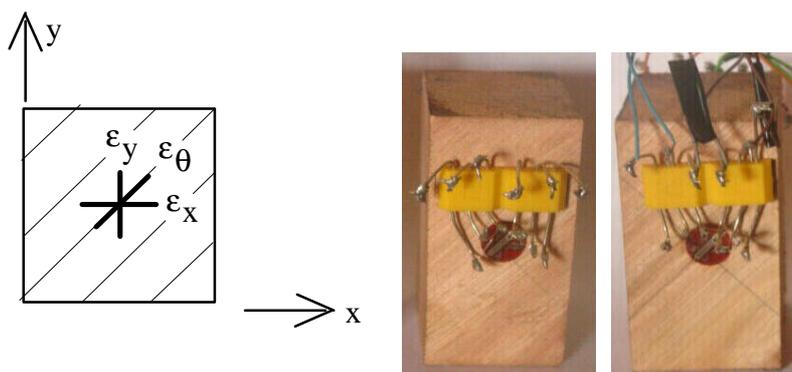
Nas modelagens efetuadas foram empregados elementos quadrilaterais quadráticos, considerando-se, basicamente, a madeira como um material ortotrópico. A linha adesiva foi considerada rígida e, conseqüentemente, não foi empregado nenhum tipo de elemento específico de junta em sua modelagem. A força aplicada foi considerada na forma de uma pressão constante na face superior da peça central. Os deslocamentos nodais na base das peças laterais foram considerados impedidos nas duas direções. Os parâmetros elásticos utilizados na definição das relações constitutivas foram obtidos por meio de avaliações experimentais e com o emprego de relações obtidas na literatura. Foram avaliados os comportamentos de ligações com $bc = hc = 120$ mm. Na ligação paralela foi aplicada uma força equivalente de 100 kN e na ligação normal de 50 kN.

3.7 Avaliação Experimental de Constantes Elásticas da Madeira e da Distribuição de Tensões na Linha Adesiva

Para uma avaliação dos coeficientes de Poisson ν_{LN} e ν_{NL} foram realizados ensaios em três corpos-de-prova de dimensões nominais de 55 mm x 55 mm x 80 mm, com extensômetros elétricos aplicados nas direções principais da madeira em duas faces opostas, ver FIG. 3.10a. Em cada corpo-de-prova foram realizados ensaios de compressão paralela e de compressão normal, com três repetições para cada configuração, carregamentos com três ciclos de carga e aplicação de força abaixo do limite elástico.



(a)



(b)

FIGURA 3.10 - Corpos-de-Prova com Extensômetros em Duas Faces Opostas para Ensaios Uniaxiais: a) Nas Direções Principais da Madeira; b) Em Direções Inclinadas em Relação às Fibras da Madeira

Para avaliar o módulo G_{LN} foram realizados ensaios de compressão uniaxial inclinado em relação às fibras. Foram confeccionados dois corpos-de-prova de dimensões nominais iniciais de 4,0 cm x 6,5 cm x 6,5 cm, com as fibras da madeira inclinadas de um ângulo de 45^0 em relação às faces principais e rosetas com três extensômetros elétricos nas duas faces do corpo-de-prova. Foram realizados ensaios com aplicação de força na direção y e ensaios com aplicação de força na direção x. A seguir os corpos-de-prova foram reduzidos na dimensão paralela à direção x, para um valor nominal de 35 mm e novamente ensaiados sob força aplicada na direção y, conforme FIG. 3.10 b.

As dimensões utilizadas nos corpos-de-prova, foram definidas pelas dimensões das tábuas ainda disponíveis do lote inicial de madeira e de forma que permitissem a realização de ensaios com aplicação de força nos dois pares de faces opostas.

Para avaliar a distribuição de tensões na linha adesiva foram realizados ensaios em 3 corpos-de-prova de ligações coladas paralelas, com $bc = hc = 120$ mm e emprego de rosetas de extensômetros elétricos dispostas sobre a linha adesiva em uma das faces, como apresentado nas FIG. 3.11 e 3.12. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios de 300 kN do LAEES/DEES UFMG, com emprego de um sistema de aquisição de dados Linux com 32 canais, célula de carga de 100 kN, dois relógios comparadores digitais e dois transdutores de deslocamentos (com extensômetros elétricos).

Foram ensaiados dois corpos-de-prova de madeira de menor densidade de ligações coladas e cavilhadas, com $t_c = 24$ mm e $t_c = 48$ mm. O terceiro elemento ensaiado foi confeccionado a partir de uma peça de madeira de MLC, laminado transversalmente, simulando um corpo-de-prova maciço com $t_c = 30$ mm.

Nos ensaios foram aplicados carregamentos com três ciclos de carga e descarga, com força máxima de 100 kN e força mínima de 20 kN no descarregamento. Foram realizadas três repetições de cada configuração. O valor de 100 kN foi imposto pelo limite de capacidade da célula de carga utilizada.

Foram utilizados nos ensaios extensômetros elétricos de comprimento $L = 5 \text{ mm}$ e resistência elétrica de 120Ω .

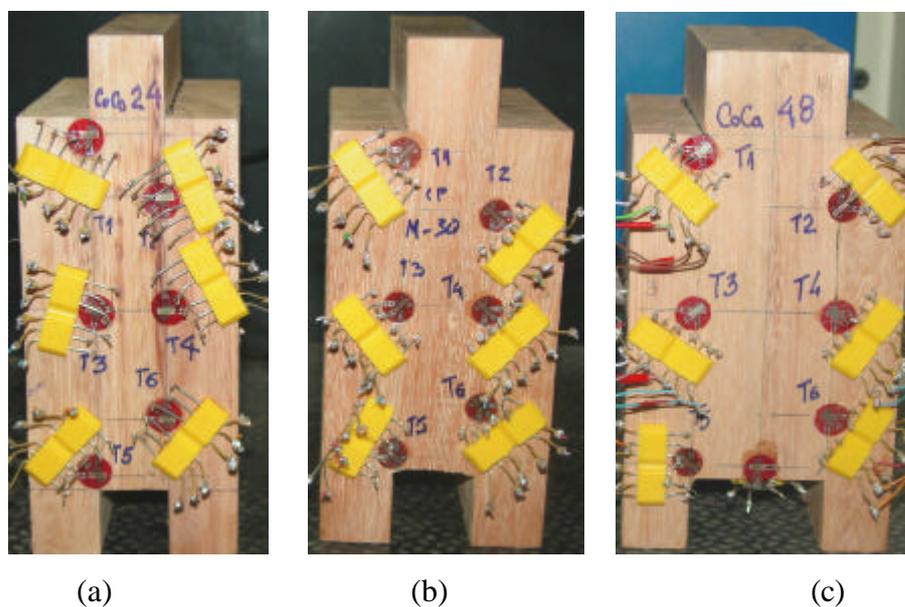


FIGURA 3.11 – Corpos-de-Prova com Extensômetros Elétricos nas Linhas Adesivas de Uma das Faces: a) CoCa 24-120; b) CP “maciço” 30-120; c) CP CoCa 48-120

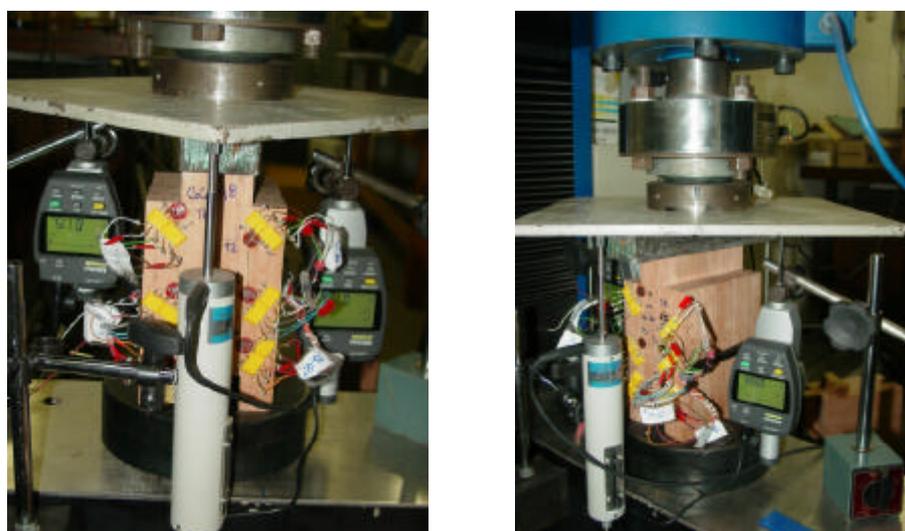


FIGURA 3.12 – Esquema dos Ensaios com Célula de Carga, Tarugo de Distribuição da Força, Medidores de Deslocamentos e Corpos-de-Prova Posicionados na Máquina Universal de Ensaio

3.8 Modelo Analítico para Avaliação da Resistência e da Distribuição de Tensões em Ligações Coladas

Neste item, apresenta-se uma avaliação analítica da resistência de ligações coladas para ligações submetidas à compressão, como representado na FIG. 3.13, desenvolvida a partir da equação de governo da distribuição das tensões cisalhantes na superfície colada apresentada por GUSTAFSSON E SERRANO (1998), considerando-se um problema de fratura frágil, com comportamento elástico linear para as peças de madeira e para a lâmina de adesivo sob ação de cisalhamento.

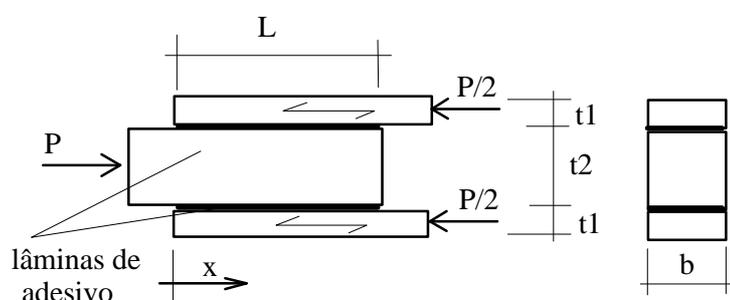


FIGURA 3.13 – Geometria de Ligação Colada Simétrica com Três Peças, Submetida à Compressão

Considerando-se as tensões cisalhantes nas lâminas adesivas em uma ordenada x , constantes ao longo da largura b , isto é, $\tau = \tau(x)$, a equação diferencial de governo do problema é definida como:

$$\tau'' - \omega^2 \tau = 0 \quad (3.05)$$

Onde $\tau'' = \frac{\partial^2 \tau(x)}{\partial x^2}$.

$$\omega = \left(\left(\frac{G_3}{t_3} \right) \left[(E_1 t_1)^{-1} + (E_2 \frac{t_2}{2})^{-1} \right] \right)^{1/2} \quad (3.06)$$

E_1, t_1 e E_2, t_2 são, respectivamente, o módulo de elasticidade do material e espessura das peças laterais e da peça central. G_3 e t_3 , são o módulo de cisalhamento e a espessura da lâmina adesiva, sendo o fator G_3/t_3 definido como a resistência da lâmina adesiva ao deslizamento das peças coladas, de valor:

$$\frac{G_3}{t_3} = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \quad (3.07)$$

Onde τ_f é a resistência ou tensão máxima resistida na fratura e G_f é a energia de fratura, cujo valor pode ser determinado experimentalmente, ver Apêndice B.

A solução geral da Eq. (3.05) é dada por:

$$\tau(x) = A \sinh(\omega x) + B \cosh(\omega x) \quad (3.08)$$

Na obtenção das constantes A e B na Eq. (3.08) que define a forma de variação da tensão cisalhante ao longo do comprimento da lâmina adesiva, pode-se utilizar, inicialmente, a equação de equilíbrio global de cada peça componente, na forma:

$$\int_0^L \tau(x) dx = \frac{P}{2.b} \quad (3.09)$$

Uma alternativa mais geral para a segunda condição de contorno consiste em se utilizar um fator β , definido pela relação entre as taxas de variação da tensão cisalhante no início e fim da lâmina adesiva:

$$\beta = -\frac{\tau'|_{x=0}}{\tau'|_{x=L}} \quad (3.10)$$

Com o emprego das Eq. (3.09) e (3.10), as constantes A e B ficam definidas por:

$$A = -\frac{P.\omega}{2.b} \frac{\beta}{(1+\beta)} \quad (3.11a)$$

$$B = \frac{P \cdot \omega (1 + \beta \cosh(\omega L))}{2 \cdot b (1 + \beta) \cdot \sinh(\omega L)} \quad (3.11b)$$

Em um ponto de ordenada genérica x , as condições de compatibilidade do campo de deformações na vizinhança da lâmina adesiva são representadas na FIG. 3.14.

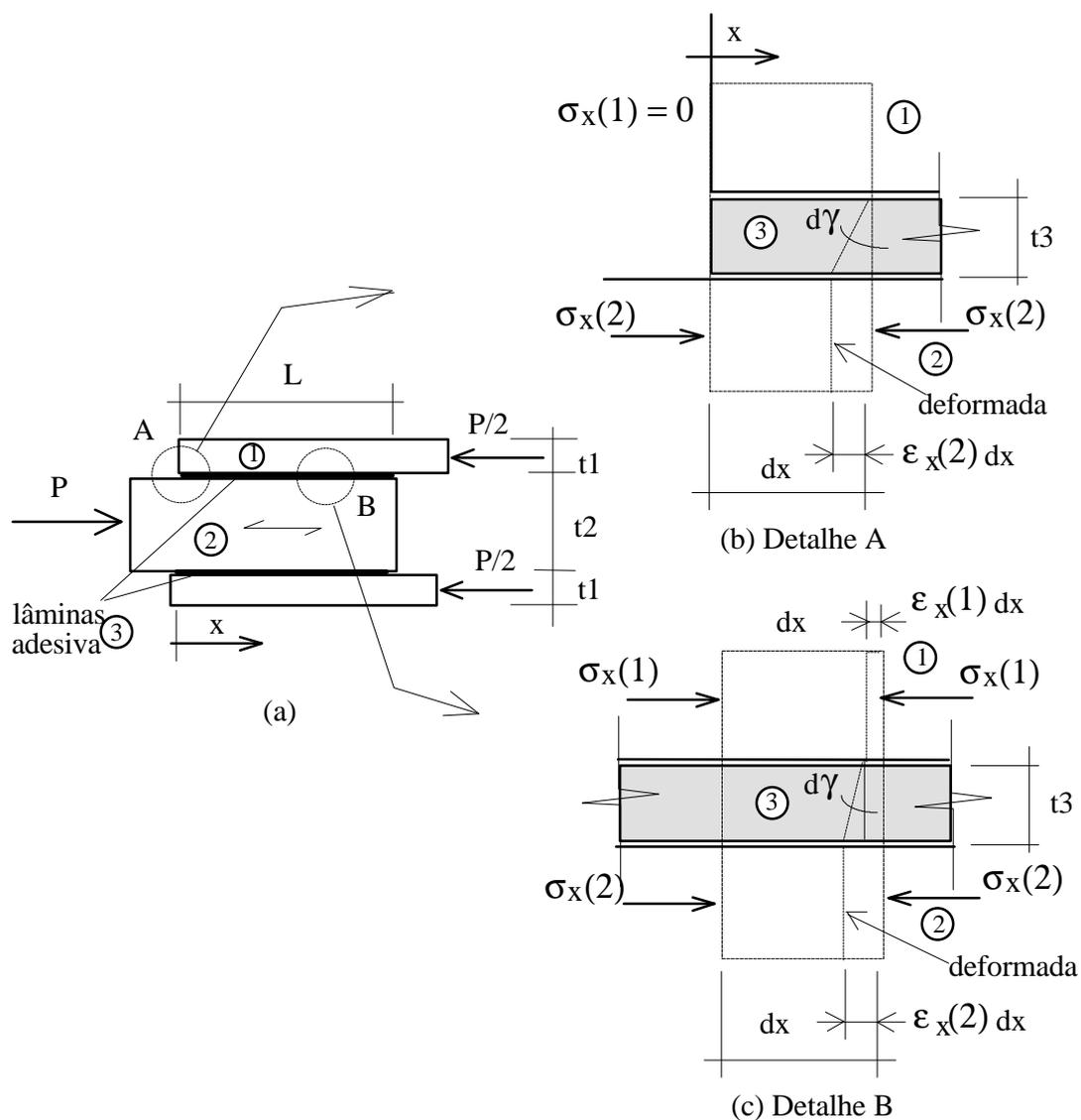


FIGURA 3.14 – Ligação Colada com Três Peças, Submetida à Compressão:

- a) Esquema geral; b) Deformações nas Adjacências do Início da Lâmina Adesiva, $x=0$;
c) Idem para Um Ponto Genérico de Ordenada x

O valor de $\tau'(x)$ fica definido como:

$$\left\{ \begin{array}{l} d\gamma = \frac{(\varepsilon_x(2) - \varepsilon_x(1)) \cdot dx}{t_3} \\ \tau(x) = G_3 \cdot \gamma \end{array} \right. \Rightarrow \frac{d\tau(x)}{dx} = \tau'(x) = \frac{G_3}{t_3} (\varepsilon_x(2) - \varepsilon_x(1)) \quad (3.12)$$

Onde $\varepsilon_x(2)$ e $\varepsilon_x(1)$ são as deformações normais na direção longitudinal x na vizinhança do ponto em consideração, respectivamente, nas peças componentes 2 e 1.

As deformações nas peças componentes, nas adjacências do início e fim da lâmina adesiva, são nulas nas peças descarregadas, resultando das Eq. (3.10) e (3.12):

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_x(1)|_{x=0} = 0 \rightarrow \tau'|_{x=0} = \frac{G_3}{t_3} (\varepsilon_x(2)|_{x=0}) \\ \varepsilon_x(2)|_{x=L} = 0 \rightarrow \tau'|_{x=L} = \frac{G_3}{t_3} (-\varepsilon_x(1)|_{x=L}) \end{array} \right\} \Rightarrow \beta = \frac{\varepsilon_x(2)|_{x=0}}{\varepsilon_x(1)|_{x=L}} \quad (3.13)$$

Não existe solução explícita conhecida para as deformações definidas na Eq. (3.13), que devem ser avaliadas caso a caso por meio de análises numéricas. Uma solução aproximada pode ser obtida em função das tensões normais atuantes nas extremidades da linha adesiva. Assim, desprezando-se as influências das tensões transversais, as deformações não nulas podem ser definidas como:

$$\varepsilon_x(2)|_{x=0} = \frac{\sigma_x(2)|_{x=0}}{E_x(2)} \quad (3.14a)$$

$$\varepsilon_x(1)|_{x=L} = \frac{\sigma_x(1)|_{x=L}}{E_x(1)} \quad (3.14b)$$

Onde $\sigma_x(2)|_{x=0}$ e $\sigma_x(1)|_{x=L}$ são as tensões normais na direção longitudinal X nas adjacências da lâmina adesiva, respectivamente, em $x = 0$, no elemento 2 e em $x = L$, no elemento 1. $E_x(2)$ e $E_x(1)$ são os módulos de elasticidade dos componentes 2 e 1.

Os bordos das peças componentes carregadas, adjacentes ao início e fim da lâmina adesiva, são pontos de singularidades devido à mudança brusca de geometria, com ocorrência de concentrações de tensões. Infelizmente, uma solução explícita para as

tensões normais $\sigma_x(2)|_{x=0}$ e $\sigma_x(1)|_{x=L}$ também não é conhecida. No caso de ligações alinhadas de mesmo material, uma solução aproximada pode ser obtida a partir da parametrização das dimensões de interesse e uso de análises numéricas, obtendo-se:

$$\sigma_x(2)|_{x=0} = \alpha_2 \frac{P}{b.t_2} \quad (3.15a)$$

$$\sigma_x(1)|_{x=L} = \alpha_1 \frac{P}{b.2.t_1} \quad (3.15b)$$

Onde α_2 e α_1 são os coeficientes que definem o efeito de concentração da tensão normal σ_x nos componentes 2 e 1, nas correspondentes extremidades carregadas adjacentes à lâmina adesiva, isto é, em $x = 0$, no elemento 2 e $x = L$, no elemento 1.

Empregando-se as Eq. (3.14), (3.15) e (3.16), resulta para o fator β :

$$\beta = \frac{\varepsilon_x(2)|_{x=0}}{\varepsilon_x(1)|_{x=L}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{2.t_1.E_x(1)}{t_2.E_x(2)} \quad (3.16)$$

No caso de $\beta = 1$, resulta a ocorrência de simetria na distribuição de tensões cisalhantes na linha de adesiva em relação ao ponto $x = L/2$, correspondendo às seguintes formas alternativas e equivalentes de condições de contorno:

$$\tau|_{x=0} = \tau|_{x=L} \quad (3.17a)$$

$$\tau'|_{x=0} = -\tau'|_{x=L} \quad (3.17b)$$

$$\tau'|_{x=L/2} = 0 \quad (3.17c)$$

Substituindo-se o valor de $\beta = 1$ nas Eq. (3.11a) e (3.11b), resulta para a Eq. (3.08):

$$\tau(x) = -\frac{P.\omega}{4b} \sinh(\omega x) + \frac{P.\omega}{4b.\operatorname{tagh}\left(\omega \frac{L}{2}\right)} \cosh(\omega x) \quad (3.18a)$$

ou:

$$\tau(x) = \left(\frac{P \cdot \omega}{4b} \right) \frac{\cosh(\omega(L/2 - x))}{\sinh(\omega L/2)} \quad (3.18b)$$

Neste caso de $\beta = 1$, a tensão cisalhante máxima ocorre em $x = 0$ e em $x = L$, valendo:

$$\tau_{\text{máx}} = \tau|_{x=0} = \tau|_{x=L} = \left(\frac{P \cdot \omega / 4b}{\tanh(\omega L/2)} \right) \quad (3.19)$$

Com $\tau_{\text{máx}} = \tau_f$, obtém-se a correspondente força de ruptura na fratura P_f :

$$P_f = \frac{4 \cdot b \cdot \tau_f \cdot \tanh(\omega L/2)}{\omega} \quad (3.20)$$

A tensão média resistida é definida pela relação:

$$\frac{P_f}{2 \cdot b \cdot L} = \tau_f \frac{\tanh(\omega L/2)}{\omega L/2} \quad (3.21)$$

Na Eq. (3.21), pode-se observar que τ_f se aproxima do valor da tensão cisalhante média na ruptura, para valores reduzidos do comprimento L da ligação.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação Preliminar da Resistência de Ligações Coladas Associadas a Elementos de Pinos

4.1.1 Resistência e Rigidez da Madeira

Os resultados médios dos ensaios de avaliação da resistência e rigidez da madeira na compressão paralela são apresentados na TAB. 4.1.

TABELA 4.1 – Valores Médios das Propriedades da Madeira

Ensaio de resistência			Ensaio de módulo de elasticidade		
$U_{\text{méd}}$ (%)	f_{c0} (U) (MPa)	f_{c0} (U=12%) (MPa)	$U_{\text{méd}}$ (%)	E_{c0} (U) (MPa)	E_{c0} (U=12%) (MPa)
13,94	58,7	62,2	15,32	16.377	17.455

4.1.2 Resistência das Ligações Coladas Associadas a Elementos de Pinos

Os resultados dos ensaios das ligações coladas são apresentados nas TAB. 4.2. e 4.3, respectivamente, para ligações paralelas e normais.

TABELA 4.2 – Resistências Médias de Ligações Coladas Paralelas

Tipo de ligação	Número de ensaios	Umidade	Resistência U	Resistência U =12%
		(%)	(kN)	(kN)
CoCaPa	6	12,61	233,50	237,65
CoCaPr	6	13,00	210,25	216,78
CoCa	6	12,91	228,17	234,22
CoPa	3	8,28	240,67	213,70
média		12,2	226,4	227,3

TABELA 4.3 – Resistências Médias de Ligações Coladas Normais

Tipo de ligação	Número de ensaios	Umidade (%)	Resistência U	Resistência U=12%	Tensão de cisalhamento na área colada
			(kN)	(kN)	(MPa)
CoCaPa	3	13,57	117,83	123,46	6,9
CoCaPr	3	12,94	96,33	99,00	5,48
CoCa	3	12,35	93,33	94,28	5,26
CoPa	3	9,36	79,00	72,73	3,75
Média		12,1	96,6	97,4	5,35

Nos ensaios das ligações coladas paralelas, as rupturas dos corpos-de-prova dos três primeiros tratamentos tiveram início no esmagamento nas regiões de apoio das peças laterais, com exceção dos corpos-de-prova CoCaPr-A2 e CoCa-B2, nas quais ocorreram rupturas por cisalhamento. Algumas das rupturas finais se deram por fendilhamento na peça central, com as superfícies coladas mantendo-se aparentemente íntegras. Não foram detectados deslocamentos relativos das peças ligadas antes da ruptura. As rupturas se deram de forma frágil, com as rupturas por compressão produzindo uma perda de capacidade de carga mais gradual.

Nas ligações coladas normais, as rupturas dos corpos-de-prova ocorreram por cisalhamento na região das superfícies coladas, com predomínio de arrancamento das fibras das peças laterais, posicionadas ortogonalmente à direção da carga. Os ensaios apresentaram indícios de ocorrência de ruptura dúctil, particularmente para os corpos-de-prova das ligações coladas, cavilhadas e parafusadas, nos quais as resistências máximas ocorreram com deformações acentuadas.

4.1.3 Resistência de Ligações com Elementos de Pinos

Os resultados dos ensaios das ligações com elementos mecânicos são apresentados na TAB. 4.4 para as ligações paralelas e na TAB. 4.5 para as ligações normais. Nas FIG. 4.1 e 4.2, apresentam-se os gráficos força x deformação obtidos nos ensaios de ligações paralelas, pregada (Pr-B1) e parafusada (Pa-A1).

TABELA 4.4 – Resistências Médias de Ligações Paralelas com Elementos Mecânicos

Tipo de ligação	Número de ensaios	Umidade	Resistência U	Resistência U =12%
		(%)	(kN)	(kN)
Pa	5	13,7	94,5	99,40
Pr	5	13,9	59,3	62,77
Ca	3	14,1	22,0	23,4
CaPa	3	13,9	35,8	37,8

TABELA 4.5 – Resistências Médias de Ligações Normais com Elementos Mecânicos

Tipo de ligação	Número de ensaios	Umidade	Resistência U	Resistência U=12%
		(%)	(kN)	(kN)
Pa	2	13,4	58,8	61,5
Pr	2	13,5	42,8	45,1
Ca	3	13,4	19,0	19,8
CaPa	3	13,3	34,2	35,5

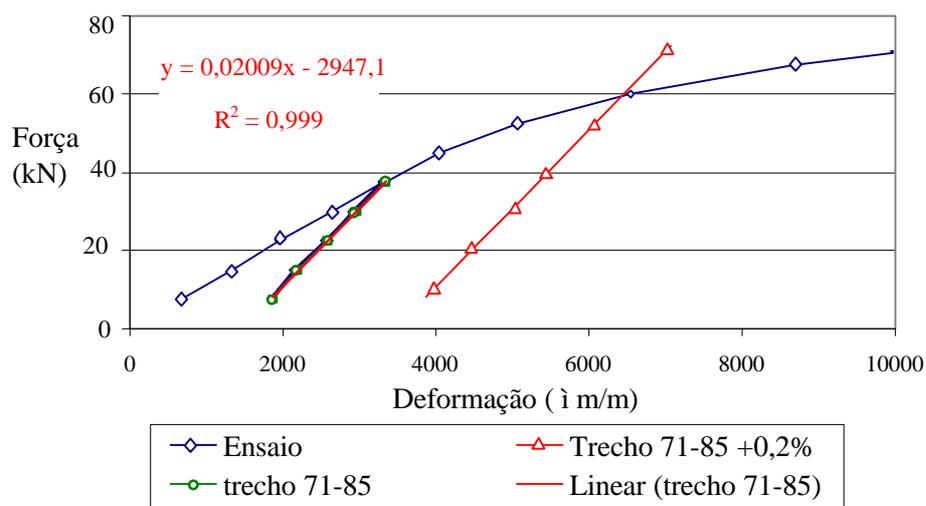


FIGURA 4.1 – Gráfico Força x Deformação, Corpo-de-Prova Pregado Pr-B1

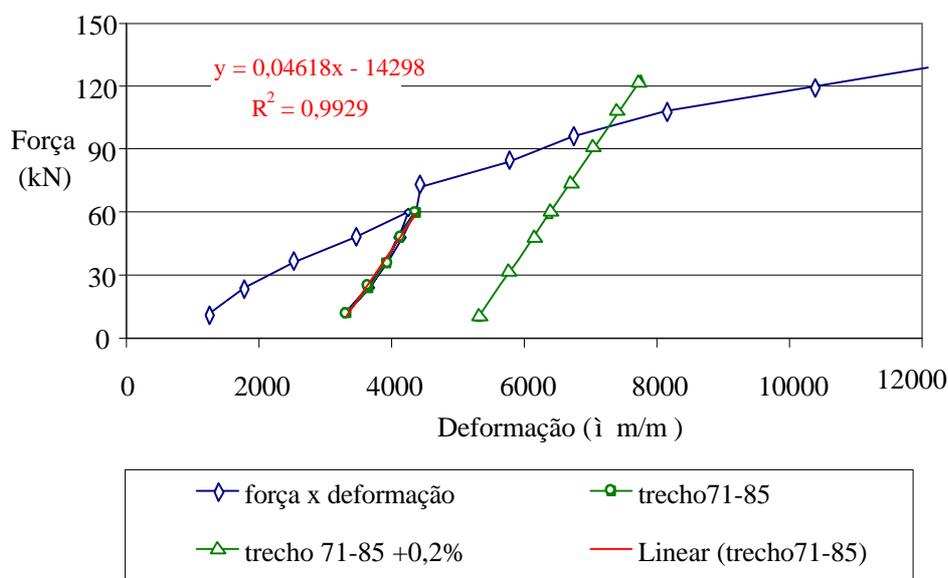


FIGURA 4.2 – Gráfico Força x Deformação, Corpo-de-Prova Parafusado Pa-A1

4.1.4 Discussão dos Resultados

A análise de variância das resistências das ligações coladas paralelas em função do tipo de elemento mecânico, indicou, para o nível de significância de 5%, que não se pode rejeitar a hipótese nula, podendo-se concluir que não há influência do tipo de elemento mecânico adicional utilizado na resistência da ligação.

As rupturas por esmagamento das peças laterais nas ligações coladas paralelas devem-se às reduzidas espessuras das peças laterais. Nas ligações coladas com parafuso central, confeccionados com peças laterais de maior espessura, as rupturas ocorreram por cisalhamento na madeira nas regiões próximas às das superfícies coladas. A tensão média ao cisalhamento na área colada, para a resistência corrigida para o teor de umidade, foi de 9,46 MPa. As resistências das ligações coladas foram bem superiores às obtidas com uso exclusivo de elementos mecânicos, para todos os ensaios realizados.

Apesar das elevadas resistências obtidas nas ligações coladas e pregadas, o emprego de pregos foi abandonado nos estudos subseqüentes de ligações coladas, devido aos impactos necessários para a introdução dos pregos na madeira. Tais impactos podem produzir algum tipo de dano ou fratura na ligação colada de difícil detecção e, conseqüentemente, o uso de pregos em ligações coladas deve ser evitado, pelo menos em madeira de maiores densidades, quando já tiver ocorrido o endurecimento do adesivo.

As ligações coladas, com emprego de uma única cavilha substituindo o parafuso de prensagem, apresentaram elevadas resistências, bom aspecto estético, facilidade de execução e custo reduzido.

As ligações executadas com uso exclusivo de elementos mecânicos apresentaram processos de ruptura dúcteis, tanto nas ligações paralelas quanto nas ligações normais.

Nas ligações coladas normais, as rupturas ocorreram na região das superfícies coladas, com arrancamento das fibras das peças laterais, posicionadas ortogonalmente à direção da carga. Os resultados destes ensaios já apresentaram diferenças em função dos elementos mecânicos adicionais, com nítido aumento nas resistências das ligações coladas, cavilhadas e parafusadas. No entanto, o pequeno número de ensaios realizados não permite uma análise estatística qualificada em relação a estas diferenças.

4.2 Propriedades da Madeira

4.2.1 Resistência à Compressão Paralela às Fibras – Peças Delgadas

O resumo dos resultados dos ensaios de resistência na compressão paralela às fibras de corpos-de-prova de seção transversal delgada é apresentado na TAB. 4.6. Na FIG. 4.3 são apresentados os gráficos dos resultados obtidos em função da densidade aparente e as correspondentes retas de correlação, obtidas com o método dos mínimos quadrados.

TABELA 4.6 – Resistência à Compressão Paralela de Corpos-de-Prova Delgados

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U (%)	Resistência	
	Tábua	CP		f_{c0} (U)	f_{c0} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	649,25	652,11	10,47	55,94	53,40
Desvio-padrão - S	54,11	57,94	0,35	7,43	7,27
Coef. de variação - δ_{am} (%)	8,33	8,89	3,36	13,28	13,61
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$ ⁽¹⁾					41,44
$f_{c0,k}$ - NBR 7190/97 ⁽²⁾					43,65
Madeira AD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	849,50	843,30	11,33	70,90	69,46
Desvio-padrão - S	54,53	62,27	0,30	5,19	4,74
Coef. de variação - δ_{am} (%)	6,42	7,38	2,61	7,32	6,82
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$ ⁽¹⁾					61,67
$f_{c0,k}$ - NBR 7190/97 ⁽²⁾					68,09
Madeira BD e AD, 24 corpos-de-prova					
Valor médio	749,38	747,71	10,90	63,42	61,43
Desvio-padrão - S	115,25	114,00	0,54	9,88	10,16
Coef. de variação - δ_{am} (%)	15,38	15,25	4,98	15,58	16,54
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$ ⁽¹⁾					44,71
$f_{c0,k}$ - NBR 7190/97 ⁽²⁾					44,76

⁽¹⁾ $f_{k,est} = f_m \cdot K_E = f_m (1 - 1,645 \cdot k_{\sigma,esp} \cdot \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

⁽²⁾ $f_k = [2(f_1 + f_2 + \dots + f_{n/2-1}) / (n/2 - 1) - f_{n/2}] \cdot 1,1$, ver Apêndice A

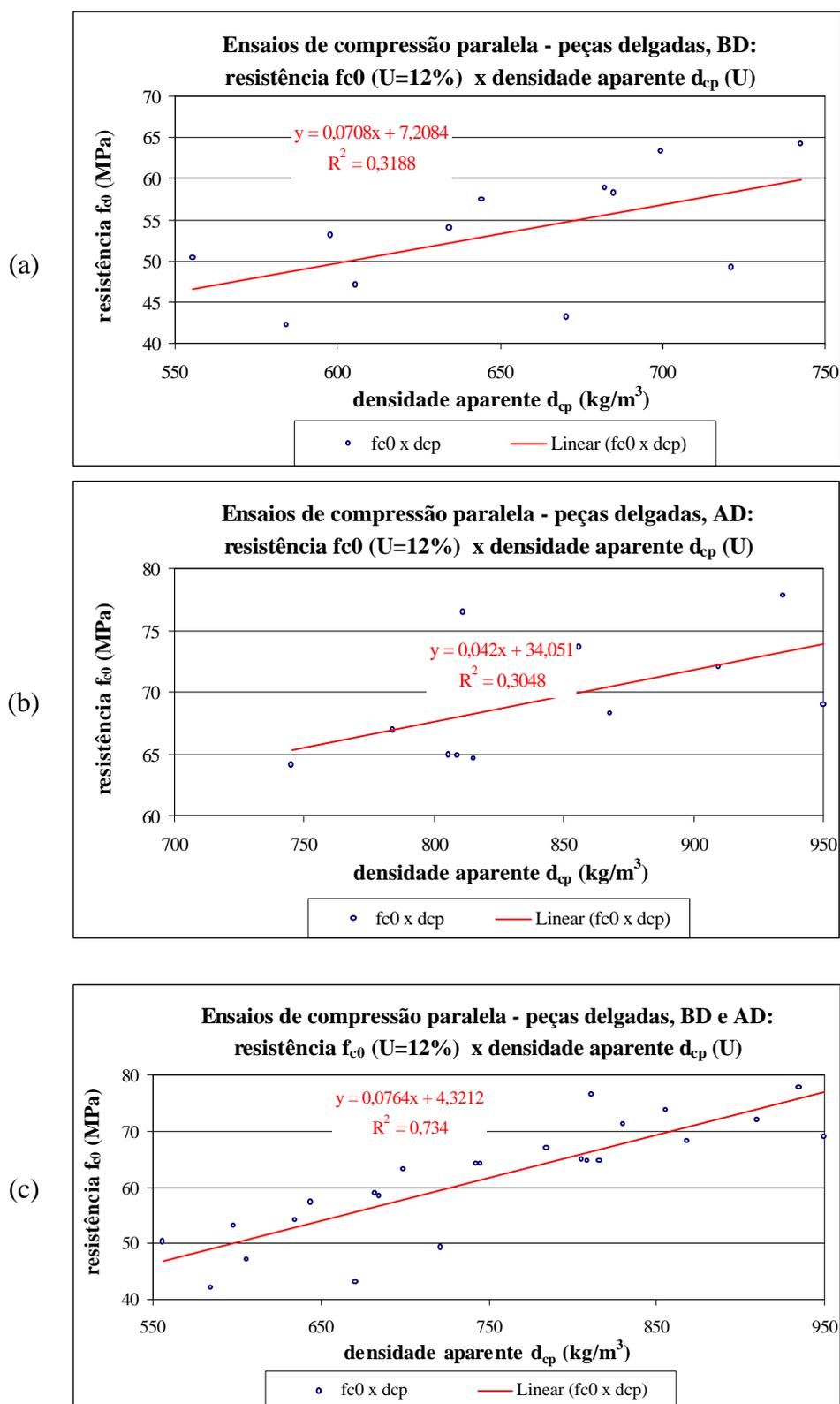


FIGURA 4.3 – Gráficos de Resistência à Compressão Paralela às Fibras x Densidade Aparente, Corpos-de-Prova Delgados : a) BD; b) AD; c) BD e AD

4.2.2 Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela às Fibras

Na TAB. 4.7, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de avaliação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, obtidos com os corpos-de-prova com espessura dupla das tábuas de origem e aplicação de carregamento conforme a NBR 7190/97. Na FIG. 4.4, são apresentados os gráficos das resistências em função da densidade aparente dos corpos-de-prova correspondentes.

TABELA 4.7 – Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela – Peças Duplas

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U	Módulo	
	Tábua	Corpo-de-prova		E_{c0} (U)	E_{c0} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	650,17	645,75	10,66	15601	15167
Desvio-padrão – S	63,45	68,27	0,62	2583	2419
Coef. de variação - δ_{am} (%)	9,76	10,57	5,82	16,56	15,95
Madeira AD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	847,92	833,69	10,83	20264	19773
Desvio-padrão – S	61,52	67,26	0,58	4592	4404
Coef. de variação - δ_{am} (%)	7,26	8,07	5,34	22,66	22,27
Madeira BD e AD, 24 corpos-de-prova					
Valor médio	749,04	739,72	10,74	17932	17470
Desvio-padrão – S	118,05	116,65	0,59	4353	4197
Coef. de variação - δ_{am} (%)	15,76	15,77	5,52	24,28	24,02

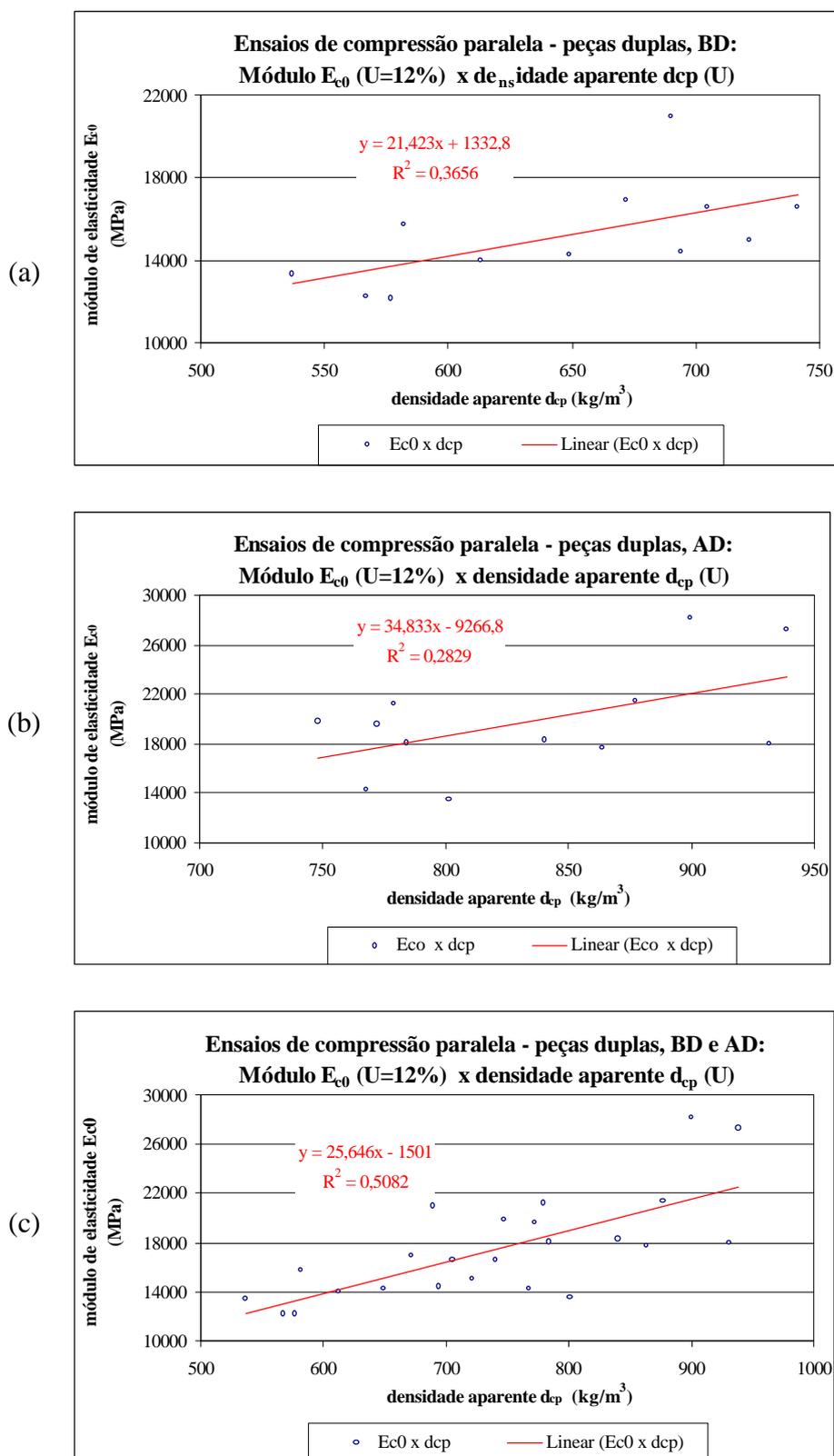


FIGURA 4.4 – Gráficos de Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela às Fibras x Densidade Aparente, Peças Duplas: a) BD; b) AD; c) BD e AD

4.2.3 Resistência e Módulo de Elasticidade na Compressão Normal

Na TAB. 4.8, apresenta-se o resumo dos resultados de resistência e rigidez da madeira na compressão normal às fibras, para carregamento com três ciclos de carga e descarga, sob taxa constante de deformação, corpos-de-prova com dupla espessura das tábuas de origem e altura L_0 de 100 mm. A resistência foi definida pela tensão correspondente à deformação plástica de 0,2% e o módulo de elasticidade pela correlação linear obtida no terceiro carregamento. Na FIG. 4.5 e 4.6 são representados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.8 - Resistência e Módulo de Elasticidade na Compressão Normal – Peças Duplas, $L_0 = 100$ mm e Três Ciclos de Carregamento

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U (%)	Resistência e Módulo		
	Tábua	Corpo-de-prova		$f_{c90, \text{máx}}$	f_{c90}	E_{c90}
	(kg/m ³)	(kg/m ³)		U	U=12%	U=12%
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	
Madeira BD, 12 corpos-de-prova						
Valor médio	650,17	657,56	11,47	7,86	5,41	437,85
Desvio-padrão - S	63,45	64,62	0,40	1,46	0,80	69,26
Coef. de var.- δ_{am} (%)	9,76	9,83	3,50	18,55	14,85	15,82
$f_{k, \text{est}} = f_m \cdot K_E$					4,09	
$f_{c90, k}$ - NBR 7190/97					4,41	
Madeira AD, 12 corpos-de-prova						
Valor médio	847,08	852,80	11,39	12,58	7,92	689,30
Desvio-padrão - S	62,43	68,85	0,55	2,23	1,55	124,31
Coef. de var.- δ_{am} (%)	7,37	8,07	4,86	17,72	19,55	18,03
$f_{k, \text{est}} = f_m \cdot K_E$					5,38	
$f_{c90, k}$ - NBR 7190/97					5,41	
Madeira BD e AD, 24 corpos-de-prova						
Valor médio	748,63	755,18	11,43	10,22	6,67	563,57
Desvio-padrão - S	117,92	119,20	0,47	3,04	1,76	161,80
Coef. de var.- δ_{am} (%)	15,75	15,78	4,15	29,70	26,42	28,71
$f_{k, \text{est}} = f_m \cdot K_E$					3,77	
$f_{c90, k}$ - NBR 7190/97					4,79	

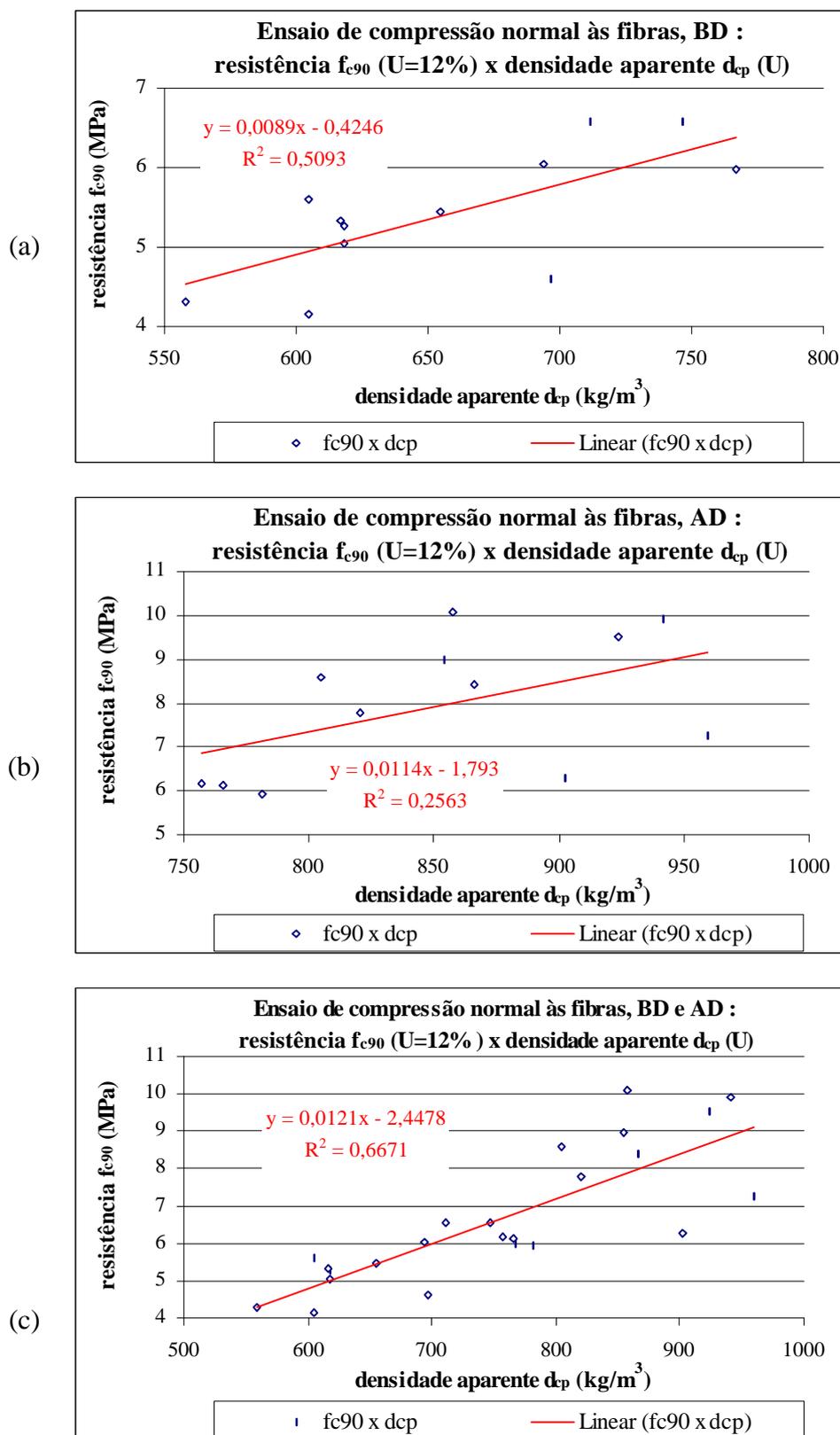


FIGURA 4.5 – Gráficos de Resistência à Compressão Normal x Densidade Aparente, Corpos-de-Prova de Peças Duplas, $L_0 = 100$ mm: a) BD; b) AD; c) BD e AD

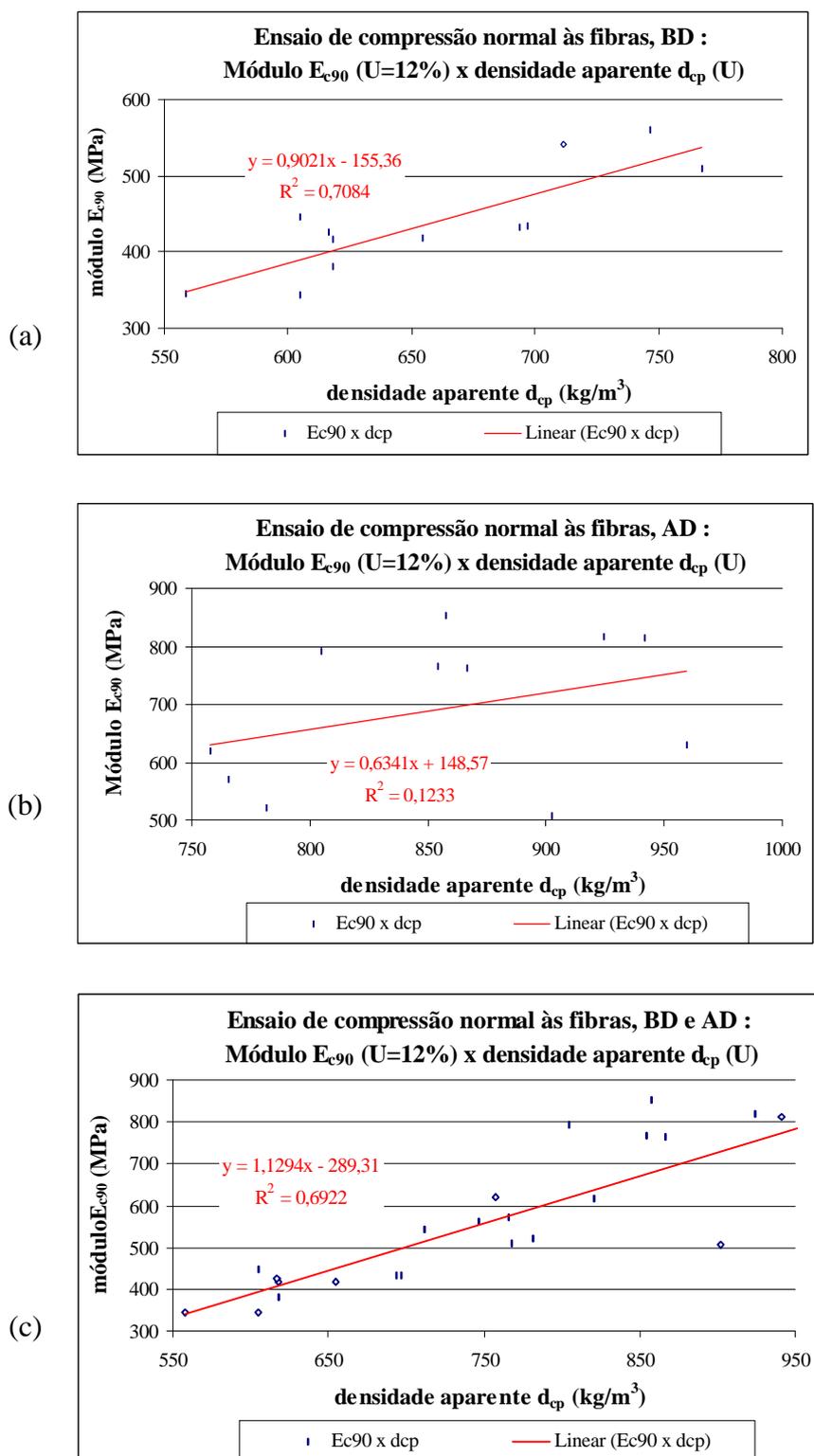


FIGURA 4.6 – Gráficos do Módulo de Elasticidade na Compressão Normal x Densidade Aparente, Peças Duplas, $L_0 = 100$ mm: a) BD; b) AD; c) BD e AD

Na TAB. 4.9, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de compressão normal às fibras, realizados em 12 corpos-de-prova com dupla espessura das tábuas de origem e altura L_0 igual a 60 mm, com madeira de menor densidade (BD). Estes ensaios foram realizados em função das reduzidas resistências obtidas nos ensaios com $L_0 = 100$ mm, em relação aos resultados obtidos para a resistência na compressão paralela. Na FIG. 4.7 são representados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.9 - Resistência na Compressão Normal, Corpos-de-Prova com Peças Duplas e $L_0 = 60$ mm, Madeira BD

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U (%)	Resistência	
	Tábua	Corpo-de-prova		$f_{c90, máx}$ U	f_{c90} U=12%
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	
Valor médio	650,17	672,63	11,70	8,98	6,34
Desvio-padrão - S	63,45	58,12	0,26	1,94	0,95
Coef. de var.- δ_{am} (%)	9,76	8,64	2,19	21,62	14,94
$f_{k, est} = f_m \cdot K_E$					4,78
$f_{c90,k}$ - NBR 7190/97					4,59

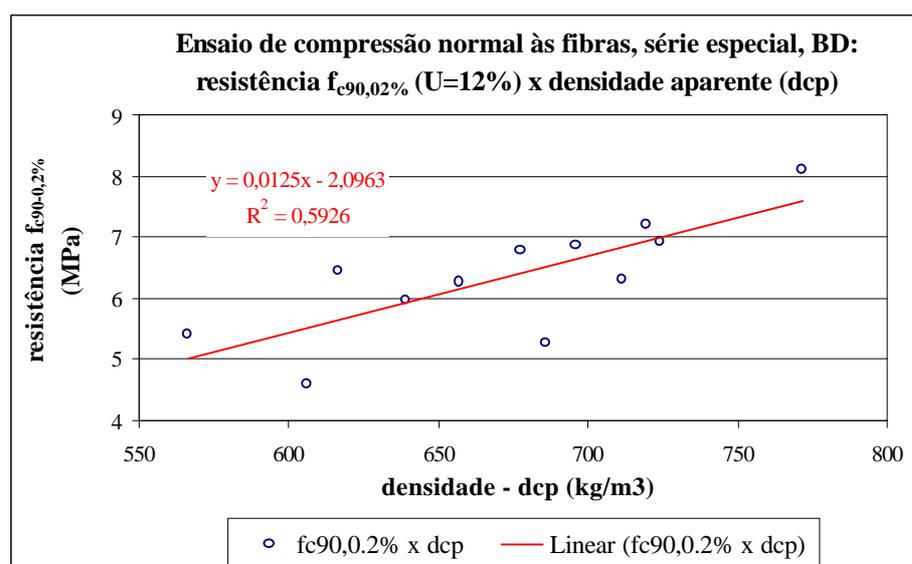


FIGURA 4.7 – Resistência à Compressão Normal às Fibras x Densidade Aparente, Peças Duplas, Madeira BD, com $L_0 = 60$ mm

4.2.4 Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras

Na TAB. 4.10, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento da madeira na direção paralela às fibras. Na FIG. 4.8, são apresentados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.10 – Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U	Resistência	
	Tábua	Corpo- de-prova		f_{v0} (U)	f_{v0} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	650,17	643,31	11,64	10,66	10,54
Desvio-padrão - S	63,45	57,15	0,40	1,96	1,92
Coef. de var. - δ_{am} (%)	9,76	8,88	3,40	18,41	18,18
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					7,39
$f_{v0,k}$ - NBR 7190/97					7,88
Madeira AD, 10 corpos-de-prova					
Valor médio	837,60	837,05	11,81	15,10	15,02
Desvio-padrão - S	60,76	71,03	0,26	1,70	1,75
Coef. de var. - δ_{am} (%)	7,25	8,49	2,20	11,24	11,68
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					12,13
$f_{v0,k}$ - NBR 7190/97					13,02
Madeira BD e AD, 22 corpos-de-prova					
Valor médio	735,36	731,37	11,72	12,68	12,58
Desvio-padrão - S	113,21	116,72	0,34	2,89	2,91
Coef. de var. - δ_{am} (%)	15,39	15,96	2,94	22,82	23,11
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					7,80
$f_{v0,k}$ - NBR 7190/97					8,68

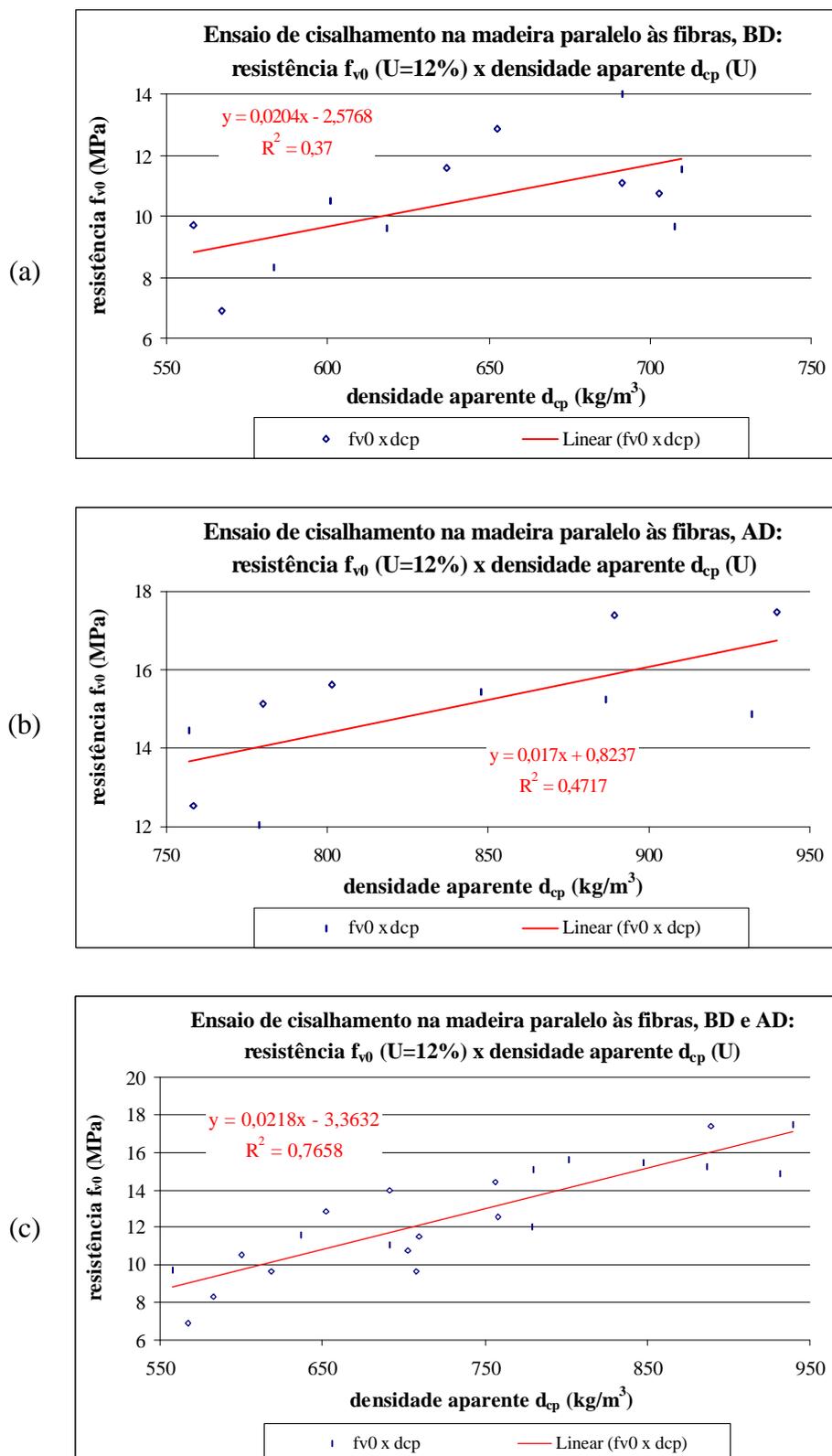


FIGURA 4.8 – Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras x Densidade Aparente:

a) BD; b) AD; c) BD e AD

4.2.5 Resistência à Tração Paralela às Fibras

Na TAB. 4.11, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à tração paralela às fibras. Na FIG. 4.9, são apresentados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.11 – Resistência à Tração Paralela às Fibras da Madeira

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U	Resistência	
	Tábua - d _t	Corpo- de-prova		f _{t0} (U)	f _{t0} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	650,17	652,58	11,76	91,19	90,46
Desvio-padrão – S	63,45	67,87	0,46	23,54	23,19
Coef. de var. - δ _{am} (%)	9,76	10,40	3,88	25,81	25,63
f _{k,est} = f _m · K _E					52,32
f _{t0,k} - NBR 7190/97					63,32
Madeira AD, 8 corpos-de-prova					
Valor médio	837,88	828,25	11,83	123,19	122,64
Desvio-padrão – S	68,32	67,35	0,41	32,26	32,61
Coef. de var. - δ _{am} (%)	8,15	8,13	3,46	26,18	26,59
f _{k,est} = f _m · K _E					68,99
f _{t0,k} - NBR 7190/97					85,85
Madeira BD e AD, 20 corpos-de-prova					
Valor médio	725,05	722,85	11,79	103,99	103,33
Desvio-padrão - S	116,92	110,15	0,43	31,03	31,06
Coef. de var. - δ _{am} (%)	16,13	15,24	3,63	29,84	30,06
f _{k,est} = f _m · K _E					52,24
f _{t0,k} - NBR 7190/97					72,33

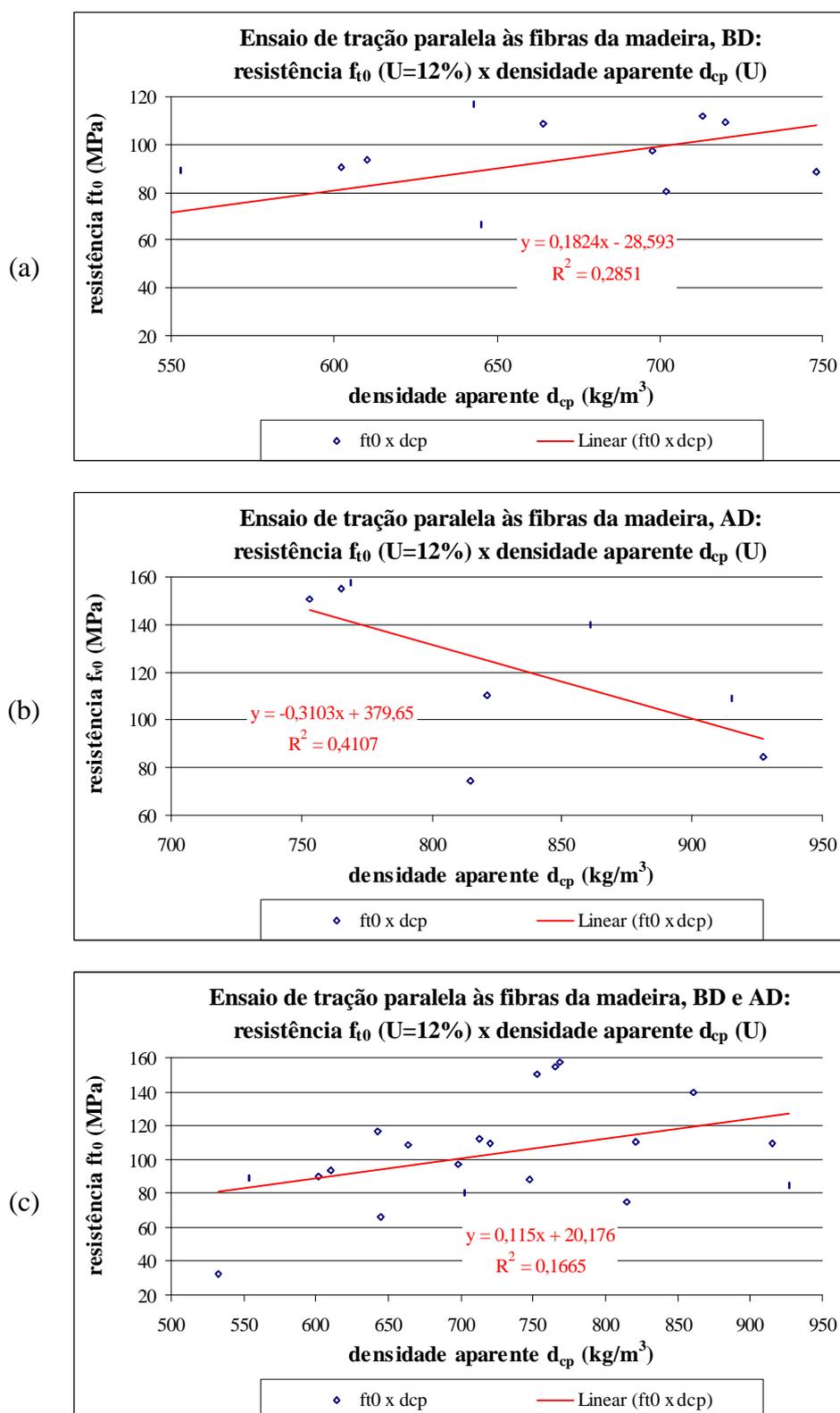


FIGURA 4.9 – Resistência da Madeira na Tração Paralela às Fibras x Densidade Aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD

4.2.6 Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva

Ensaio com a força aplicada paralela as fibras das peças de madeira

Na TAB. 4.12, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva, com força aplicada paralela as fibras das peças de madeira. Na FIG. 4.10, são apresentados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.12 – Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva Paralela às Fibras

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U	Resistência	
	Tábua - d_t	Corpo-de-prova		f_{gv0} (U)	f_{gv0} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	650,17	649,57	11,88	9,38	9,34
Desvio-padrão - S	63,45	55,73	0,38	1,56	1,55
Coef. de var. - δ_{am} (%)	9,76	8,58	3,17	16,7	16,5
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					6,80
$f_{gv0,k}$ - NBR 7190/97					7,55
Madeira AD, 10 corpos-de-prova					
Valor médio	847,75	846,03	11,90	11,94	11,88
Desvio-padrão - S	61,44	52,88	0,39	2,42	2,32
Coef. de var. - δ_{am} (%)	7,25	6,25	3,31	20,31	19,52
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					8,07
$f_{gv0,k}$ - NBR 7190/97					9,70
Madeira BD e AD, 22 corpos-de-prova					
Valor médio	748,96	747,80	11,89	10,66	10,61
Desvio-padrão - S	117,96	113,54	0,38	2,39	2,32
Coef. de var. - δ_{am} (%)	15,75	15,18	3,17	22,4	21,9
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$					6,79
$f_{gv0,k}$ - NBR 7190/97					7,65

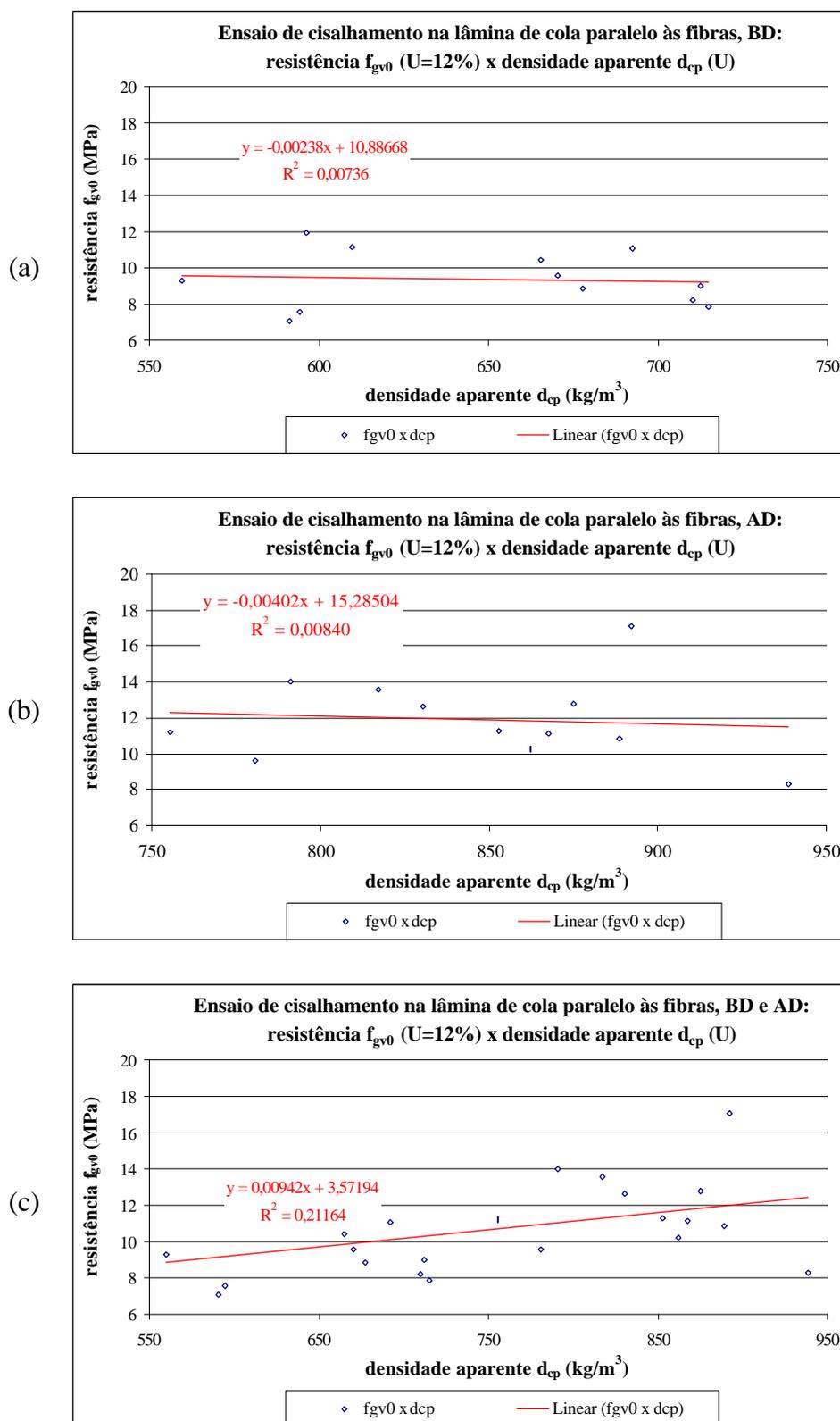


FIGURA 4.10 – Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva Paralelo às Fibras da Madeira x Densidade Aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD

Ensaio com as fibras das peças de madeira normais entre si

Na TAB. 4.13, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva, com as fibras das peças de madeira normais entre si. Na FIG. 4.11, são apresentados os gráficos correspondentes.

TABELA 4.13 – Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva com as Fibras das Peças de Madeira Normais Entre Si

Parâmetro \ Propriedade	Dens. Aparente		Teor de umidade U (%)	Resistência		
	Tábua	Corpo- de-prova		$f_{gv0-90, \text{máx}}$ (U)	f_{gv0-90} (U)	f_{gv0-90} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(MPa)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 11 corpos-de-prova						
Valor médio	643,27	644,06	11,92	4,62	3,89	3,88
Desvio-padrão - S	61,65	54,91	0,42	0,68	0,94	0,94
Coef. de var. - δ_{am} (%)	9,58	8,53	3,49	14,80	24,14	24,17
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$						2,34
$f_{gv0-90,k}$ - NBR 7190/97						2,71
Madeira AD, 12 corpos-de-prova						
Valor médio	847,08	845,19	12,78	5,53	4,62	4,73
Desvio-padrão - S	62,43	60,94	0,66	0,85	0,95	0,99
Coef. de var. - δ_{am} (%)	7,37	7,21	5,13	15,39	20,57	20,83
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$						3,11
$f_{gv0-90,k}$ - NBR 7190/97						3,88
Madeira BD e AD, 23 corpos-de-prova						
Valor médio	749,61	749,00	12,37	5,09	4,27	4,32
Desvio-padrão - S	120,47	117,39	0,70	0,89	1,00	1,04
Coef. de var. - δ_{am} (%)	16,07	15,67	5,65	17,43	23,34	24,00
$f_{k,est} = f_m \cdot K_E$						2,62
$f_{gv0-90,k}$ - NBR 7190/97						3,03

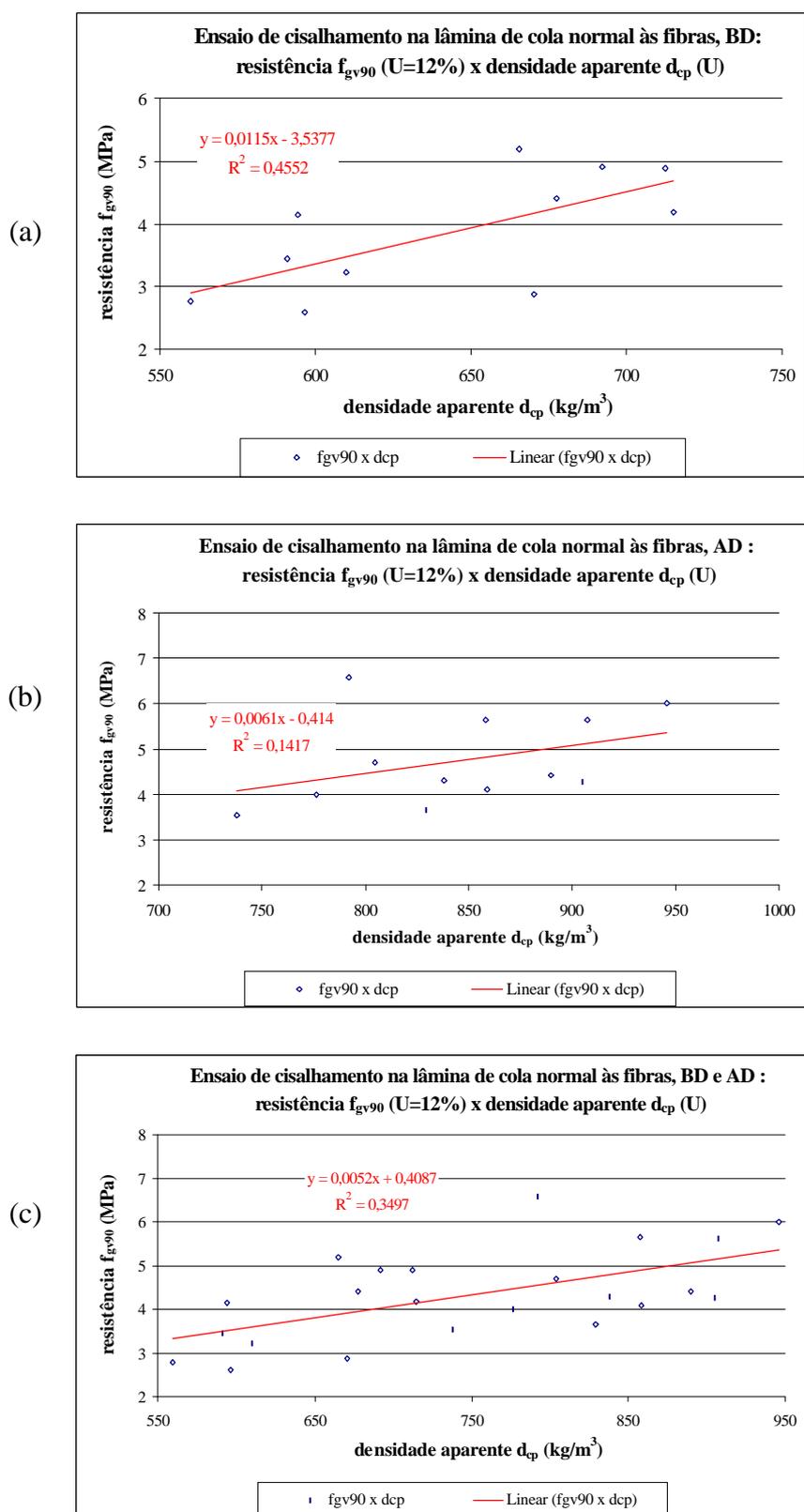


FIGURA 4.11 – Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva com as Fibras das Peças de Madeira Normais Entre Si x Densidade Aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD

Ensaio com as fibras das peças de madeira inclinadas entre si

Na TAB. 4.14, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento na lâmina adesiva para diferentes ângulos de inclinação das peças ligadas, obtidos de 12 séries de corpos-de-prova de madeira de menor densidade. Na TAB. 4.15, apresentam-se os resultados médios das densidades e umidades dos corpos-de-prova das diferentes séries.

TABELA 4.14 – Resistência (MPa) ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva Inclinada em Relação às Fibras

Resistência / Parâmetro	Ângulo entre as peças ($^{\circ}$)							
	0	15	30	45	60	75	90	
$f_{gv0-\alpha, \text{máx}}$	Valor médio - f_m	10,62	11,50	9,40	7,74	6,04	4,84	4,59
(U)	Desvio-padrão – S	2,24	1,43	1,90	1,36	1,11	0,71	0,83
	Coef. de var.- $\delta_{am}(\%)$	21,10	12,4	20,3	17,6	18,4	14,6	18,0
$f_{gv0-\alpha, 0,2\%}$	Valor médio - f_m	10,36	10,34	8,27	7,03	5,34	4,03	3,66
(U)	Desvio-padrão – S	1,96	1,11	1,54	1,35	1,21	0,68	0,73
	Coef. de var.- $\delta_{am}(\%)$	18,97	10,73	18,68	19,13	22,75	16,83	19,87
$f_{gv0-\alpha, 0,2\%}$	Valor médio - f_m	10,24	10,21	8,18	6,95	5,28	3,98	3,61
(U=12%)	Desvio-padrão – S	2,01	1,06	1,61	1,38	1,25	0,69	0,70
	Coef. de var.- $\delta_{am}(\%)$	19,6	10,3	19,7	19,9	23,7	17,3	19,5
$f_{k, \text{est}} = f_m \cdot K_E$		6,94	8,47	5,53	4,68	3,22	2,85	2,45
$f_{gv0-\alpha, 0,2\%, k}$ (NBR 7190/97)		7,17	8,90	6,30	5,05	3,70	3,39	2,69

A densidade aparente média obtida dos corpos-de-prova foi de 701 kg/m^3 , com Desvio-padrão amostral (S) de $66,83 \text{ kg/m}^3$ e coeficiente de variação amostral (δ_{am}) de 9,5%. O teor de umidade médio obtido dos corpos-de-prova foi de 11,75%, com Desvio-padrão amostral (S) de 1,01% e coeficiente de variação amostral (δ_{am}) de 8,6%.

4.2.7 Resistência à Tração Normal à Lâmina de Cola

Na TAB. 4.15 apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de tração normal à lâmina adesiva. Na FIG. 4.12 são apresentados os gráficos das resistências em função da densidade aparente dos corpos-de-prova correspondentes.

TABELA 4.15 – Resistência à Tração Normal à Lâmina Adesiva

Parâmetro \ Propriedade	Densidade Aparente		Teor de umidade U	Resistência	
	Tábua - d _t	Corpo- de-prova		f _{gt90} (U)	f _{gt90} (U=12%)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
Madeira BD, 12 corpos-de-prova					
Valor médio	650,17	659,67	11,74	3,89	3,86
Desvio-padrão - S	63,45	61,30	0,40	0,87	0,87
Coef. de var. - δ _{am} (%)	9,76	9,29	3,43	22,41	22,66
f _{k,est} = f _m · K _E					2,42
f _{gt90,k} – NBR 7190/97					2,70
Madeira AD, 10 corpos-de-prova					
Valor médio	850,80	852,70	11,70	4,13	4,09
Desvio-padrão - S	64,57	70,28	0,66	0,99	0,95
Coef. de var. - δ _{am} (%)	7,59	8,24	5,66	23,98	23,34
f _{k,est} = f _m · K _E					2,52
f _{gt90,k} – NBR 7190/97					2,86
Madeira BD e AD, 22 corpos-de-prova					
Valor médio	741,36	747,41	11,72	4,00	3,96
Desvio-padrão - S	119,80	117,32	0,52	0,91	0,90
Coef. de var. - δ _{am} (%)	16,16	15,70	4,46	22,84	22,63
f _{k,est} = f _m · K _E					2,49
f _{gt90,k} – NBR 7190/97					2,77

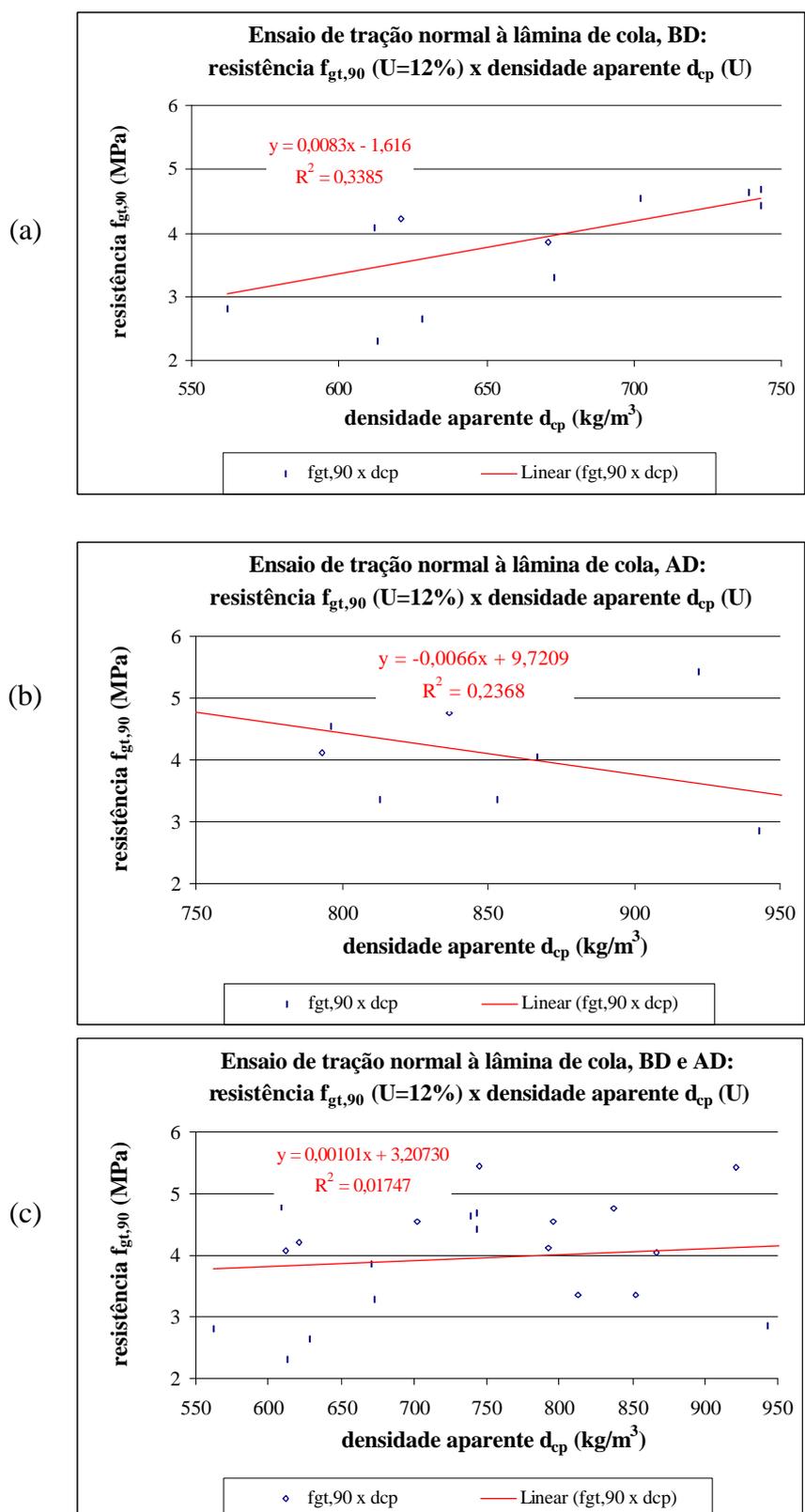


FIGURA 4.12 – Resistência à Tração Normal à Lâmina Adesiva, com as Fibras das Peças de Madeira Paralelas Entre Si x Densidade Aparente: a) BD; b) AD; c) BD e AD

4.2.8 Correlação Entre Densidade das Tábuas e de Corpos-de-prova

Na FIG. 4.13, apresentam-se correlações entre a densidade aparente das tábuas de origem e a de corpos-de-prova de caracterização de propriedades da madeira.

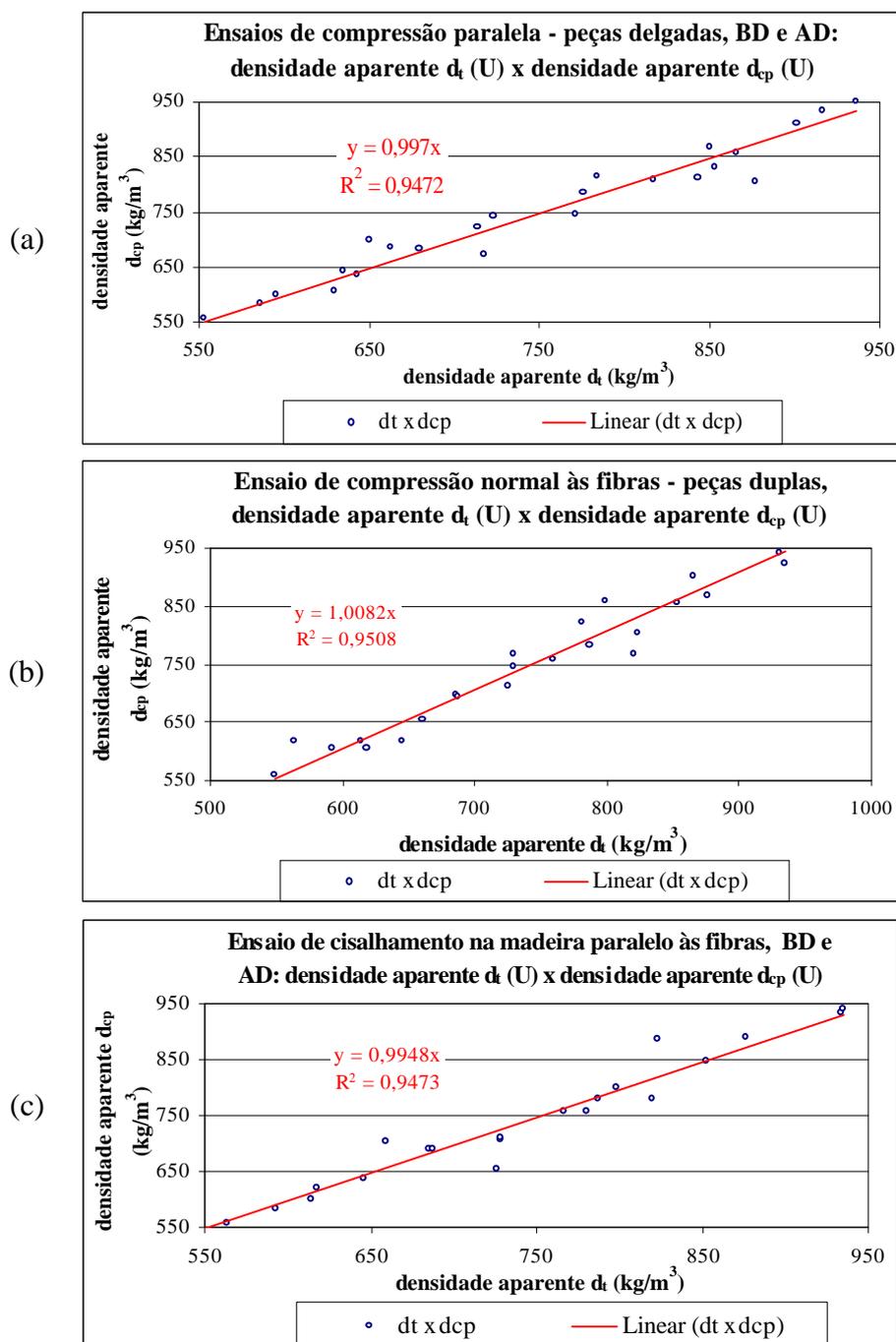


FIGURA 4.13 – Correlação entre a Densidade Aparente da Madeira dos Corpos-de-Prova e das Tábuas de Origem dos Ensaios de: a) Compressão Paralela - Peças Esbeltas; b) Compressão Normal; c) Cisalhamento Paralelo às Fibras

4.2.11 Discussão dos Resultados

A resistência e a rigidez da madeira na compressão paralela podem ser consideradas elevadas. A resistência e a rigidez da madeira obtidas na compressão normal podem ser consideradas relativamente baixas, em comparação aos correspondentes resultados obtidos na compressão paralela. Foram obtidos valores de $f_{c90,m} = 10\% f_{c0,m}$ e $E_{c90,m} = E_{c0,m}/30$, quando a NBR-7190, ABNT (1997), sugere relações de $f_{c90,m} = 25\% f_{c0,m}$ e $E_{c90,m} = E_{c0,m}/20$. O resultado médio da resistência na compressão normal dos corpos-de-prova com $L_0 = 60$ mm e madeira de menor densidade foi cerca de 17% superior ao valor obtido com $L_0 = 100$ mm, em concordância com o afirmado por GEHRI (1998).

Nos ensaios de tração paralela às fibras, foram obtidos elevados coeficientes de variação, superiores a 25%.

A resistência média ao cisalhamento na lâmina adesiva, paralelo às fibras, foi inferior à obtida nos correspondentes ensaios de cisalhamento da madeira, com diferença mais acentuada para a madeira de maior densidade, evidenciando maior dificuldade de colagem desta madeira.

As resistências ao cisalhamento na lâmina adesiva, normal às fibras, foram obtidas considerando-se uma deformada residual de 0,2%, com ruptura ocorrendo com predominância de arrancamento das fibras normais ao carregamento. A relação entre a resistência média ao cisalhamento na lâmina adesiva, com a força aplicada normal às fibras e paralela às fibras, f_{gv0-90}/f_{gv0} , foi de 0,41 para as séries iniciais e de 0,43 nas séries utilizadas para avaliar o cisalhamento inclinado.

Os resultados das resistências obtidos nos ensaios de cisalhamento na lâmina adesiva com variação da inclinação relativa das peças coladas, corrigidas para o teor de umidade de 12% , são apresentadas na FIG. 4.14 em função do ângulo de inclinação das fibras, junto com a curva obtida a partir dos valores médios e a obtida com o emprego da fórmula de Hankinson com o usual valor $n = 2$.

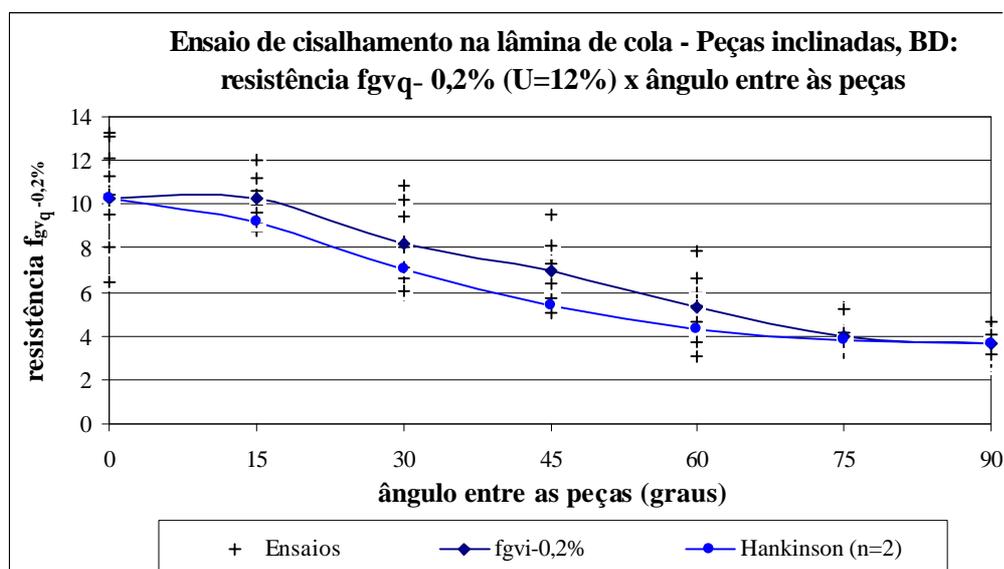


FIGURA 4.14 – Resistência ao Cisalhamento na Lâmina Adesiva em Função da Inclinação das Peças Ligadas

Pode-se observar na FIG. 4.14 que a expressão de Hankinson com $n = 2$ produz, para inclinações intermediárias entre as fibras, uma avaliação levemente conservadora da resistência ao cisalhamento, conseqüentemente pode ser empregada, uma vez que é a favor da segurança.

No cisalhamento, a relação entre a resistência máxima e a resistência obtida com a deformação residual de 0,2% foi crescente com a inclinação relativa das peças. A resistência média para a inclinação de 0° , corrigida para o teor de umidade de 12%, foi superior à da série inicial, aproximando-se da resistência ao cisalhamento da madeira de menor densidade.

Em quase todos os ensaios de cisalhamento normal às fibras, foram mobilizadas grandes deformações de compressão normal antes da ruptura, evidenciando sua influência sobre o caráter dúctil do processo, como pode ser visto na FIG. 4.15b. Em alguns corpos-de-prova as superfícies de ruptura acompanharam os anéis de crescimento, ver FIG. 4.15a. Em alguns ensaios, foram detectadas na peça de madeira com as fibras normais à direção da força aplicada fissuras inclinadas na direção do fluxo de tensões de compressão, como pode ser visto no detalhe da FIG 4.15c.

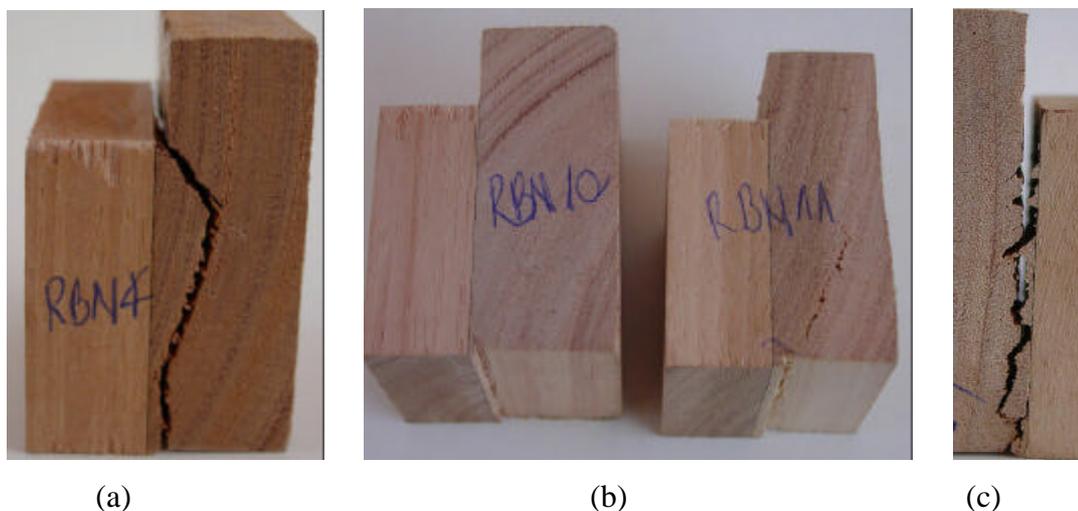


FIGURA 4.15 – Corpos-de-Prova de Cisalhamento na Lâmina Adesiva Normal às Fibras da Madeira: a) Superfície de Ruptura Curva Acompanhando o Anel de Crescimento; b) Detalhe da Acentuada Deformação da Madeira com as Fibras Normais ao Carregamento; c) Superfície de Ruptura com Trincas de Tração Normal às Fibras

Observou-se que parte das rupturas nos ensaios de tração normal à lâmina adesiva ocorreu na madeira por tração normal às fibras, evidenciando a influência da reduzida resistência da madeira a este esforço e a necessidade de limitação de seu valor em ligações de peças estruturais.

Devido à elevada variação da densidade do lote de madeira disponível, procurou-se, neste trabalho, avaliar de forma objetiva e simplificada a influência da densidade sobre as propriedades mecânicas da madeira em estudo. Com este objetivo foram apresentadas apenas correlações lineares entre as propriedades avaliadas e a densidade aparente, sem uma avaliação do mérito do emprego de funções de correlações alternativas, tais como polinomiais com ordem mais elevadas e exponenciais, que poderiam ser mais eficientes na representação da influência da variação da densidade na variação da propriedade considerada.

A magnitude da correlação entre duas propriedades (x e y) e, conseqüentemente, sua importância, estão associadas a dois aspectos complementares. O primeiro está relacionado à qualidade da aproximação $y \cong f(x)$, que pode ser avaliada pelo coeficiente

R^2 da correlação obtida. O segundo refere-se à amplitude relativa da correlação $y \cong f(x)$, definida pela variação da propriedade em estudo ao longo da faixa de variação da propriedade independente x . Esta amplitude relativa (a_r) de uma correlação definida na forma $y \cong f(x) = ax + b$ pode ser obtida pela razão $\Delta f/f_{méd}$, com $\Delta f = f(x_{máx}) - f(x_{mín})$ e $f_{méd} = f(x_{méd})$. O produto destes dois fatores, $a_r \times R^2$, pode ser utilizado para quantificar a magnitude da correlação estabelecida.

Nas avaliações efetuadas das propriedades da madeira utilizada, a variável independente definida pela densidade aparente apresentou uma faixa de variação de 550 a 950 kg/m³. Na TAB. 4.16, são relacionados os valores de a_r e R^2 para propriedades estudadas, obtidas das correlações obtidas correspondentes e o valor do produto $a_r \times R^2$.

TABELA 4.16 – Valores do Produto da Amplitude Relativa a_r e do Coeficiente R^2 Obtidos Entre Propriedades Mecânicas e a Densidade Aparente da Madeira

Propriedade	a_r	R^2	$a_r \times R^2$
Resistência na compressão paralela	0,496	0,734	0,36
Módulo de elasticidade na compressão paralela	0,578	0,508	0,29
Resistência na compressão normal	0,73	0,667	0,49
Módulo de elasticidade na compressão normal	0,81	0,692	0,56
Resistência ao cisalhamento da madeira paralelo	0,671	0,766	0,51
Resistência à tração paralela	0,432	0,166	0,07
Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo	0,354	0,212	0,08
Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola normal	0,483	0,35	0,17
Resistência à tração normal	0,102	0,017	0,00

Embora a qualificação do produto $a_r \times R^2$ seja passível de críticas e discordâncias, adotou-se neste trabalho o seguinte critério para qualificação da correlação a partir dos valores obtidos dos produtos $a_r \times R^2$:

- Para $a_r \times R^2 \geq 0,25$, as correlações são elevadas ou importantes.

- Para $0,25 > a_r \times R^2 > 0,05$, as correlações são intermediárias ou de importância média.
- Para $a_r \times R^2 < 0,05$, as correlações são baixas ou pouco importantes.

Assim, para correlações consideradas elevadas, pode-se afirmar que na correlação estabelecida variações iguais ou maiores que 25% do valor médio da propriedade considerada ocorrem em função da variação da densidade aparente. Para correlações baixas, pode-se afirmar que na correlação estabelecida apenas variações iguais ou menores que 5% do valor médio ocorrem em função da variação da densidade.

De acordo com esta qualificação, pode-se afirmar que:

- Apenas a correlação da resistência à tração normal pode ser considerada baixa.
- As resistências e os módulos de elasticidade, obtidos tanto na compressão normal quanto na compressão paralela, e a resistência ao cisalhamento da madeira, devem ser considerados como apresentando elevadas ou importantes correlações com a densidade aparente.
- Para as demais resistências avaliadas: tração paralela, cisalhamento na lâmina de cola paralelo e normal às fibras, as correlações podem ser consideradas de importância ou intensidade média.

Em uma análise mais geral pode-se dizer que no lote de madeira estudada, com grande faixa de variação de densidade aparente, as elevadas correlações obtidas entre várias importantes propriedades mecânicas da madeira e a densidade aparente, a elevada correlação entre densidade aparente medida nos corpos-de-prova de reduzidas dimensões e nas tábuas de origem e a facilidade de obtenção destas últimas, indicam que a medição da densidade das tábuas pode ser utilizada pela indústria como parâmetro importante para a classificação preliminar de resistência e rigidez estrutural, visando a maior uniformidade dos produtos finais.

4.3 Resistência e Rigidez de Ligações Coladas Paralelas

4.3.1 Introdução

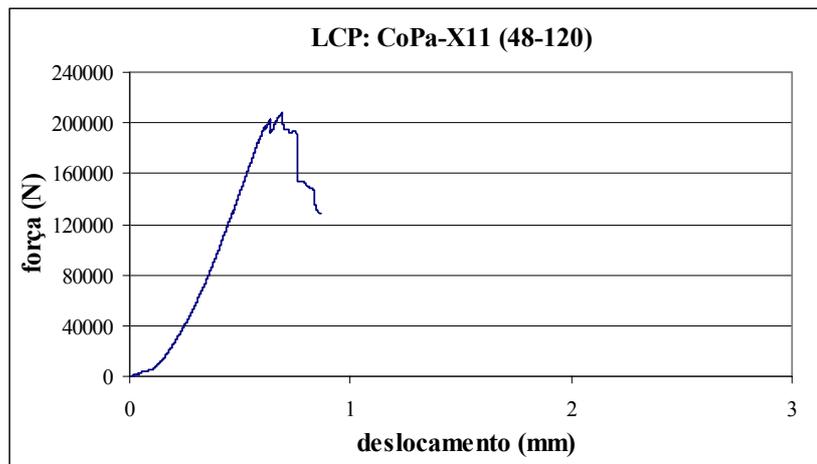
Neste item apresenta-se uma avaliação das resistências e das rigidezes de ligações coladas paralelas solicitadas por força de compressão centrada, para agrupamentos estatisticamente adequados dos resultados e um estudo das variações das resistências em função de alguns parâmetros relevantes.

A avaliação das resistências das ligações foi efetuada com base no resultado de 310 ensaios. A avaliação da rigidez das ligações coladas paralelas foi efetuada a partir dos resultados de 21 ensaios, com corpos-de-prova de $bc = hc = 120$ mm e madeira de menor densidade. Os valores das resistências e rigidezes obtidos nos ensaios foram corrigidos para o teor de umidade de referência de 12%.

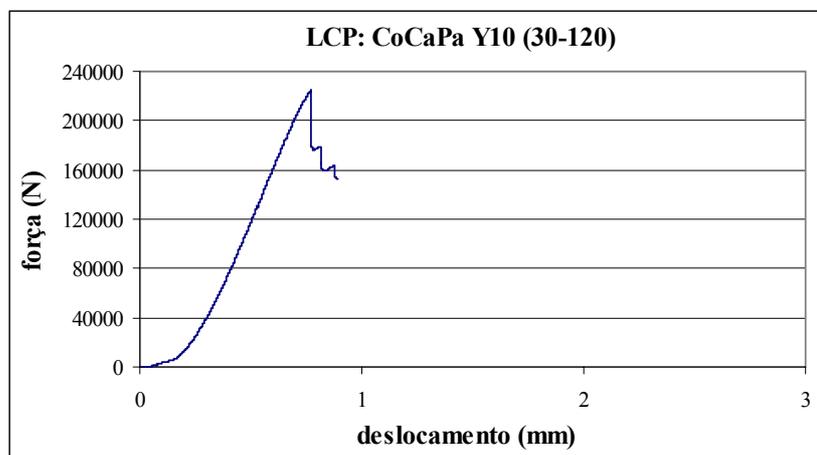
Em parte dos ensaios a ruptura dos corpos-de-prova se deu claramente por esmagamento da peça central e a ligação permaneceu íntegra. Em outra parte dos ensaios a ruptura final se deu por cisalhamento. Em alguns ensaios a ruptura final se deu por cisalhamento, com início de ruptura por compressão da peça central, com certa dificuldade para uma identificação precisa da causa principal. Em todos os ensaios realizados as rupturas podem ser consideradas frágeis e, conseqüentemente, as resistências foram definidas pelas correspondentes forças máximas resistidas.

Na FIG. 4.16 são apresentados, a título de exemplo, gráficos força x deslocamento de ligações coladas paralelas com $bc = hc = 120$ mm.

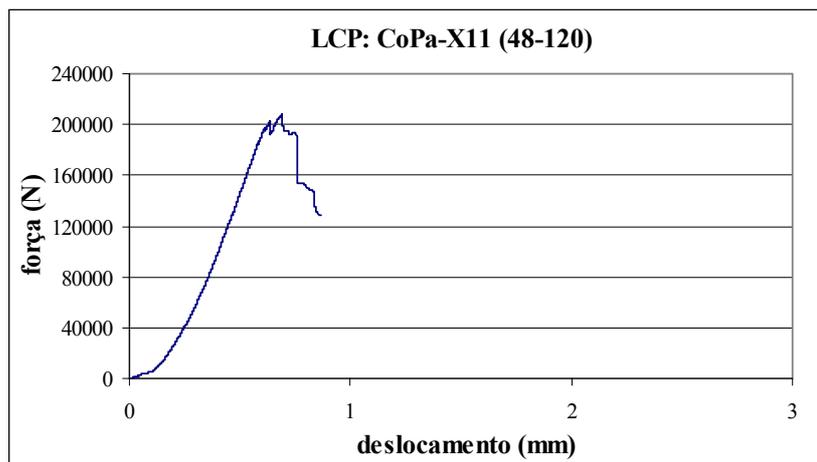
No Anexo B, são listados os resultados individuais dos ensaios, com a descrição sucinta do tipo de ruptura ocorrida. Apresentam-se também os gráficos força x deslocamento dos ensaios realizados para determinação das rigidezes.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.16 - Gráficos Força x Deslocamento, LCP, $b_c = h_c = 120$ mm:

a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm

A avaliação da eficiência de uma ligação, sob o ponto de vista da capacidade resistente, pode ser feita pela comparação entre a resistência da ligação e a resistência da peça mais fraca, ou pela comparação entre a resistência da ligação em estudo com a resistência de ligações executadas por meios usuais em corpos-de-prova análogos. No caso de ligações com três elementos alinhados submetidos à compressão, o esmagamento por compressão paralela às fibras da peça central ou das peças laterais corresponde ao esgotamento da resistência das peças ligadas e a 100% de eficiência na ligação.

Para efetuar a análise dos resultados dos ensaios no seu conjunto e para avaliação da eficiência das ligações, são empregados gráficos que permitem a comparação das resistências obtidas nos ensaios, em termos de tensão de compressão atuante na peça central, com o valor da resistência média da madeira.

Devido à elevada variabilidade das propriedades da madeira do lote de origem dos corpos-de-prova, são utilizados também gráficos que permitem uma avaliação direta da eficiência, definida pela relação entre a tensão de compressão atuante e a tensão de ruptura estimada da peça central. O valor estimado da tensão de ruptura de cada corpo-de-prova foi definido pela correlação linear com a densidade aparente, obtida nos ensaios de caracterização da madeira.

4.3.2 Análise Estatística dos Resultados de Resistência

Para a definição consistente da resistência e rigidez das ligações estudadas, a partir dos resultados dos ensaios realizados, é necessário inicialmente que sejam definidas estatisticamente as influências dos diferentes fatores sobre os resultados, de forma a se obter os agrupamentos qualificados dos mesmos.

Assim, os corpos-de-prova ensaiados apresentavam as seguintes diferenças fundamentais: três tipos de ligação, três diferentes espessuras das peças centrais, duas faixas de densidade da madeira e quatro dimensões para a largura (bc), com duas diferentes alturas da lâmina adesiva (hc), perfazendo oito diferentes dimensões para as áreas coladas e um total de 24 diferentes dimensões para os corpos-de-prova.

Com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros descritos anteriormente nas resistências obtidas nos ensaios, efetuaram-se comparações das médias por meio de análises de variância, apresentadas no Anexo E.

As análises de variância da resistência para cada fator isoladamente indicaram, para um nível de significância de 5%, que não se pode rejeitar a hipótese nula para o tipo de ligação e que a hipótese nula deve ser rejeitada para a espessura da peça central e para a faixa de densidade. Conseqüentemente, pode-se concluir para a resistência, com risco de 5%, que não houve diferença estatística em função do tipo de elemento mecânico adicional e que a resistência foi influenciada pela espessura da peça central e faixa de densidade.

Os resultados das análises de variância das resistências, efetuadas para os corpos-de-prova agrupados por dimensões, em função do tipo de ligação, da espessura da peça central e da interação entre os dois primeiros fatores, comprovaram, com raras exceções, as conclusões descritas anteriormente.

Estatisticamente, as resistências das ligações com madeira de maior densidade foram superiores as obtidas com madeira de menor densidade, com exceção de corpos-de-prova com $bc = hc = 72$ mm e com $bc = hc = 120$ mm, indicando a ocorrência de deficiências na colagem destes corpos-de-prova de madeira de maior densidade.

Em função destes resultados, foram efetuadas avaliações das resistências das ligações para cada uma das oito diferentes dimensões das áreas coladas, para cada uma das três diferentes espessuras das peças centrais, para a madeira de menor densidade, para a de maior densidade e para toda madeira em conjunto.

4.3.3 Resistência de Ligações com Peça Central de 24 mm

a) Madeira BD

Na TAB. 4.17, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas (LCP), com madeira de menor densidade e $t_c = 24$ mm.

TABELA 4.17 – Resistência de LCP, Madeira BD, $t_c = 24$ mm

Dimensões		Valores (U=12%)						Tensões	
nominiais:		Umid.	Dens.					(U=12%)	
bc / hc	n	$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{u,méd}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{gv0}^{(3)}$	$\sigma_{c0}^{(4)}$
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	6	12,89	712	59944	18,07	41235	47795	5,91	34,11
96 / 96	6	12,22	680	122268	11,19	98636	102969	6,69	53,10
72 / 108	6	13,24	696	110340	7,62	91282	109024	6,99	63,16
120 / 120	13	11,84	654	171247	9,73	142260	167013	5,78	60,56
96 / 144	6	12,09	696	147732	4,31	122215	145972	5,34	64,27
144 / 144	6	12,43	718	209829	10,12	173151	180018	5,01	65,33
120 / 180	6	11,87	680	177144	9,96	146547	166217	4,07	63,68
144 / 216	6	12,34	719	210286	7,25	173964	204300	3,35	64,88
Valor médio		12,30	689		9,78				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = média \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = média \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Nas FIG. 4.17 e 4.18, apresentam-se, respectivamente, o gráfico da tensão média de compressão e da taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina de cola.

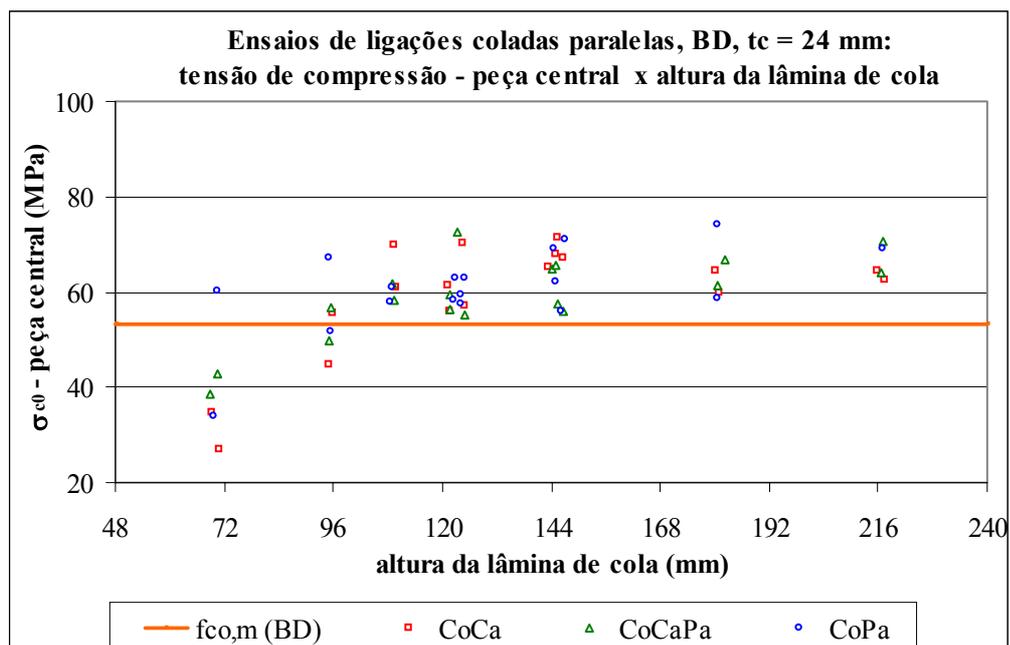


FIGURA 4.17 – Gráfico da Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 24$ mm

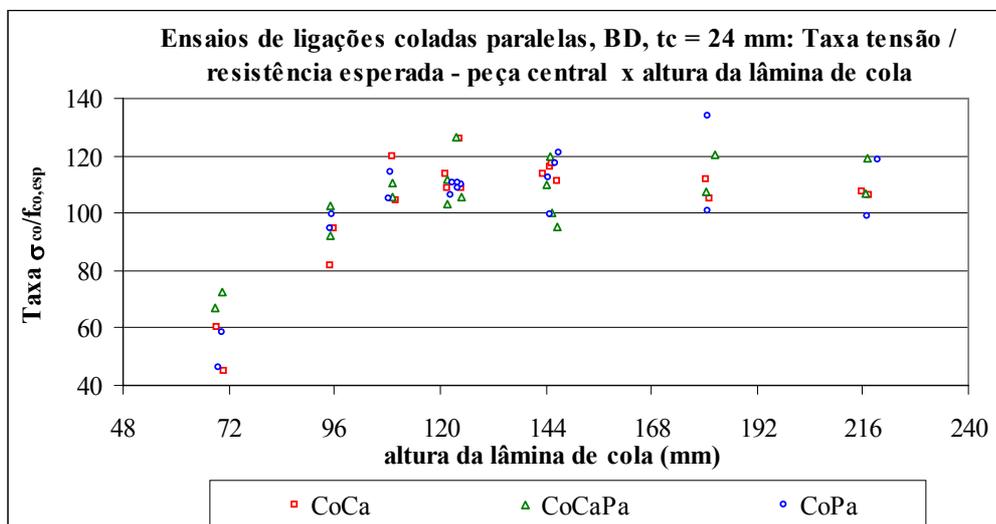


FIGURA 4.18 – Gráfico da Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 24$ mm

b) Madeira AD

Na TAB. 4.18, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de maior densidade e $t_c = 24$ mm.

TABELA 4.18 - Resistência de LCP, Madeira AD, $t_c = 24$ mm

Dimensões		Força (U=12%)						Tensões (U=12%)	
nominais:		Umid.	Dens.						
bc / hc		$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{u,méd}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{gv0}^{(3)}$	$\sigma_{c0}^{(4)}$
	n	(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	6	13,39	810	49270	8,61	40760	44730	4,81	28,56
96 / 96	6	13,35	834	143107	12,35	112580	112554	7,82	63,38
72 / 108	6	13,42	852	125514	10,05	103726	121832	7,98	72,44
120 / 120	6	13,30	841	159106	20,41	103016	113067	5,49	58,56
96 / 144	6	13,22	921	179388	5,26	148403	180191	6,36	78,14
144 / 144	6	13,50	851	241387	13,91	183391	183862	5,77	73,04
120 / 180	6	13,28	855	206044	5,82	170455	207117	4,75	74,51
144 / 216	6	12,96	878	244679	8,84	202417	230376	3,92	74,20
Valor Médio		13,30	855		10,66				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = média \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = média \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Na FIG. 4.19, apresenta-se o gráfico da tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva. Na FIG. 4.20, apresenta-se o gráfico da taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina de cola.

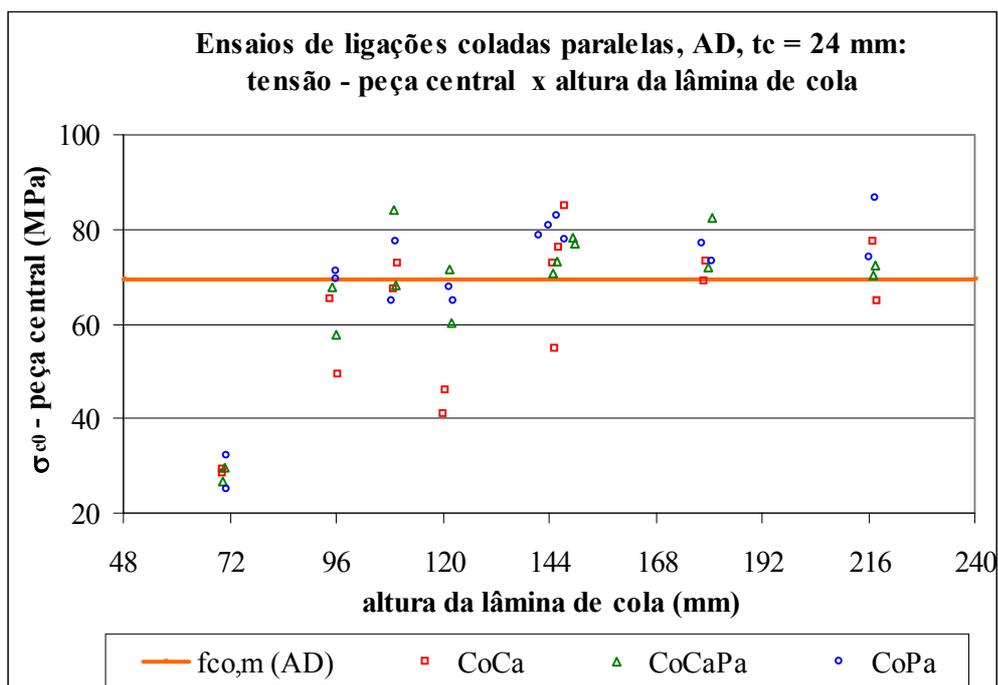


FIGURA 4.19 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 24$ mm

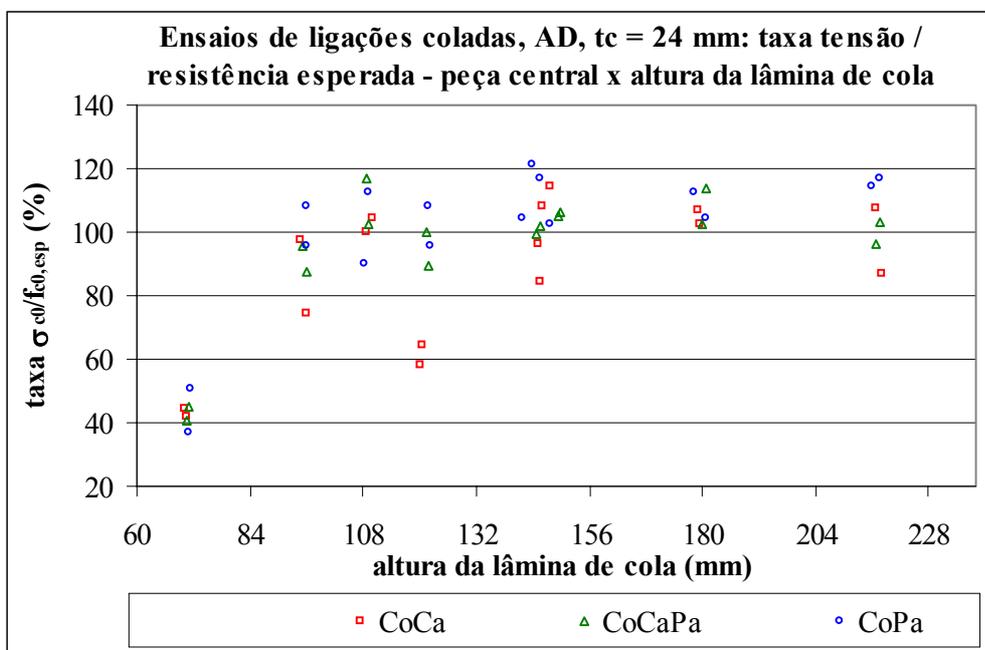


FIGURA 4.20 – Gráfico da Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 24$ mm

c) Madeira BD e AD

Na TAB. 4.19, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, para madeira de menor e de maior densidade com $t_c = 24$ mm.

TABELA 4.19 - Resistência de LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm

Dimensões nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				Tensões (U=12%)	
bc / hc	n	$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{u,méd}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{gv0}^{(3)}$	$\sigma_{c0}^{(4)}$
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	12	13,14	761	54607	17,62	38289	47609	5,36	31,33
96 / 96	12	12,78	757	132687	14,01	101159	108450	7,26	58,24
72 / 108	12	13,33	774	117927	10,97	95987	107702	7,48	67,80
120 / 120	19	12,30	713	167413	13,51	129500	146958	5,69	59,93
96 / 144	12	12,66	809	163560	11,14	132658	150257	5,85	71,20
144 / 144	12	12,97	785	225608	13,94	172269	182393	5,39	69,18
120 / 180	12	12,57	768	191594	10,88	156240	166072	4,41	69,10
144 / 216	12	12,65	799	227483	11,13	184542	205928	3,63	69,54
Valor Médio		12,77	767		12,90				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = média \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = média \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Na FIG. 4.21 a 4.24, apresentam-se os seguintes gráficos: resistência da ligação x área colada e correspondente reta de correlação; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina de cola; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva e correspondente reta de correlação, para $hc \leq 108$ mm e da taxa de resistência (tensão média / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina adesiva, com a resistência estimada obtida em função da densidade média do corpo-de-prova pela expressão obtida pela correlação linear definida na FIG. 4.3c.

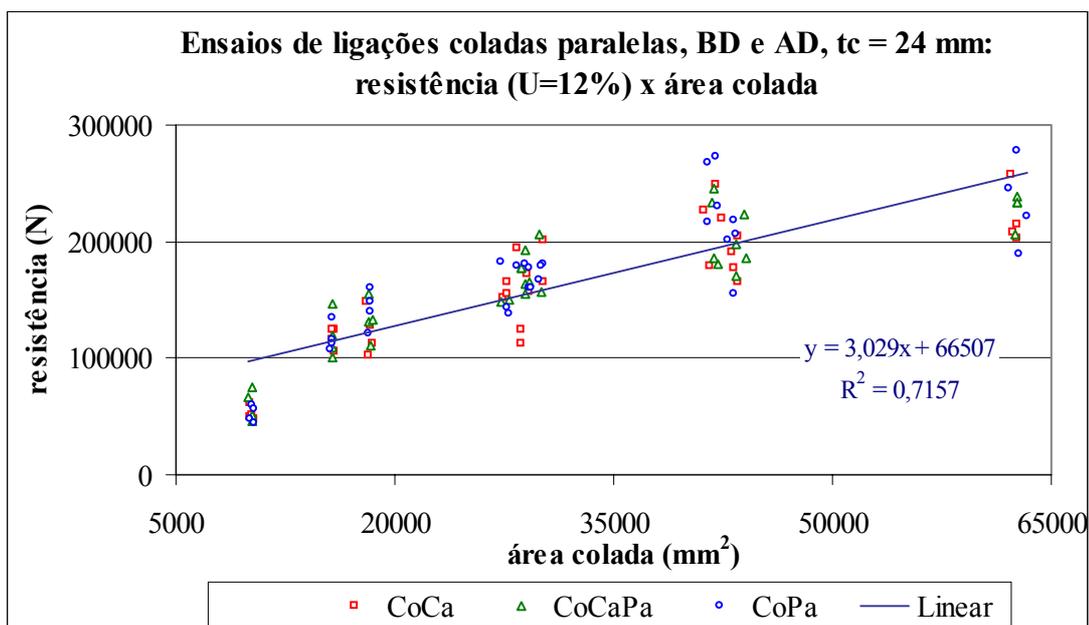


FIGURA 4.21 – Gráfico Resistência x Área Colada, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm

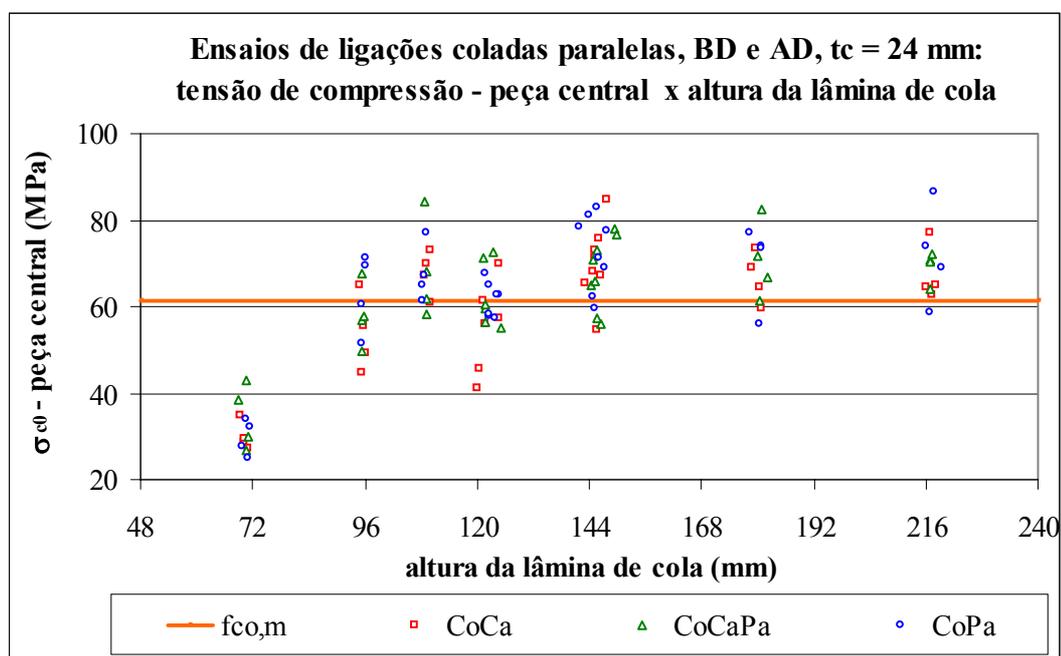


FIGURA 4.22 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm

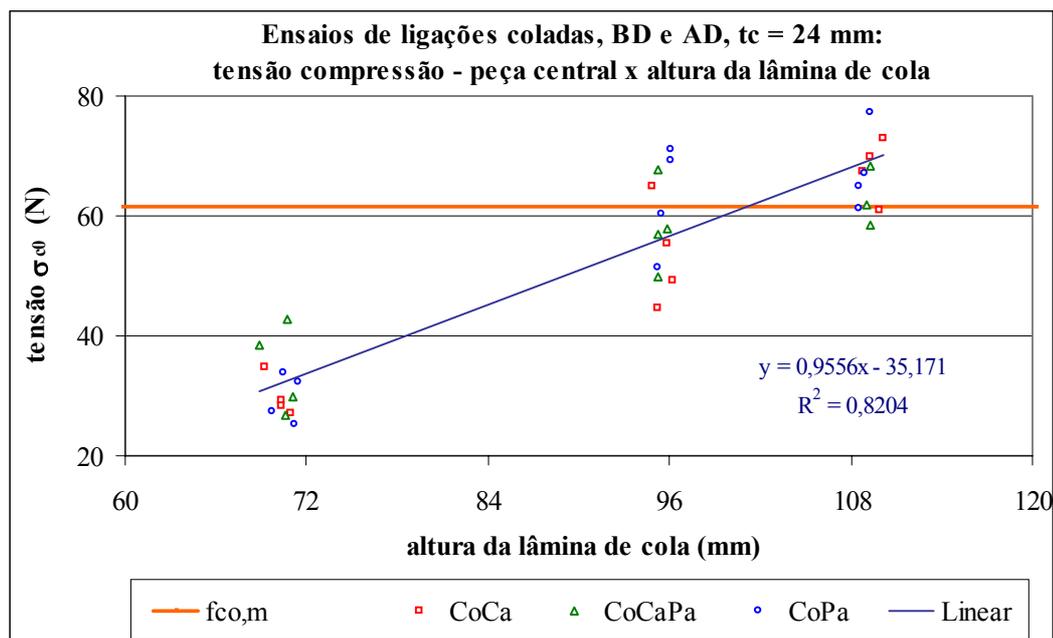


FIGURA 4.23 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva e Correspondente Reto de Correlação, para $h_c \leq 108$ mm, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm

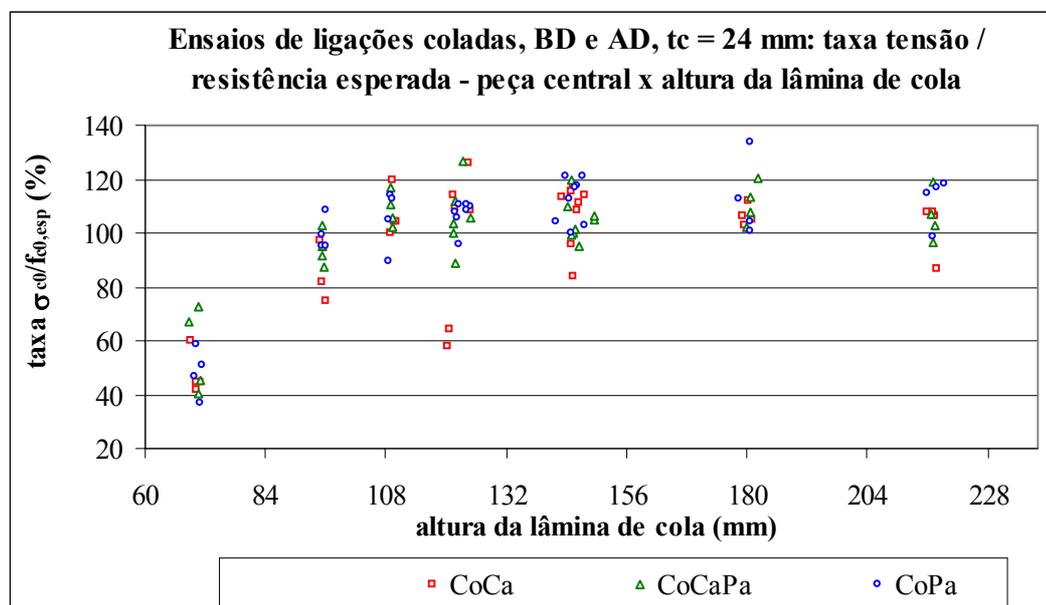


FIGURA 4.24 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão/ Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 24$ mm

4.3.4 Resistência de Ligações com Peça Central de 30 mm

a) Madeira BD

Na TAB. 4.20, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com $t_c = 30$ mm, madeira de menor densidade.

TABELA 4.20 - Resistência de LCP, Madeira BD, $t_c = 30$ mm

Dimensões nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				Tensões (U=12%)	
bc / hc	n	$U_{\text{méd}}$ (%)	$d_{\text{cp,méd}}$ (kg/m ³)	$F_{\text{u,méd}}$ (N)	δ_{am} (%)	$F_k^{(1)}$ (N)	$F_k^{(2)}$ (N)	$\tau_{\text{gv0}}^{(3)}$ (MPa)	$\sigma_{\text{c0}}^{(4)}$ (MPa)
72 / 72	6	13,07	707	80168	15,58	58594	62464	7,86	37,41
96 / 96	6	12,04	693	138875	18,85	93659	100796	7,66	46,62
72 / 108	6	13,07	703	122257	12,61	95629	98574	7,78	57,54
120 / 120	13	11,99	718	200999	10,49	165309	178982	7,09	58,98
96 / 144	6	12,05	681	167719	8,67	138750	153905	6,07	56,63
144 / 144	6	12,43	706	257750	8,71	213230	229565	6,14	60,70
120 / 180	6	11,92	660	211211	4,54	174730	214228	4,90	59,46
144 / 216	6	12,45	688	213741	5,19	176823	206032	3,41	50,45
Valor médio		12,33	697		10,58				

(1) $F_{k,\text{est}} = F_{\text{u,méd}} \cdot K_E = F_{\text{u,méd}} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,\text{esp}} \delta_{\text{am}})$, com $\delta_{\text{am,min}} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{\text{gv0}} = \text{média} \{F_{\text{u}} / (2 \cdot \text{bc} \cdot \text{hc})\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{\text{c0}} = \text{média} \{F_{\text{u}} / (\text{bc} \cdot \text{tc})\}$

Na FIG. 4.25, apresenta-se o gráfico da tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva. Na FIG. 4.26, apresenta-se o gráfico da taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina de cola.

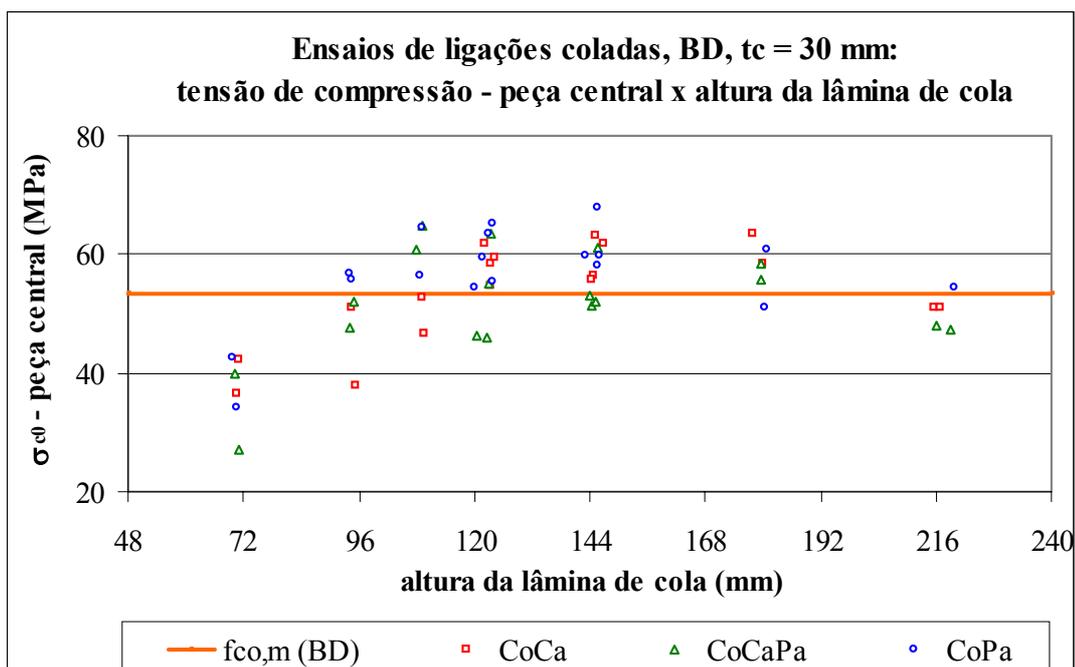


FIGURA 4.25 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 30$ mm

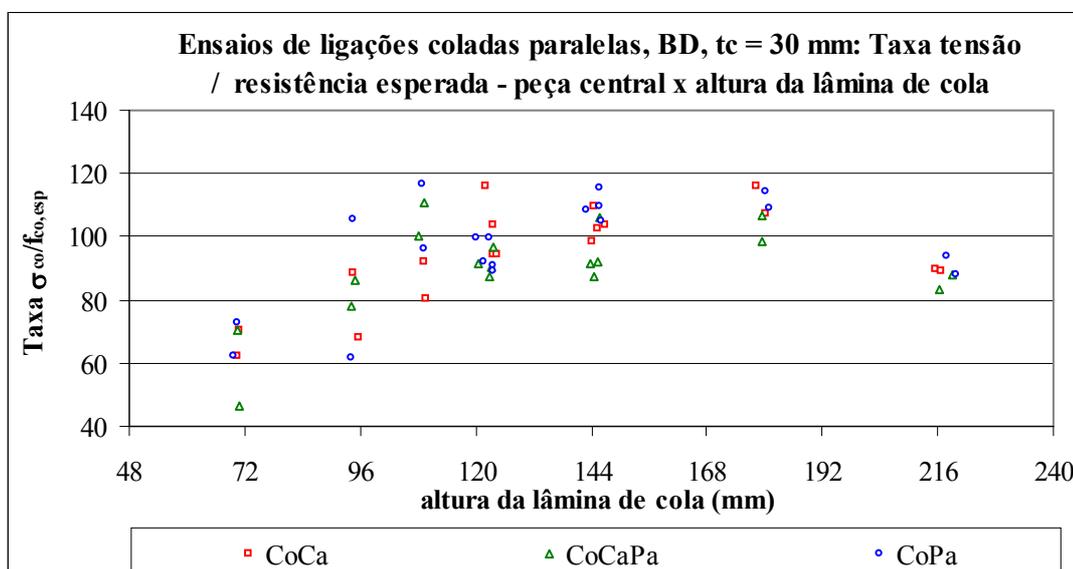


FIGURA 4.26 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 30$ mm

b) Madeira AD

Na TAB. 4.21, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de maior densidade e $t_c = 30$ mm.

TABELA 4.21 - Resistência de LCP, Madeira AD, $t_c = 30$ mm

Dimensões		Tensões							
nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)			(U=12%)		
bc / hc		$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{u,méd}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{gv0}^{(3)}$	$\sigma_{c0}^{(4)}$
	n	(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	6	13,28	803	42931	9,58	35516	37451	4,21	19,37
96 / 96	6	13,49	814	150220	20,08	98119	105154	8,25	51,28
72 / 108	6	13,34	840	140301	17,07	98934	107839	8,89	62,76
120 / 120	6	13,25	821	162730	23,25	97380	122280	5,57	45,87
96 / 144	6	13,32	865	203627	5,97	168456	194482	7,21	69,13
144 / 144	6	13,40	872	276309	14,99	204769	214119	6,57	64,50
120 / 180	6	13,33	795	235108	5,27	194499	224796	5,44	65,70
144 / 216	6	13,18	863	275403	3,31	227834	291276	4,39	65,11
Valor médio		13,32	834		12,44				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = média \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = média \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Na FIG. 4.27, apresenta-se o gráfico da tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva. Na FIG. 4.28, apresenta-se o gráfico da taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina de cola.

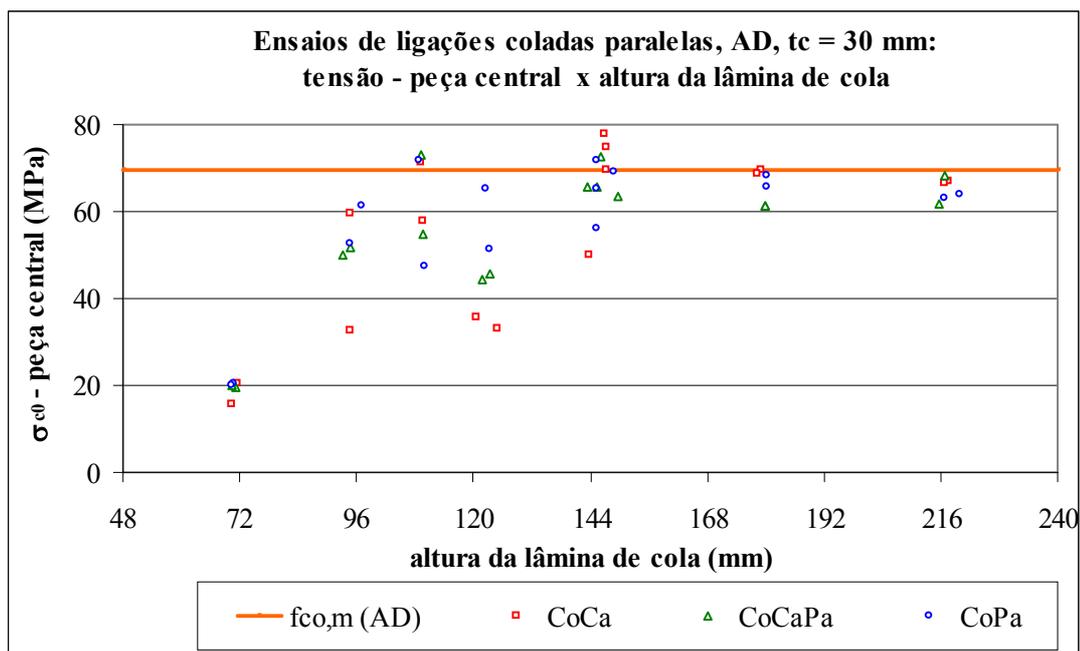


FIGURA 4.27 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 30$ mm

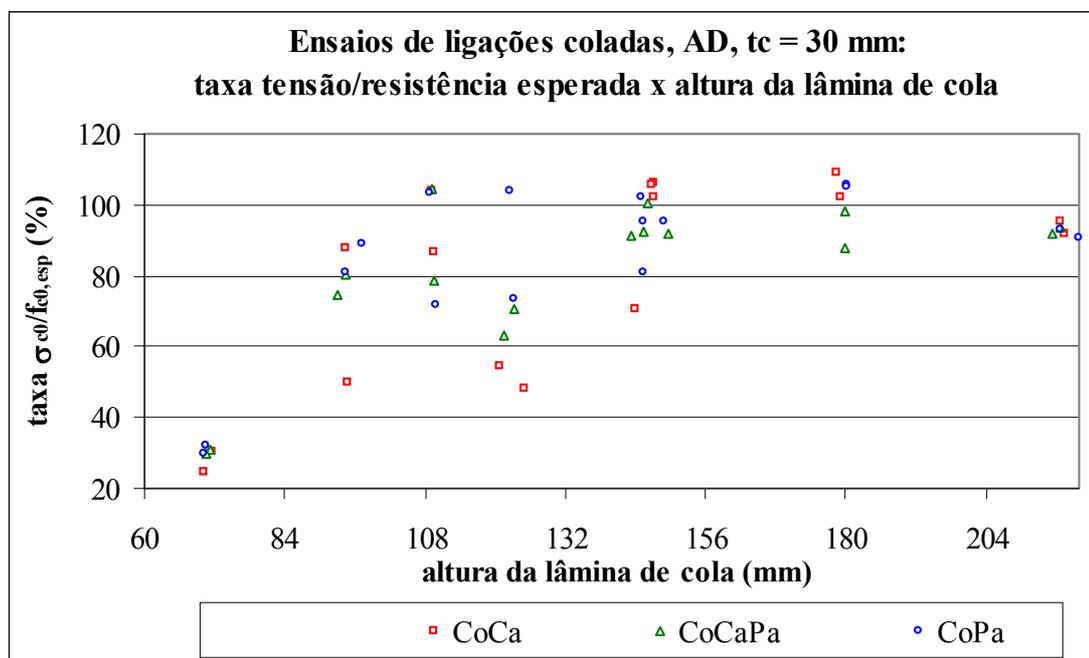


FIGURA 4.28 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 30$ mm

c) Madeira BD e AD

Na TAB. 4.22, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de BD e AD e $t_c = 30$ mm.

TABELA 4.22 - Resistência de LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm

Dimensões nominais:		Umíd.	Dens.	Força (U=12%)				Tensões (U=12%)	
bc / hc	n	U _{méd}	d _{cp,méd}	F _{u,méd}	δ_{am}	F _k ⁽¹⁾	F _k ⁽²⁾	τ_{gv0} ⁽³⁾	σ_{c0} ⁽⁴⁾
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	12	13,17	755	61550	34,72	25306	43271	6,03	28,39
96 / 96	12	12,77	754	144547	19,07	97797	101183	7,96	48,95
72 / 108	12	13,21	771	131279	16,29	95010	104036	8,33	60,15
120 / 120	19	12,39	750	188914	16,97	135175	134654	6,42	53,20
96 / 144	12	12,68	773	185673	12,22	147192	154838	6,64	62,88
144 / 144	12	12,92	789	267030	12,44	210692	236345	6,35	62,60
120 / 180	12	12,63	728	223159	7,33	195417	219329	5,17	62,58
144 / 216	12	12,81	775	244572	13,75	187538	208592	3,90	57,78
Valor Médio		12,79	761		16,60				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = \text{média} \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = \text{média} \{F_u / (bc \cdot tc)\}$

Nas FIG. 4.29 a 4.32 apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência da ligação x área colada e correspondente reta de correlação; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva e correspondente reta de correlação, para $hc \leq 108$ mm e da taxa de resistência (tensão média / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina de cola.

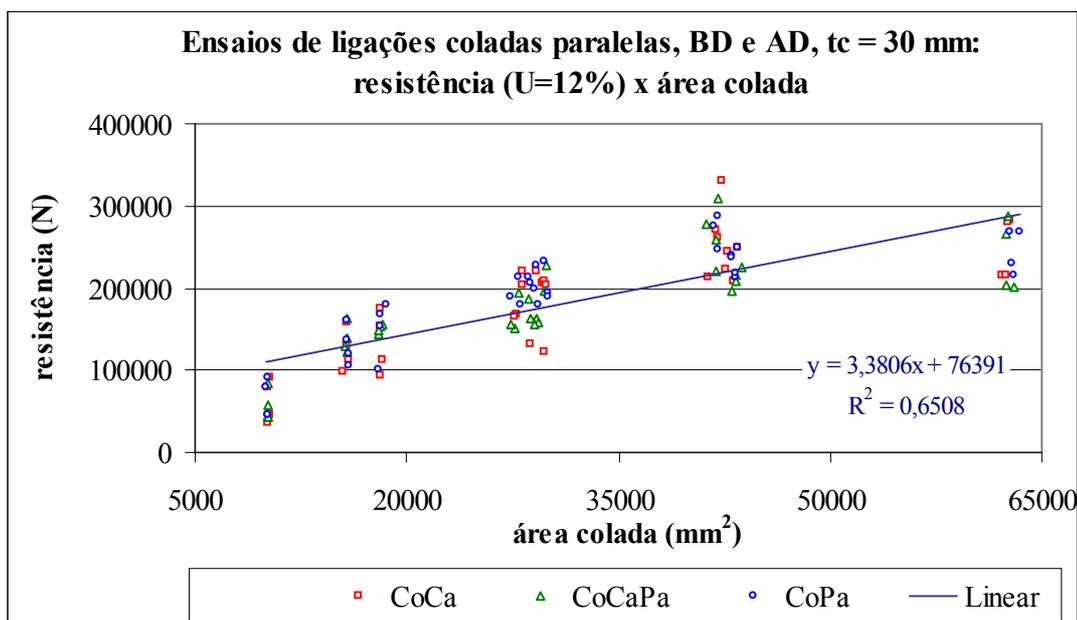


FIGURA 4.29 – Gráfico Resistência x Área Colada, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm

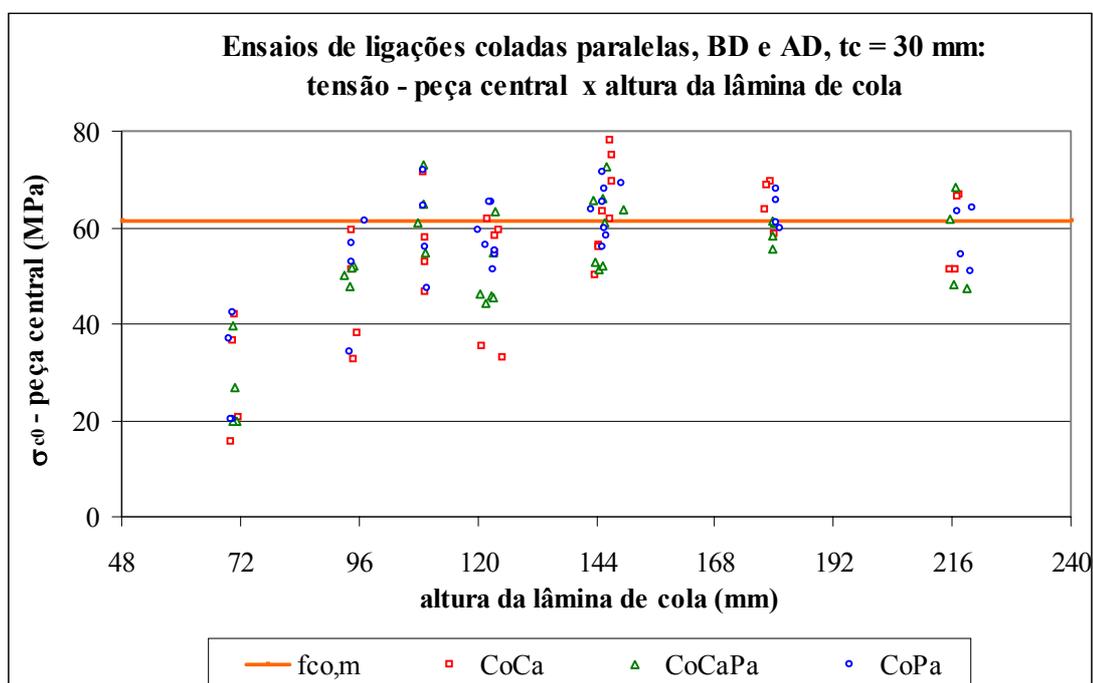


FIGURA 4.30 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm

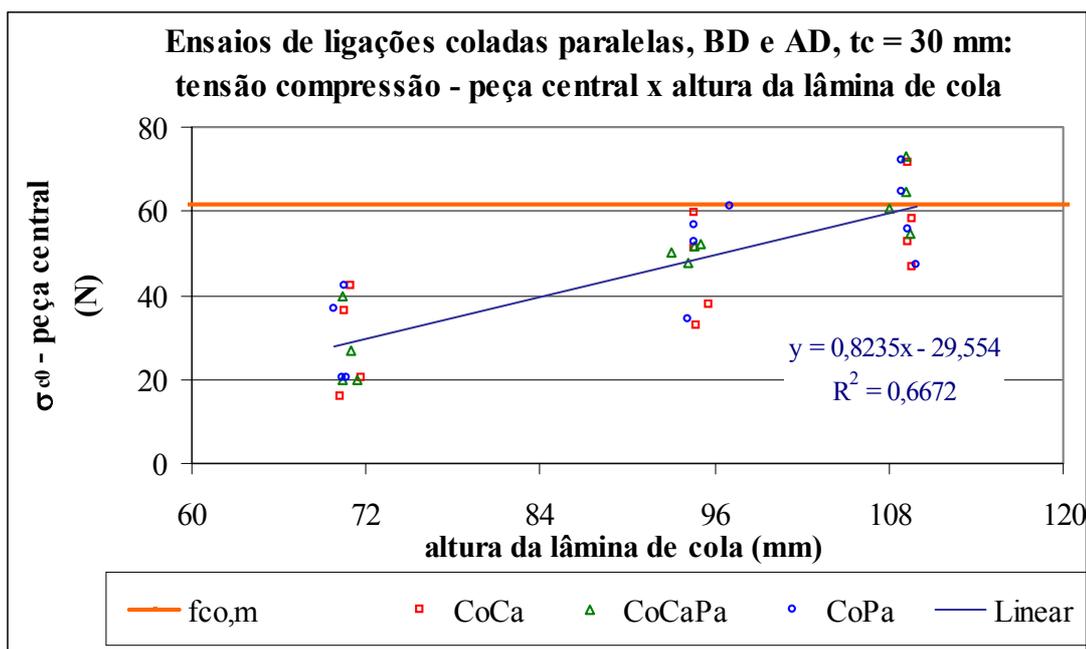


FIGURA 4.31 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva e Correspondente Reta de Correlação, para $h_c \leq 108$ mm, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 30$ mm

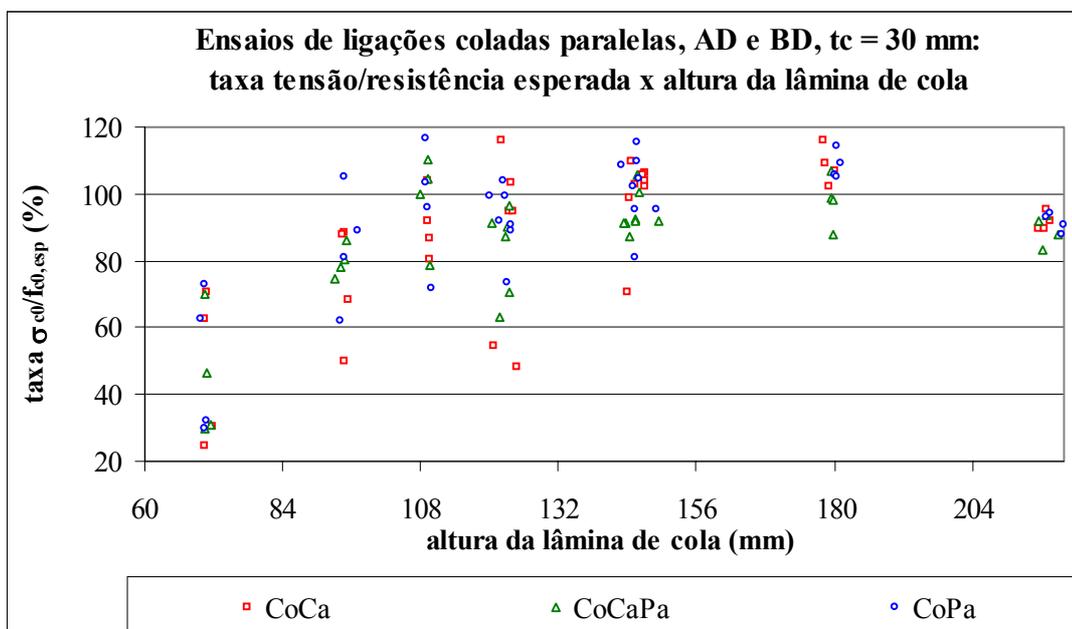


FIGURA 4.32 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão/ Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD e BD, $t_c = 30$ mm

4.3.5 Resistência de Ligações com Peça Central de 48 mm

a) Madeira BD

Na TAB. 4.23, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de menor densidade e $t_c = 48$ mm.

TABELA 4.23 - Resistência de LCP, Madeira BD, $t_c = 48$ mm

Dimensões		Tensões							
nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				(U=12%)	
bc / hc	n	$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{u,méd}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{gv0}^{(3)}$	$\sigma_{c0}^{(4)}$
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	6	12,98	679	96755	9,42	80043	91263	9,39	27,71
96 / 96	6	12,17	680	131001	25,50	73302	91701	7,11	28,78
72 / 108	6	12,92	674	119511	18,92	80455	90958	7,56	33,97
120 / 120	13	11,96	707	225621	17,92	157183	174250	7,73	40,49
96 / 144	6	12,44	727	194279	17,57	135320	155119	7,04	42,84
144 / 144	6	12,43	716	299425	4,16	247707	315281	7,12	45,51
120 / 180	6	11,89	697	276604	4,55	228828	273078	6,30	50,93
144 / 216	6	12,36	721	332906	10,03	275232	286367	5,28	51,30
Valor médio		12,34	701		13,51				

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0} = média \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{c0} = média \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Nas FIG. 4.33 a 4.36 apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência da ligação x área colada; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina de cola; taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina adesiva e da tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina de cola.

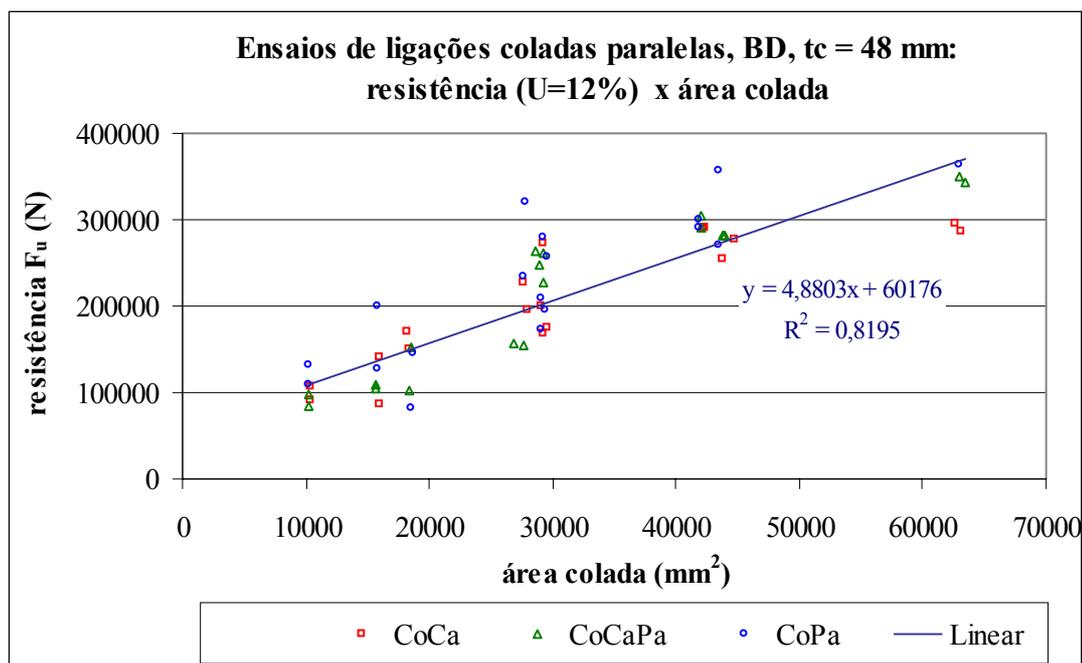


FIGURA 4.33 – Gráfico Resistência da Ligação x Área Colada, LCP, Madeira BD, $t_c = 48$ mm

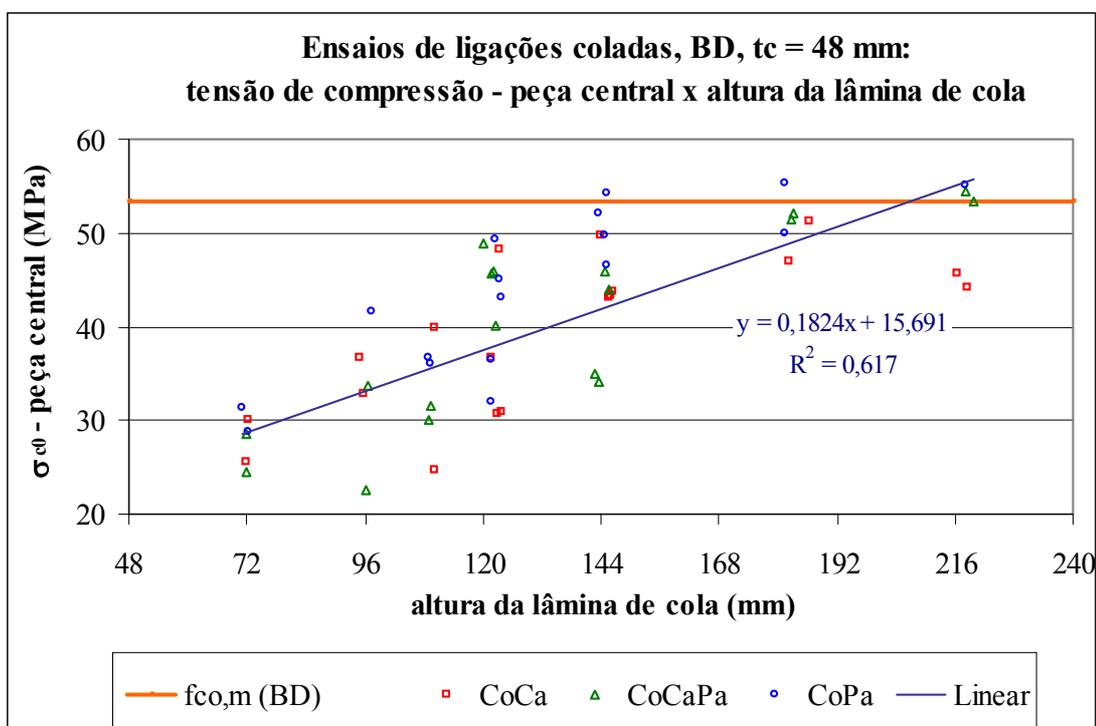


FIGURA 4.34 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 48$ mm

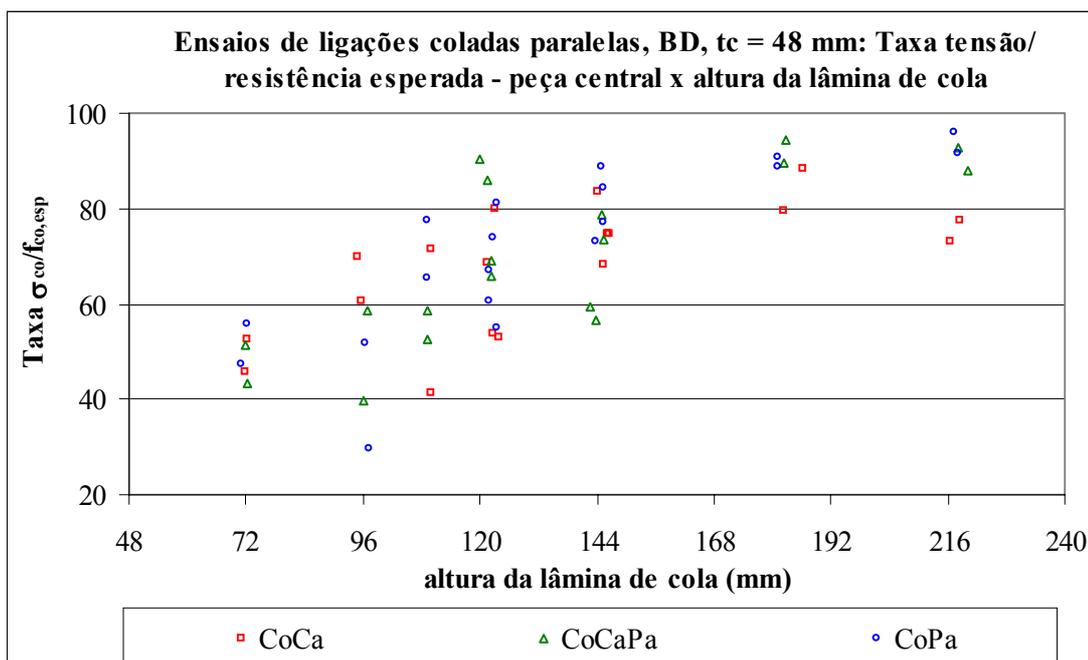


FIGURA 4.35 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão Média/ Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c=48$ mm

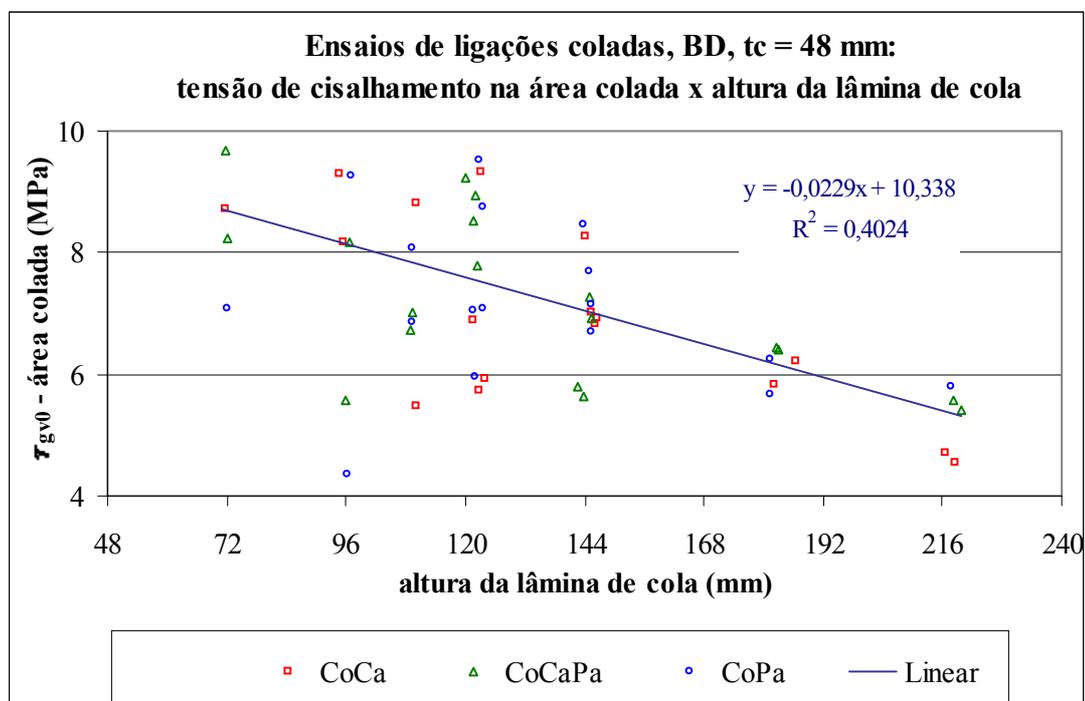


FIGURA 4.36 – Gráfico Tensão Média de Cisalhamento na Área Colada x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD, $t_c = 48$ mm

a) Madeira AD

Na TAB. 4.24, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de menor densidade e $t_c = 48$ mm.

TABELA 4.24 - Resistência de LCP, Madeira AD, $t_c = 48$ mm

Dimensões		Tensões							
nominiais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				(U=12%)	
bc / hc	n	$U_{\text{méd}}$	$d_{\text{cp,méd}}$	$F_{\text{u,méd}}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{\text{gv0}}^{(3)}$	$\sigma_{\text{c0}}^{(4)}$
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	6	13,48	807	66140	31,86	29743	46298	6,45	19,40
96 / 96	6	13,30	855	188539	15,34	138584	134406	10,22	41,56
72 / 108	6	13,47	842	168378	11,91	133740	134875	10,64	49,30
120 / 120	7	13,40	852	224127	27,49	117707	156889	7,73	40,91
96 / 144	6	13,29	870	250244	6,25	207021	257008	8,88	55,05
144 / 144	6	13,62	838	304665	19,70	200997	221986	7,38	48,07
120 / 180	6	13,61	865	329881	7,11	272902	318324	7,56	59,25
144 / 216	6	13,26	891	430679	9,42	356290	382658	6,86	65,44
Valor médio		13,43	853		16,14				

(1) $F_{k,\text{est}} = F_{\text{u,méd}} \cdot K_E = F_{\text{u,méd}} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,\text{esp}} \delta_{\text{am}})$, com $\delta_{\text{am,min}} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{\text{gv0}} = \text{média} \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{\text{c0}} = \text{média} \{F_{\text{u,méd}} / (bc \cdot t_c)\}$

Nas FIG. 4.37 a 4.40 apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência da ligação x área colada; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina de cola; taxa de resistência à compressão paralela (tensão média atuante / resistência estimada) da peça central x altura da lâmina adesiva e da tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina de cola.

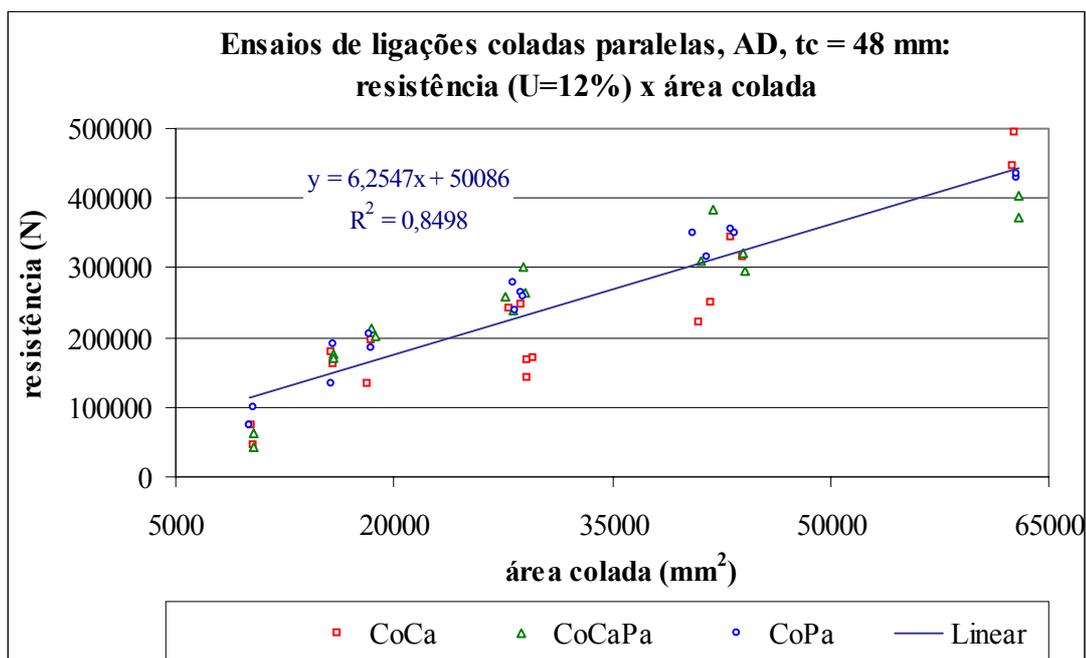


FIGURA 4.37 – Gráfico Resistência da Ligação x Área Colada, LCP, Madeira AD, $t_c = 48$ mm

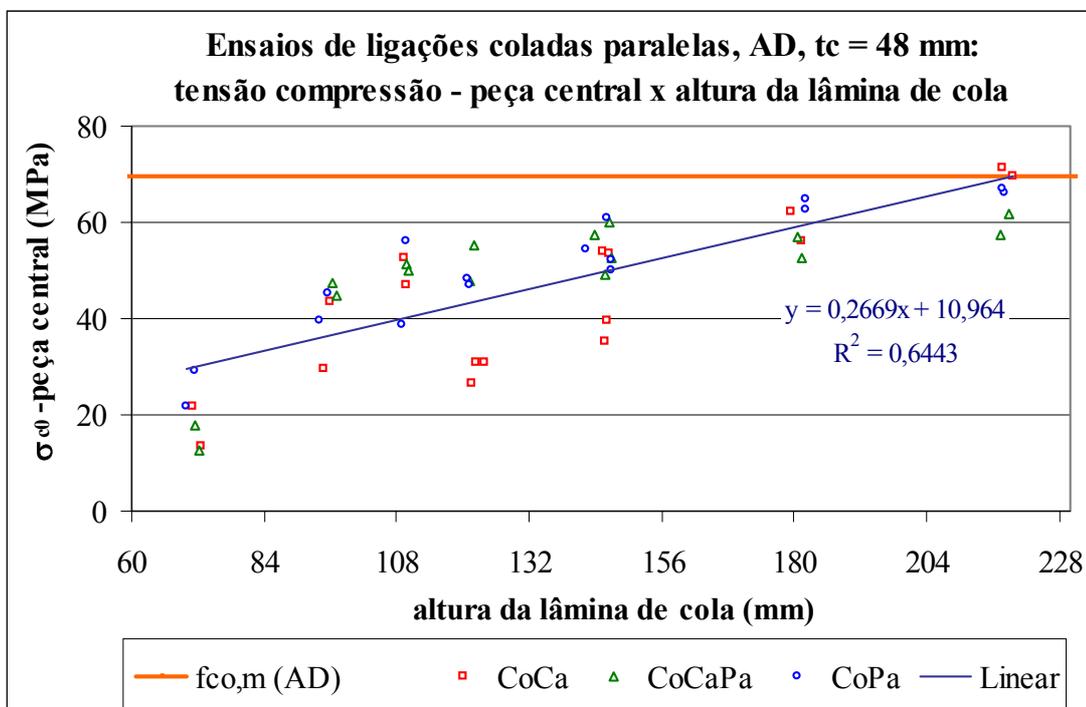


FIGURA 4.38 – Gráfico Tensão Média de Compressão na Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 48$ mm

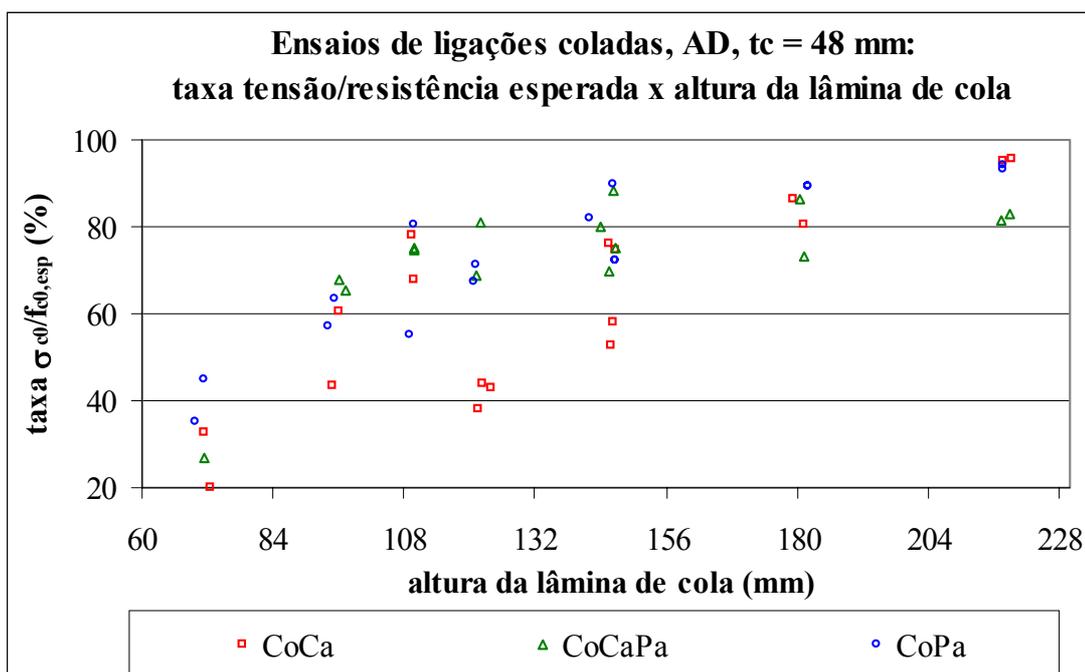


FIGURA 4.39 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 48$ mm

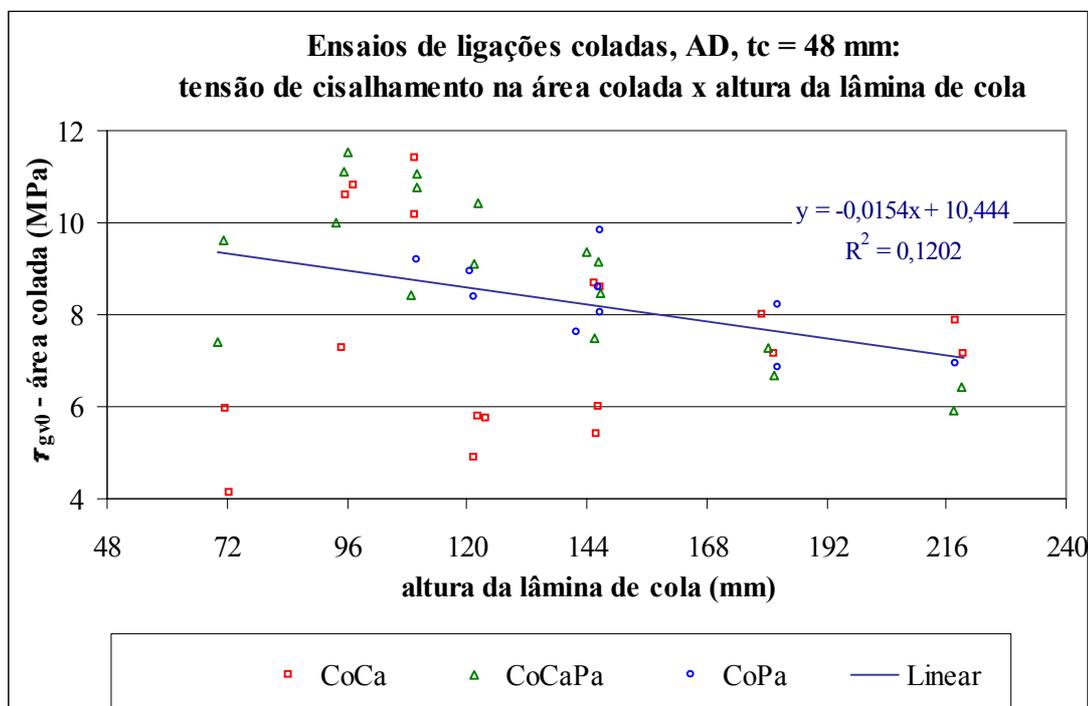


FIGURA 4.40 – Gráfico Tensão Média de Cisalhamento na Área Colada x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira AD, $t_c = 48$ mm

c) Madeira BD e AD

Na TAB. 4.25, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas paralelas, com madeira de menor e maior densidade e $t_c = 48$ mm.

TABELA 4.25 - Resistência de LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm

Dimensões		Tensões							
nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				(U=12%)	
bc / hc	n	$U_{\text{méd}}$	$d_{\text{cp,méd}}$	$F_{\text{u,méd}}$	δ_{am}	$F_k^{(1)}$	$F_k^{(2)}$	$\tau_{\text{gv0}}^{(3)}$	$\sigma_{\text{c0}}^{(4)}$
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
72 / 72	12	13,23	743	81448	27,32	43709	57013	7,92	23,55
96 / 96	12	12,73	767	159770	26,48	88017	111839	8,67	35,17
72 / 108	12	13,20	758	143945	22,69	88552	100761	9,10	41,64
120 / 120	20	12,46	758	225098	20,98	146014	157568	7,73	44,11
96 / 144	12	12,87	798	222261	17,40	156671	155583	7,96	48,95
144 / 144	12	13,03	777	302045	13,72	231762	261150	7,25	46,79
120 / 180	12	12,75	781	303243	10,92	247082	281541	6,93	55,09
144 / 216	12	12,81	806	381793	16,28	276377	317323	6,07	58,37
Valor médio		12,88	775		19,47				

(1) $F_{k,\text{est}} = F_{\text{u,méd}} \cdot K_E = F_{\text{u,méd}} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,\text{esp}} \delta_{\text{am}})$, com $\delta_{\text{am,min}} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{\text{gv0}} = \text{média} \{F_u / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

(4) Tensão normal média na peça central: $\sigma_{\text{c0}} = \text{média} \{F_u / (bc \cdot t_c)\}$

Nas FIG. 4.41 a 4.44 apresentam, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência da ligação x área colada; tensão média de compressão na peça central x altura da lâmina adesiva, para $hc \leq 108$ mm; taxa de resistência (tensão média / resistência esperada) da peça central x altura da lâmina adesiva e da tensão média de cisalhamento na área colada x altura da lâmina de cola.

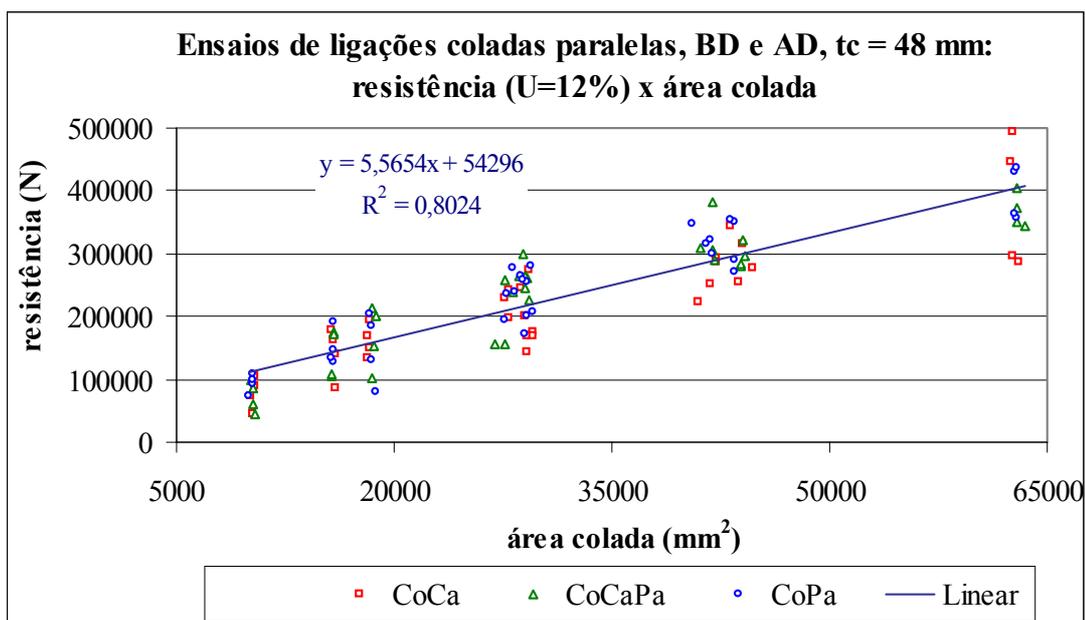


FIGURA 4.41 – Gráfico Resistência x Área Colada, LCP, Madeira BD e AD,
 $t_c = 48$ mm

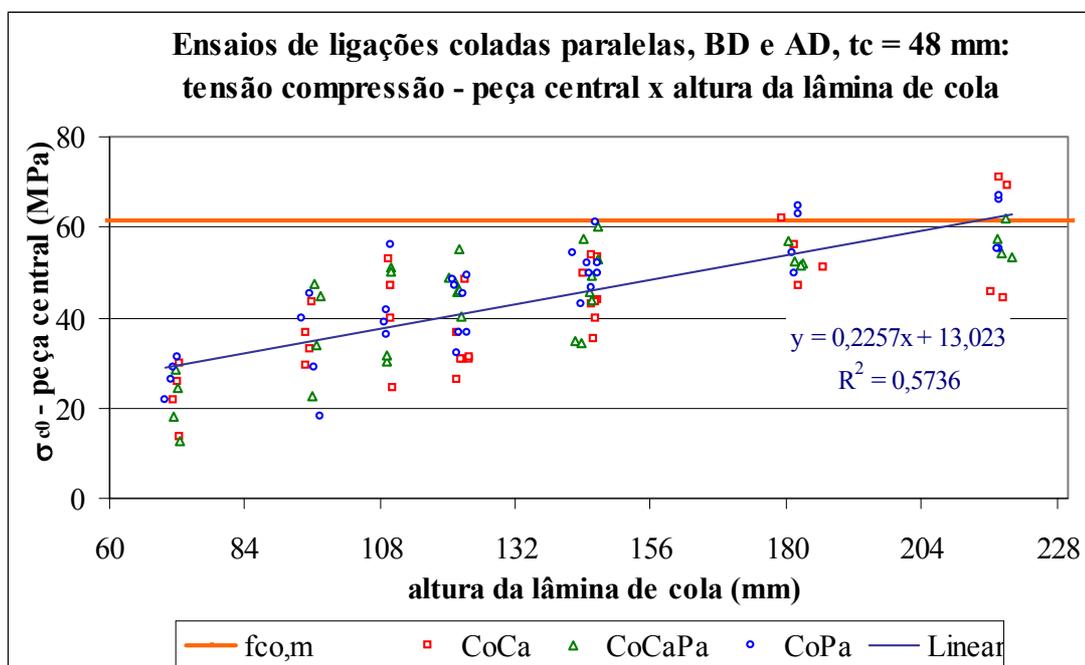


FIGURA 4.42 – Gráfico Tensão Média de Compressão da Peça Central x Altura da
Lâmina Adesiva e Correspondente Retas de Correlação, LCP, Madeira BD e AD,
 $t_c = 48$ mm

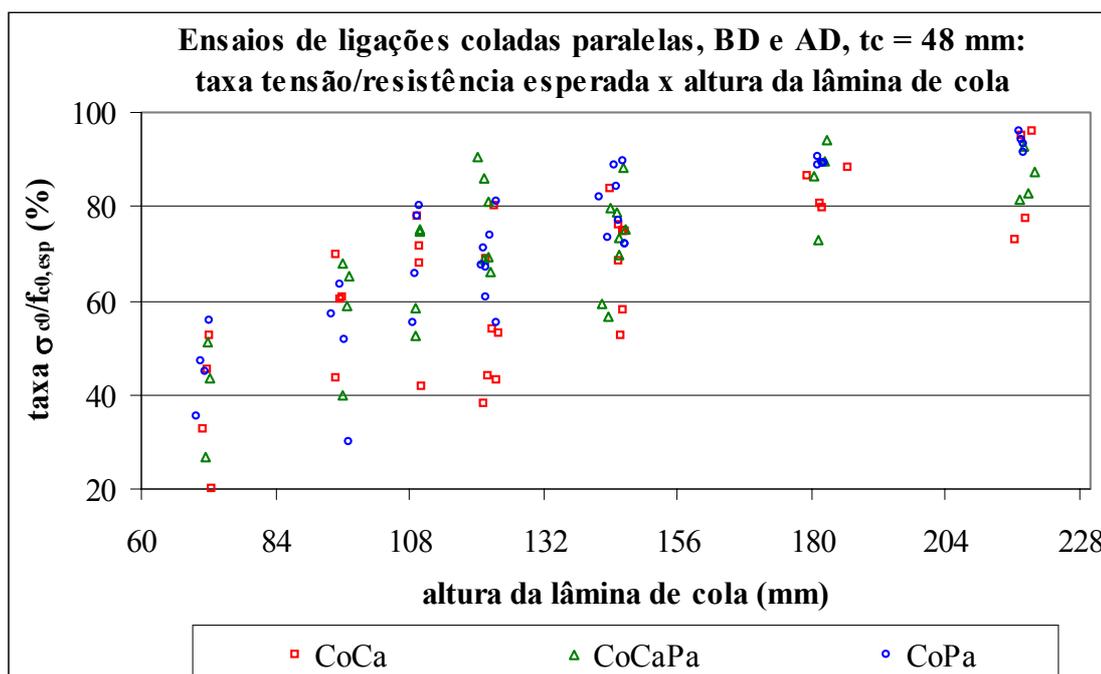


FIGURA 4.43 – Gráfico Taxa de Resistência (Tensão / Resistência Esperada) da Peça Central x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm

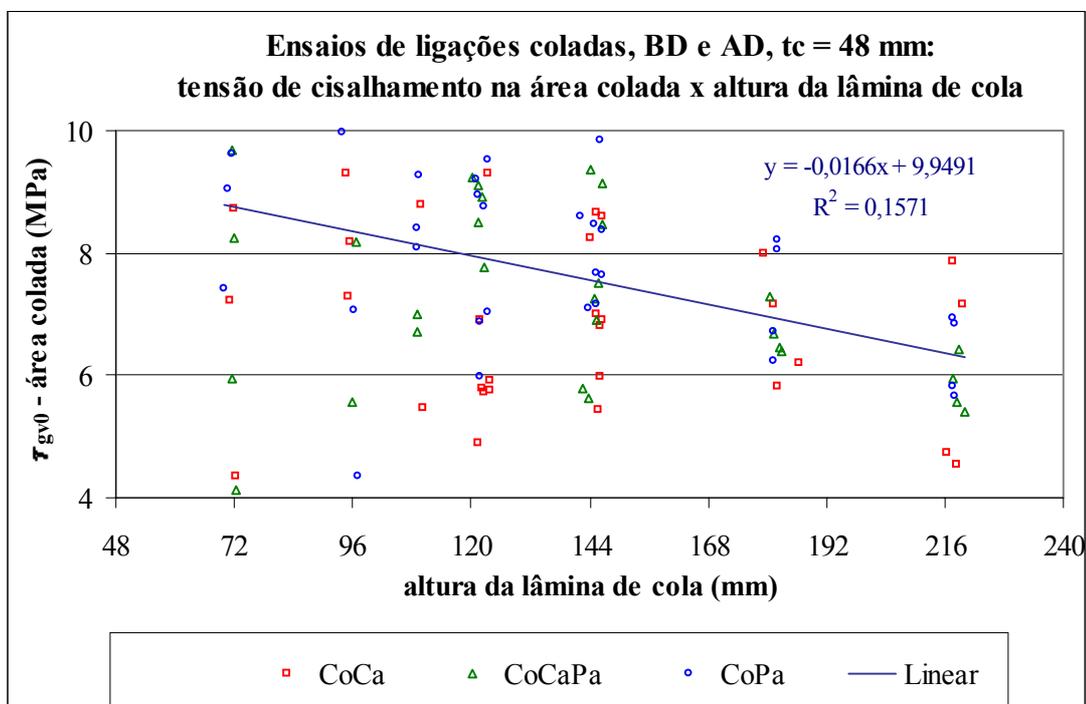


FIGURA 4.44 – Gráfico Tensão Média de Cisalhamento na Área Colada x Altura da Lâmina Adesiva, LCP, Madeira BD e AD, $t_c = 48$ mm

4.3.6 Rigidez de Ligações Coladas Paralelas

Os resultados da análise de variância para a rigidez indicaram, para um nível de significância de 5%, que não houve influência do tipo de ligação e que ocorreu influência da espessura da peça central na rigidez das ligações. No Anexo E apresentam-se os resultados das análises estatísticas efetuadas.

Apresentam-se a seguir as rigidezes médias de ligações coladas paralelas sob força centrada, obtidas por correlações dos trechos iniciais das correspondentes curvas força x deslocamento. Foram utilizados trechos de 10% a 50% e de 20% a 50% da resistência ou força aplicada. Na TAB. 4.26, apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para madeira BD e na FIG. 4.45, gráficos força x deslocamento e correspondentes retas de correlações. No Anexo B, apresentam-se os resultados individuais e séries de gráficos força x deslocamento.

TABELA 4.26 – Rigidez de Ligações Coladas Paralelas

tc / Parâmetro	Umid.	Dens.	Força	Rigidez - S_{lig}		Rigidez - S_{lig}	
			F_u	(TI,10%-50% $F_{máx}$)		(TI,20%-50% $F_{máx}$)	
	$U_{méd}$	$d_{méd}$	U=12%	U	U=12%	U	U=12%
	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm)
tc = 24 mm							
Média	11,53	663	179542	299756	296917	322904	319846
Desvio padrão	0,26	34,30	18745	19281	18510	19093	18232
Coef. de var. (%)	2,27	5,17	10,44	6,43	6,23	5,91	5,70
tc = 30 mm							
Média	11,97	766	206843	355770	355596	381560	381367
Desvio padrão	0,32	25,78	16733	20955	22085	21331	22484
Coef. de var. (%)	2,69	3,37	8,09	5,89	6,21	5,59	5,90
tc = 24 mm							
Média	11,80	754	240030	389435	387831	427853	426046
Desvio padrão	0,28	40,89	38332	27966	27711	24969	23813
Coef. de var. (%)	2,35	5,42	15,97	7,18	7,15	5,84	5,59

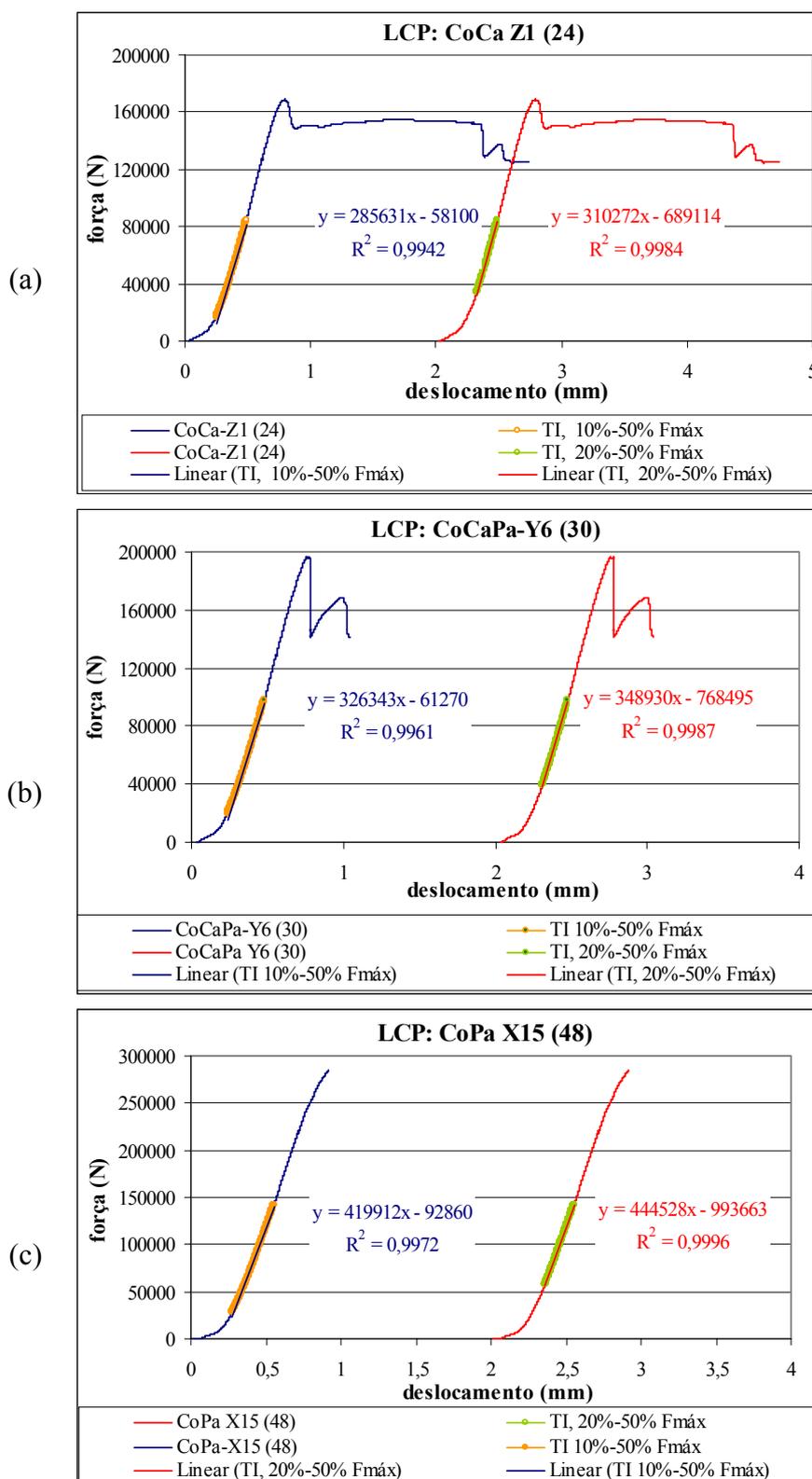


FIGURA 4.45 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP: a) CoCa, $t_c = 24$ mm;

b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm

4.4 Resistência e Rigidez de Ligações Coladas Paralelas sob Força Excêntrica

4.4.1 Introdução

Apresentam-se neste item os resultados de avaliações exploratórias das resistências e rigidezes das ligações coladas paralelas sob força excêntrica. Foram ensaiados corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm, sob força de compressão com excentricidade de 20 mm. Foram realizados 18 ensaios com duas repetições para cada tipo de ligação e para cada espessura de peça central t_c .

Em nenhum dos ensaios se conseguiu atingir o esgotamento da resistência da peça central. A resistência convencional ($F_{0,2\%}$) de cada ligação foi definida pelo valor da maior força resistida até o valor da força correspondente à deformação residual de 0,2%, obtido pelo cruzamento da reta paralela à reta de correlação do trecho inicial da curva de carregamento, compreendida entre 10% e 50% da força máxima, deslocada de 0,2% e a própria curva de carregamento. Nas ligações com espessura de peça central de 48 mm, a resistência convencional correspondeu ao valor da força máxima resistida ($F_{máx}$).

Apresentam-se, na FIG. 4.46 e na FIG 4.47, a título de exemplos, respectivamente, gráficos força x deformação utilizados na determinação da resistência convencional e gráficos força x deslocamentos originais obtidos em ensaios e utilizados para determinação da rigidez das ligações.

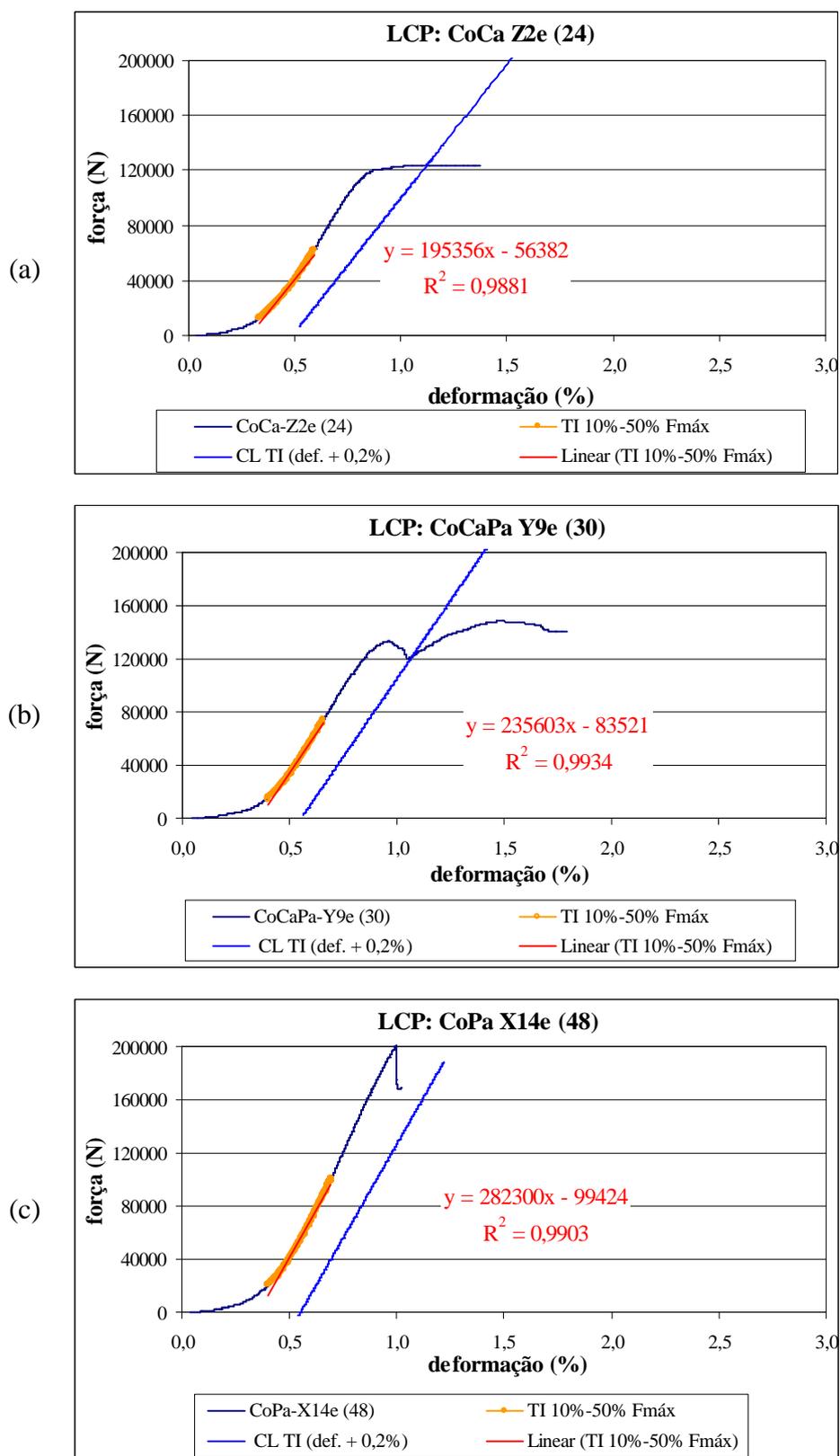


FIGURA 4.46 – Gráficos Força x Deformação de LCP Sob Força Excêntrica:
a) CoCa, $t_c = 24\text{mm}$; b) CoCaPa, $t_c = 30\text{ mm}$; c) CoPa, $t_c = 48\text{ mm}$

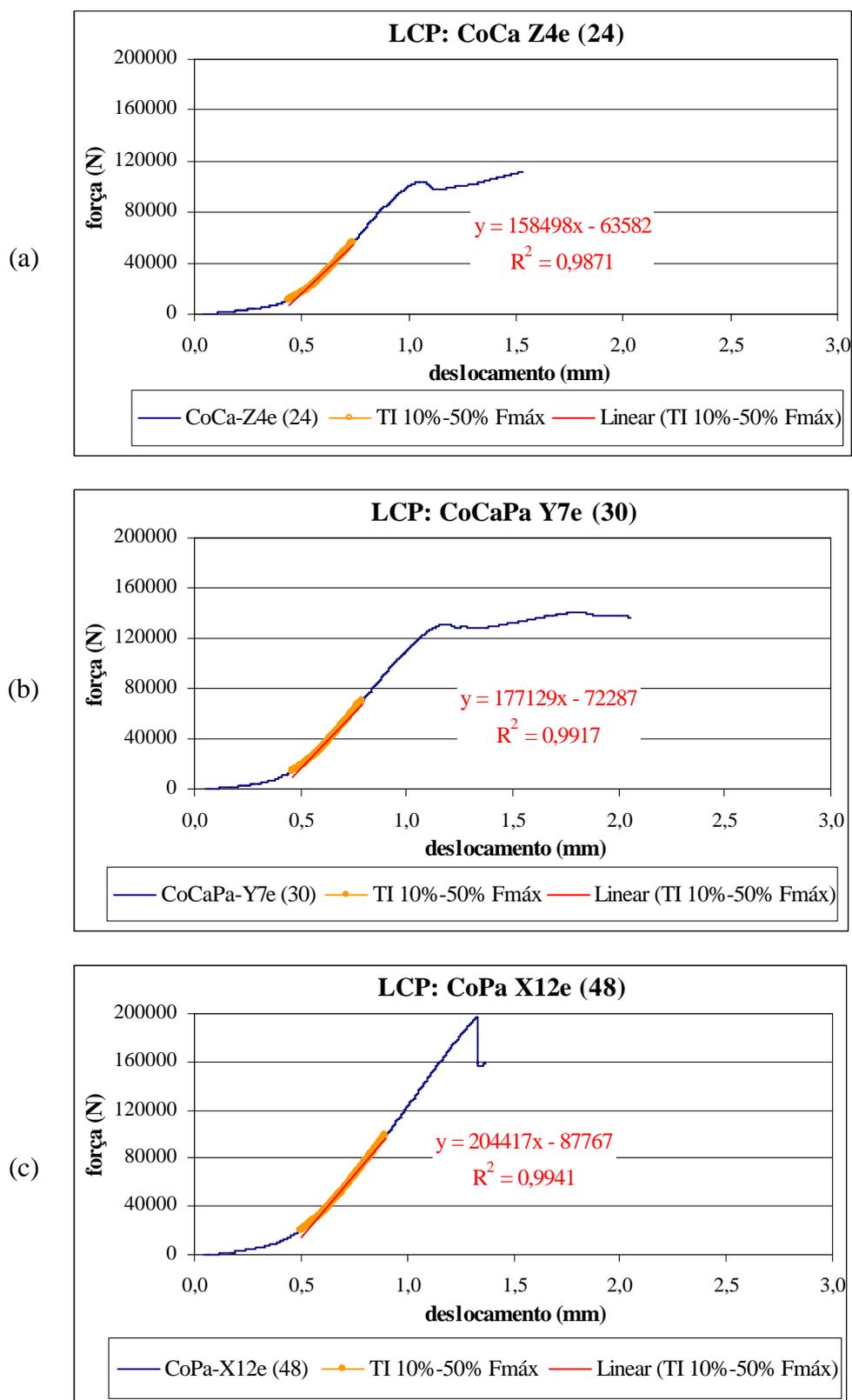


FIGURA 4.47 – Gráficos Força x Deslocamento de LCP Sob Força Excêntrica:

a) CoCa, $t_c = 24\text{mm}$; b) CoCaPa, $t_c = 30\text{ mm}$; c) CoPa, $t_c = 48\text{ mm}$

4.4.2 Análise Estatística dos Resultados

Os resultados das análises de variância para a resistência convencional e para a rigidez, em função do tipo de ligação e da espessura da peça central, são apresentados no Anexo E. As análises indicaram, com risco de 5%, que não houve influência devido à interação entre a espessura da peça central e tipo de ligação, que não houve influência do tipo de ligação e que ocorreu influência da espessura da peça central.

4.4.3 Resultados de Resistência e Rigidez

Na TAB. 4.27, apresentam-se os resultados médios de avaliação da resistência e rigidez de ligações coladas paralelas sob força excêntrica. Os resultados individuais dos ensaios são apresentados no Anexo B.

TABELA 4.27 – Resistência e Rigidez de LCP Sob Força Excêntrica

Resistência - $F_{0,2\%}$ (N), U=12%			
Tipo de ligação	Média	Espessura t_c (mm)	Média
CoCa	151782	24	115488
CoCaPa	147632	30	145142
CoPa	156915	48	195699
Todos	152110	Todos	152110
Força máxima - $F_{máx}$ (N), U			
CoCa	154892	24	123947
CoCaPa	157147	30	151832
CoPa	161410	48	197670
Todos	157816	Todos	157816
Rigidez - S_{lig} (N/mm), U=12%			
CoCa	179290	24	157910
CoCaPa	189964	30	180584
CoPa	181800	48	212559
Todos	183684	Todos	183684

Na TAB. 4.28, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência e rigidez das ligações coladas paralelas sob força excêntrica, agrupados por espessura da peça central.

TABELA 4.28 – Resistência e Rigidez de LCP Sob Força Excêntrica por Espessura da Peça Central

tc (mm) / Propriedade	Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
	$U_{méd}$	$d_{méd}$	$F_{0,2\%}$	$F_{0,2\%}$	$F_{máx}$	S_{lig}	S_{lig}
	(%)	(kg/m ³)	U	(U=12%)	U	U	(U=12%)
			(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
tc = 24 mm							
Média	11,47	651	117378	115488	123947	159604	157910
Desvio padrão	0,11	25,9	12781	12379	9673	12164	12100
Coef. de var. (%)	0,99	3,98	117378	10,72	7,80	7,62	7,66
$F_k^{(1)}$				94104			
$F_k^{(2)}$				95464			
tc = 30 mm							
Média	11,94	765	145415	145142	151832	180825	180584
Desvio padrão	0,30	24,61	11981	11532	6621	19035	18558
Coef. de var. (%)	2,53	3,22	8,24	7,95	4,36	10,53	10,28
$F_k^{(1)}$				120072			
$F_k^{(2)}$				127663			
tc = 48 mm							
Média	11,68	738	197670	195699	197670	214023	212559
Desvio padrão	0,22	37,98	19379	18294	19379	30078	29099
Coef. de var. (%)	1,92	5,14	9,80	9,35	9,80	14,05	13,69
$F_k^{(1)}$				161897			
$F_k^{(2)}$				160035			

(1) $F_{k,est} = F_{0,2\%, méd} \cdot K_E = F_{0,2\%, méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

4.4.4 Discussão dos Resultados

Os resultados experimentais obtidos comprovaram perda de resistência e rigidez das ligações sob força excêntrica, em comparação aos resultados obtidos para ligações sob força centrada. Este fato era esperado, devido às tensões cisalhantes adicionais produzidas pelo momento resultante da excentricidade da força aplicada.

A formulação de um modelo analítico mais elaborado, para avaliação do efeito da excentricidade no comportamento das ligações coladas, apresenta grande dificuldade, principalmente para a consideração dos elementos mecânicos, da espessura da peça central e da complexa distribuição das tensões cisalhantes na lâmina de adesivo. Um critério aproximado de avaliação da perda de resistência de ligações coladas, em função da excentricidade da força aplicada, pode ser estabelecido a partir das relações entre a tensão de cisalhamento atuante e a correspondente tensão resistente. Uma alternativa interessante para estimativa destas relações, mais fácil de ser obtida e menos conservadora, consiste em utilizar a tensão atuante média ao invés da tensão atuante máxima, considerando-se apenas as áreas onde as tensões se somam desfavoravelmente.

Uma avaliação aproximada da tensão média de cisalhamento pode ser estabelecida com base nas hipóteses simplificadas da Resistência dos Materiais, para sólidos isotrópicos de comportamento elástico linear submetido à torção, ver TIMOSHENKO e GERE (1972). Na FIG. 4.48, são representadas: a geometria do corpo-de-prova, às ações atuantes e as distribuições das tensões cisalhantes devidas à força F_y e do momento resultante M .

A distribuição das tensões cisalhantes devido à força centrada F_y apresenta uma forma complexa, com concentração de tensões no início e fim da lâmina adesiva. No entanto, para valores não elevados de h , a consideração aproximada de distribuição uniforme de tensões cisalhantes é razoável, como representado na FIG. 4.48 b, resultando:

$$\tau_{y,méd}(F_y) = F_y / 2.b.h \quad (4.01)$$

Onde b , h são as dimensões da área colada, representada na FIG. 4.44a.

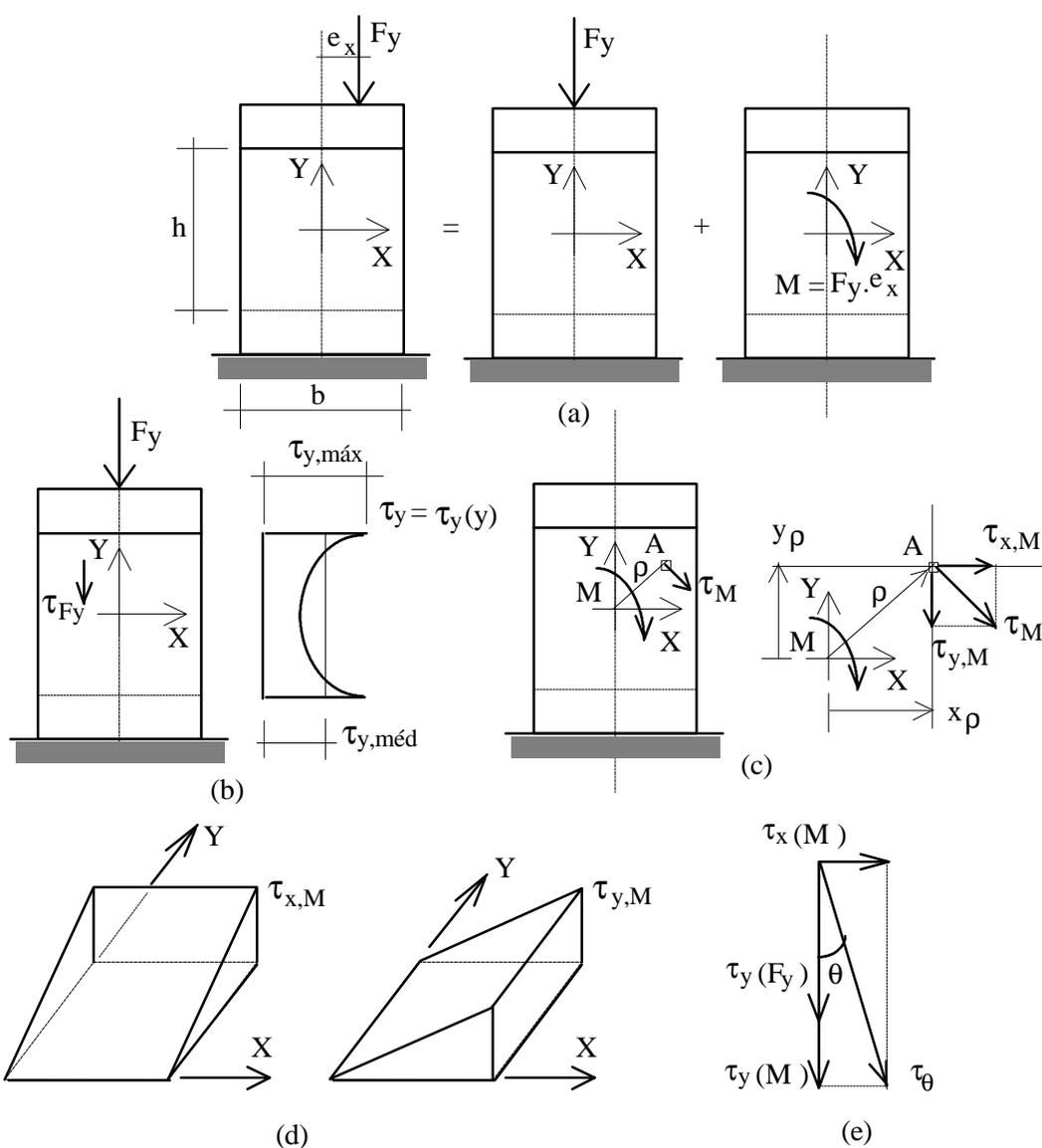


FIGURA 4.48 – Ligação Submetida   Força Exc entrica: a) A o es Atuantes; b) Tensões Cisalhantes, F_y ; c) Tensões Cisalhantes, $M = F_y \cdot e_x$; d) Tensões Cisalhantes no Primeiro Quadrante; e) Tensão Cisalhante Resultante em um Ponto

O coeficiente α deve ser entendido como uma taxa de resistência, sendo definido pela relação entre a tensão média atuante devido à força F_y e a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras $f_{gv0} = 9,4 \text{ MPa}$, resultando para $b = h$.

$$\alpha = \frac{\tau_{y,méd}(F_y)}{f_{gv0}} = \frac{F_y}{18,8 \cdot h^2} \quad (4.02)$$

Com a hipótese de giro de torção constante na lâmina adesiva, em torno do centro geométrico da área colada, e da existência de relações lineares entre os deslocamentos decorrentes deste giro e as correspondentes tensões cisalhantes, resulta:

$$\tau(M) = \frac{M}{n.J} \rho; \tau_x(M) = \frac{M}{n.J} y_\rho \text{ e } \tau_y(M) = \frac{M}{n.J} x_\rho \quad (4.03)$$

A direção da tensão cisalhante é normal à reta que une o ponto em consideração ao centro geométrico da ligação, como representado na FIG.4.44c, J é o momento de inércia polar centroidal de uma retangular b x h e n o número de superfícies coladas resistentes. Com n = 2, b = h e e = h/6, obtém-se $J = b.h.(h^2 + b^2)/12 = h^4/6$ e $M = F_y.h/6$. As componentes máximas de tensões cisalhantes, representadas na FIG. 4.48d, valem:

$$\tau_{y,máx}(M) = \tau_{x,máx}(M) = \frac{F_y \cdot \frac{h}{6} \cdot \frac{h}{2}}{2 \frac{h^4}{6}} = \frac{F_y}{4.h^2} \quad (4.04)$$

No primeiro e quarto quadrante, as componentes das tensões cisalhantes na direção Y, $\tau_y(F_y)$ e $\tau_y(M)$, têm o mesmo sentido e portanto se somam algebricamente. No segundo e terceiro quadrante, estas componentes têm sentidos opostos. Em cada quadrante, o valor médio das componentes de tensões cisalhante devidas ao momento M, valem:

$$\tau_{y,méd}(M) = \tau_{x,méd}(M) = \frac{\tau_{x,máx}(M)}{2} = \frac{\tau_{y,máx}(M)}{2} = \frac{F_y}{8.h^2} \quad (4.05)$$

A tensão cisalhante média resultante e o correspondente ângulo em relação às fibras, nos quadrantes mais desfavoráveis, são representados na FIG. 4.48e e valem:

$$\tau_{méd} = \frac{F_y}{1,57.h^2} \quad (4.06)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\tau_{x,méd}}{\tau_{y,méd}}\right) = \arctan\left(\frac{0,125}{0,625}\right) = 11,31^{\circ} \quad (4.07)$$

Para a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola normal às fibras, igual a $f_{gv,90} = 3,9$ MPa, obtém-se com o uso da fórmula de Hankinson para $\theta = 11,31^{\circ}$, $f_{gv\theta} = 8,9$ MPa. Designando de F_y^e força excêntrica atuante, a taxa de resistência α_e fica definida como:

$$\alpha_e = \frac{F_y^e / (1,57 \cdot h^2)}{f_{gv,\alpha}} = \frac{F_y^e}{13,97 \cdot h^2} \quad (4.08)$$

Considerando-se a igualdade das taxas $\alpha = \alpha_e$, resulta:

$$F_y^e = 0,75 \cdot F_y \quad (4.09)$$

Na TAB. 4.29, apresentam-se os resultados obtidos com a Eq. (4.09), aplicada aos resultados dos ensaios das ligações coladas paralelas com madeira de menor densidade.

TABELA 4.29 – Resistência Experimental e Estimada de Ligações Coladas Paralelas Com e Sem Excentricidade da Força Aplicada

Espessura tc (mm)	Resultados Experimentais			Resistência Estimada $F_{y,u}^{est}$ (N)
	Centrada F_u (N)	Com excentricidade F_u^e (N)	Taxa F_u^e / F_u	
24	171247	115488	0,67	128435
30	200999	145142	0,72	150749
48	225621	195699	0,87	169216
Média	199289	152110	0,75	149467

Embora a taxa F_u^e / F_u estimada pela Eq. (4.09), seja próxima ao valor médio correspondente obtido experimentalmente, as diferenças entre as taxas obtidas para as diferentes espessuras da peça central indicam que este parâmetro tem uma importância decisiva no valor das tensões cisalhantes atuantes nas regiões críticas e, conseqüentemente, na resistência das ligações.

4.5 Resistência e Rigidez de Ligações Mecânicas Paralelas

Apresentam-se neste item os resultados das avaliações experimentais das resistências e rigidezes das ligações paralelas com emprego unicamente de elementos mecânicos, em corpos-de-prova com $b_c = h_c = 120$ mm, efetuadas com o objetivo de uma comparação com as correspondentes ligações coladas.

Nas TAB. 4.30, apresentam-se os resultados médios de resistência e rigidez das ligações com: cavilha central (Ca), cavilha e parafusos (CaPa) e parafuso central (Pa). Nas FIG. 4.49 e 4.50, apresentam-se gráficos força x deformação e força x deslocamento obtidos nos ensaios. No Anexo D, apresentam-se os resultados individuais e gráficos força x deslocamento obtidos nos ensaios.

TABELA 4.30 – Resistência e Rigidez de Ligações Mecânicas Paralelas

Tipo de ligação / tc (mm)	Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
	U (%)	d (kg/m ³)	F _{0,2%} -U (N)	F _{máx} - U (N)	F _{0,2%} - (U=12%) (N)	S _{lig} - U (N/mm)	S _{lig} - (U=12%) (N/mm)
Cavilhadas							
24	12,40	711	21125	24701	21375	18291	18435
30	12,31	717	22500	26923	22700	20188	20300
48	12,13	730	23750	30954	23843	23262	23320
Cavilhadas e Parafusadas							
24	11,89	706	56375	84056	56213	21860	21804
30	11,85	754	59750	88403	59485	22838	22768
48	12,04	708	61750	90949	61816	25390	25412
Parafusadas							
24	11,70	691	21500	35856	21307	23780	23674
30	11,16	667	21500	38251	20951	26134	25681
48	11,43	750	35250	64279	29615	18156	17952

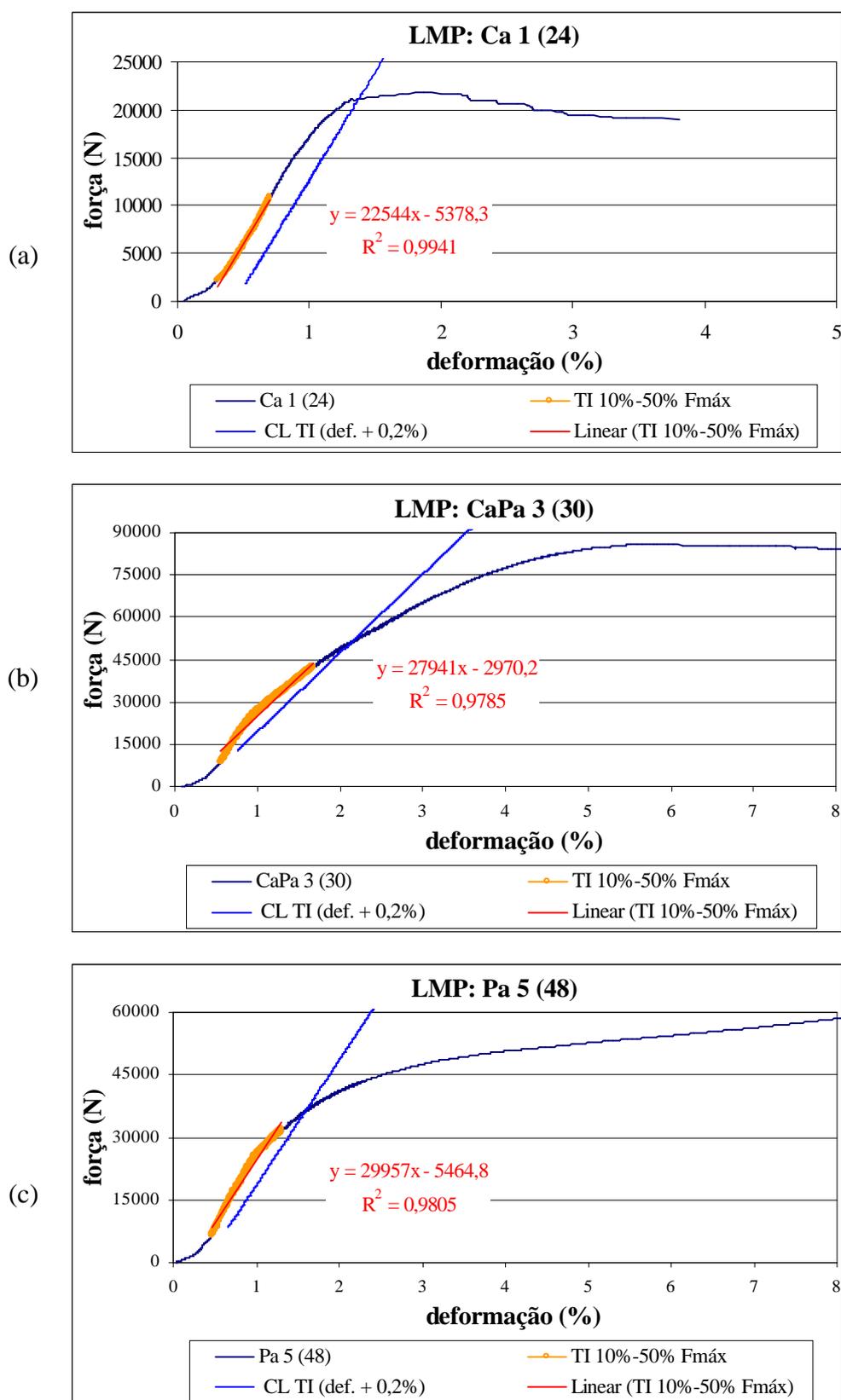


FIGURA 4.49 – Gráficos Força x Deformação de Ligações Mecânicas Paralelas:

a) Ca, $t_c = 24$ mm; b) CaPa, $t_c = 30$ mm; c) Pa, $t_c = 48$ mm

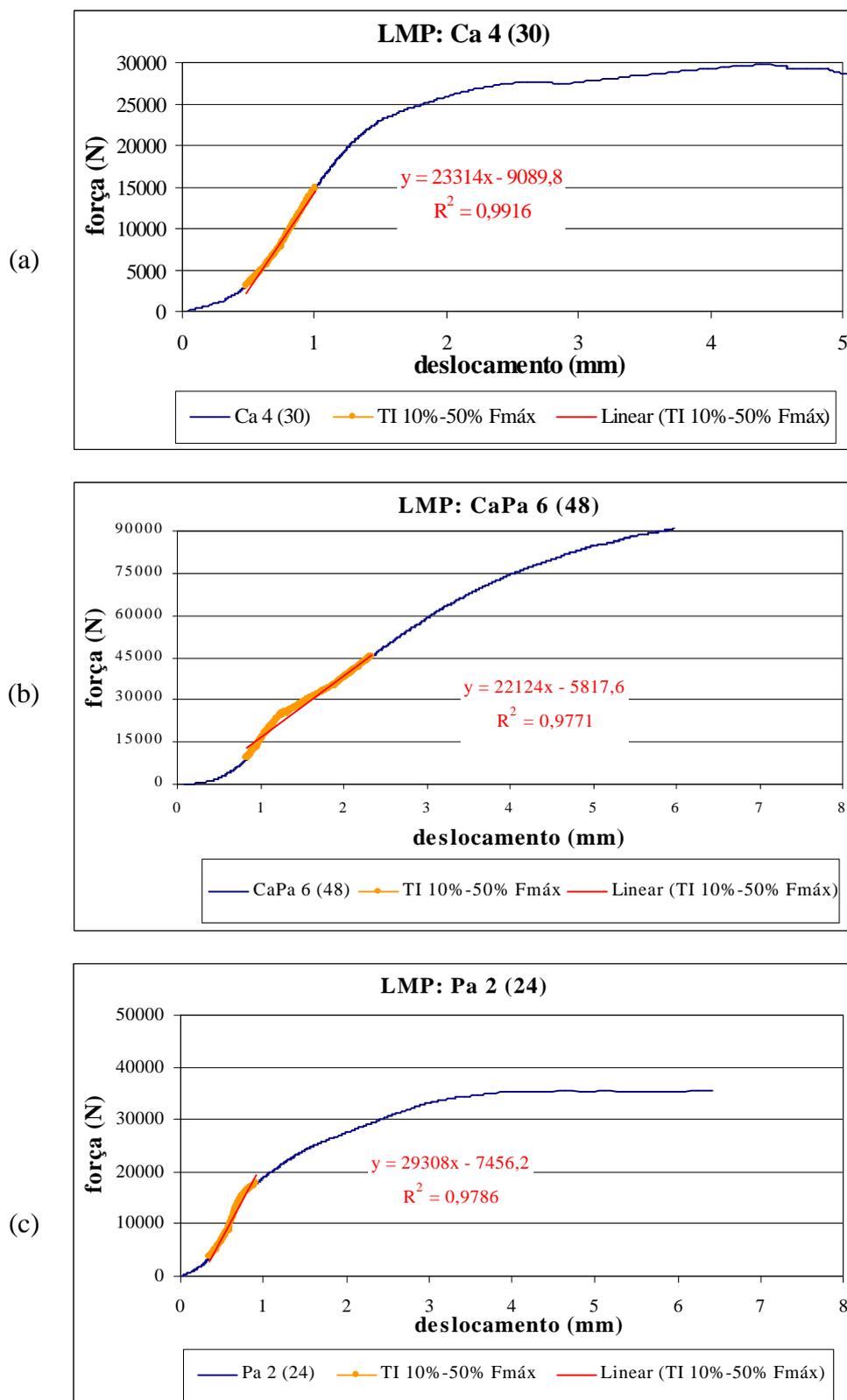


FIGURA 4.50 – Gráficos Força x Deslocamento de Ligações Mecânicas Paralelas:

a) Ca, $t_c = 30$ mm; b) CaPa, $t_c = 48$ mm; c) Pa, $t_c = 24$ mm

Para fins de comparação simplificada, apresentam-se na TAB. 4.31 os resultados médios e relações de resistência e rigidez das ligações paralelas mecânicas e coladas, para os corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm, madeira BD.

TABELA 4.31 – Valores Médios e Relações de Resistência e Rigidez de Ligações Paralelas

Valores Médios de Resistência e Rigidez de Ligações Mecânicas				
Tipo de Ligação	Espessura t_c (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (U) (N)	$F_{0,2\%}$ (U=12%) (N)	S_{lig} (U=12%) (N/mm)
Cavilhadas	24	24701	21375	18435
	30	26923	22700	20300
	48	30954	23843	23320
Cavilhadas e Parafusadas	24	84056	56213	21804
	30	88403	59485	22768
	48	90949	61816	25412
Parafusadas	24	35856	21307	23674
	30	38251	20951	25681
	48	64279	29615	17952
Ligações Coladas	24	179542	179542	296917
	30	206843	206843	355596
	48	240030	240030	387831
Valores Relativos Ligações Mecânicas / Ligações Coladas				
Tipo de Ligação	t_c (mm)	$F_{m\acute{a}x} / F_{0,2\%}$	$F_{0,2\%} / F_{0,2\%}$	S_{lig} / S_{lig}
Cavilhadas	24	0,14	0,12	0,06
	30	0,13	0,11	0,06
	48	0,13	0,10	0,06
Cavilhadas e Parafusadas	24	0,47	0,31	0,07
	30	0,43	0,29	0,06
	48	0,38	0,26	0,07
Parafusadas	24	0,20	0,12	0,08
	30	0,18	0,10	0,07
	48	0,27	0,12	0,05

4.6 Resistência e Rigidez de Ligações Coladas Normais

4.6.1 Introdução

Neste item apresenta-se uma avaliação das resistências e rigidezes de ligações coladas normais, para agrupamentos estatisticamente adequados dos resultados e um estudo das variações das resistências em função de alguns parâmetros relevantes. A avaliação das resistências das ligações solicitadas por força de compressão centrada foi efetuada com base no resultado de 169 ensaios. A avaliação da rigidez das ligações coladas normais foi efetuada a partir dos resultados de 55 corpos-de-prova de madeira de menor e maior densidade, com $b_c = h_c = 120$ mm. Os valores das resistências e rigidezes obtidos nos ensaios foram corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Em parte dos ensaios de resistência, a capacidade resistente foi definida pela nítida ocorrência de cisalhamento na superfície colada. Na outra parte dos ensaios o limite resistente foi influenciado pelo escoamento das peças laterais por compressão normal, com as ligações mantendo-se aparentemente íntegras. Nos ensaios foram determinadas a resistência convencional ($F_{0,2\%}$) e a força máxima resistida ou aplicada ($F_{m\acute{a}x}$).

Na análise dos resultados dos ensaios no seu conjunto e na avaliação da eficiência das ligações, são empregados gráficos que permitem a comparação das resistências obtidas nos ensaios, em termos de tensão de compressão normal média atuante nas peças laterais, com o valor da resistência média correspondente da madeira. São utilizados também gráficos que permitem uma avaliação da relação entre a tensão de compressão normal média atuante e o valor estimado da resistência das peças laterais, obtido com emprego da correlação linear com a densidade nos ensaios de caracterização das propriedades da madeira.

Na FIG. 4.51 são apresentados, a título de exemplo, gráficos força x deformação de ligações coladas normais com $b_c = h_c = 120$ mm. No Anexo C, são listados os resultados individuais dos ensaios e os gráficos força x deslocamento dos ensaios realizados para determinação das rigidezes.

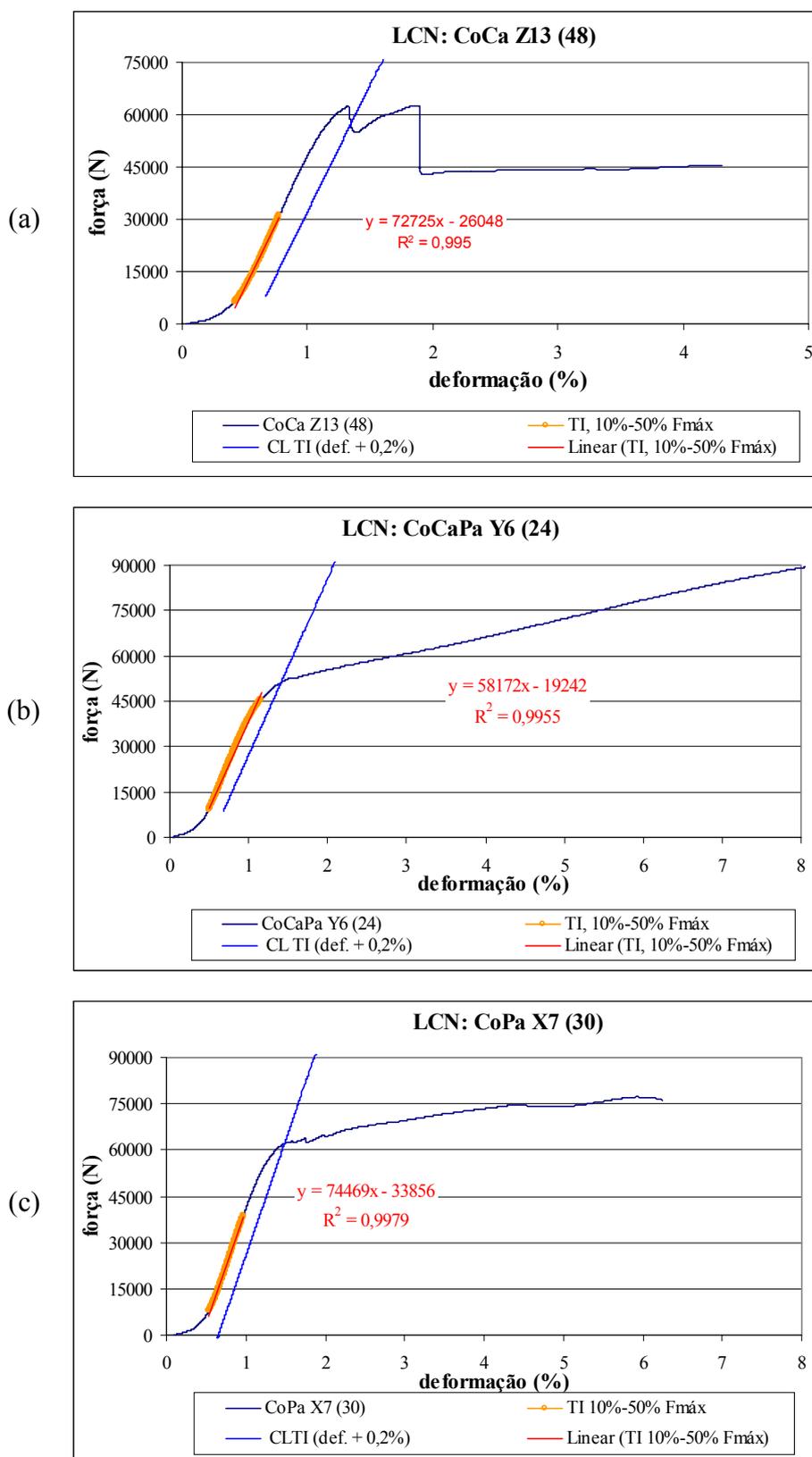


FIGURA 4.51 - Gráficos Força x Deformação, LCN, $b_c = h_c = 120$ mm:

a) CoCa, $t_c = 48$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 24$ mm; c) CoPa, $t_c = 30$ mm

4.6.2 Análise Estatística dos Resultados de Resistência

Os corpos-de-prova ensaiados apresentavam as seguintes diferenças fundamentais: três tipos de ligação, três diferentes espessuras das peças centrais, duas faixas de densidade da madeira e quatro dimensões para a largura (bc) e altura da lâmina adesiva (hc), com $bc = hc$. Com o objetivo de avaliar a influência destes parâmetros nas resistências obtidas nos ensaios, efetuaram-se comparações das médias por meio de análises de variância, apresentadas no Anexo E.

a) Resistência convencional da ligação ($F_{0,2\%}$)

Os resultados das análises de variância para a resistência convencional da ligação ($F_{0,2\%}$) indicaram, com nível de significância de 5%, que não se pode rejeitar a hipótese nula para os fatores definidos pelo tipo de ligação e pela espessura da peça central, com exceção das ligações unicamente coladas com $bc = hc = 72$ mm. Conseqüentemente, pode-se concluir, com risco inferior a 5%, que não houve diferença na resistência das ligações em função do tipo de elemento mecânico utilizado ou da espessura da peça central. Para a faixa de densidade, a hipótese nula deve ser rejeitada, concluindo-se, com risco inferior a 5%, que a resistência foi influenciada por esta variável.

Em função dos resultados das análises de variâncias, as resistências convencionais ($F_{0,2\%}$) foram caracterizadas para as quatro diferentes dimensões das áreas coladas, independentemente das espessuras das peças centrais, para a madeira de menor densidade, para a de maior densidade e para todo o conjunto dos corpos-de-prova.

b) Força máxima resistida ($F_{m\acute{a}x}$) como variável dependente

Os resultados das análises de variância para a força máxima resistida ($F_{m\acute{a}x}$) indicaram, com nível de significância de 5%, que não se pode rejeitar a hipótese nula para o fator definido pela espessura da peça central e que a hipótese nula deve ser rejeitada para o tipo de ligação e faixa de densidade, concluindo-se, com risco de 5%, que a força máxima resistida foi influenciada por estas últimas variáveis independentes.

4.6.3 Resistência de Ligações com Madeira BD

Na TAB. 4.32, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas normais, com madeira de menor densidade.

TABELA 4.32 - Resistência de LCN, Madeira BD

Dimensões		Tensões							
nominais:		Umid.	Dens.	Força (U=12%)				(U=12%)	
bc / hc	n	U _{méd}	d _{cp,méd}	F _{0,2%,méd}	δ	F _{0,2%,k} ⁽¹⁾	F _{0,2%,k} ⁽²⁾	σ _{c90} ⁽³⁾	τ _{gv0-90} ⁽⁴⁾
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
Todos									
72 / 72	18	11,51	684	35731	10,17	29634	32820	6,44	3,40
96 / 96	18	11,72	667	53511	12,68	42126	48462	7,46	2,93
120 / 120	42	11,19	680	58800	14,07	45082	50702	6,99	2,00
144 / 144	18	11,34	712	74213	11,19	60279	69866	7,82	1,81
CoCa									
72 / 72	6	11,07	685	34058	5,73	28175	32649	6,19	3,25
96 / 96	6	11,36	658	49604	8,04	41036	45659	6,93	2,71
120 / 120	13	11,16	671	56878	13,98	43418	47655	6,77	1,94
144 / 144	6	11,54	716	76440	8,16	63237	71985	8,04	1,86
Co/CoCaPa									
72 / 72	6	11,60	687	33374	8,93	27609	29046	5,90	3,17
96 / 96	6	11,99	667	57149	8,71	47278	53092	7,97	3,13
120 / 120	13	11,14	680	61301	15,09	45643	49263	7,29	2,09
144 / 144	6	10,81	703	73679	11,06	59604	66016	7,77	1,79
CoPa									
72 / 72	6	11,88	681	39762	4,14	32894	40641	7,25	3,78
96 / 96	6	11,81	676	53780	16,78	38193	42006	7,49	2,94
120 / 120	16	11,27	688	58330	13,18	45393	52707	6,92	1,99
144 / 144	6	11,69	718	72522	15,08	53632	65550	7,64	1,77

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão normal média nas peças laterais: $\sigma_{c90} = \text{média} \{F_{0,2\%}/(2 \cdot t \cdot bl)\}$

(4) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0-90} = \text{média} \{F_{0,2\%}/(2 \cdot bc \cdot hc)\}$

Nas FIG. 4.52 a 4.55, apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência ($F_{0,2\%}$) x altura da lâmina adesiva (h_c); tensão de compressão normal média nas peças laterais x h_c ; taxa de resistência à compressão normal (tensão média / resistência esperada) das peças laterais x h_c e tensão cisalhante média na área colada x h_c .

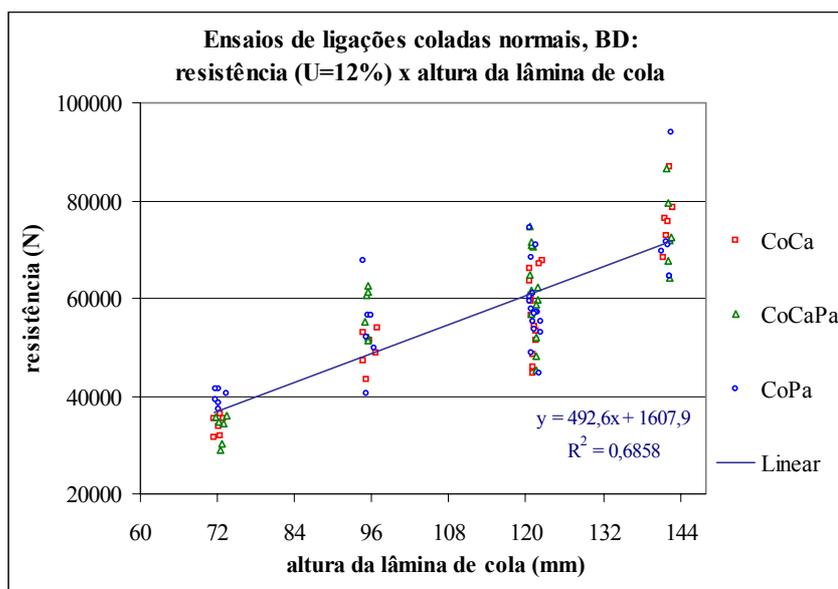


FIGURA 4.52 – Resistência de Ligações Coladas Normais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD

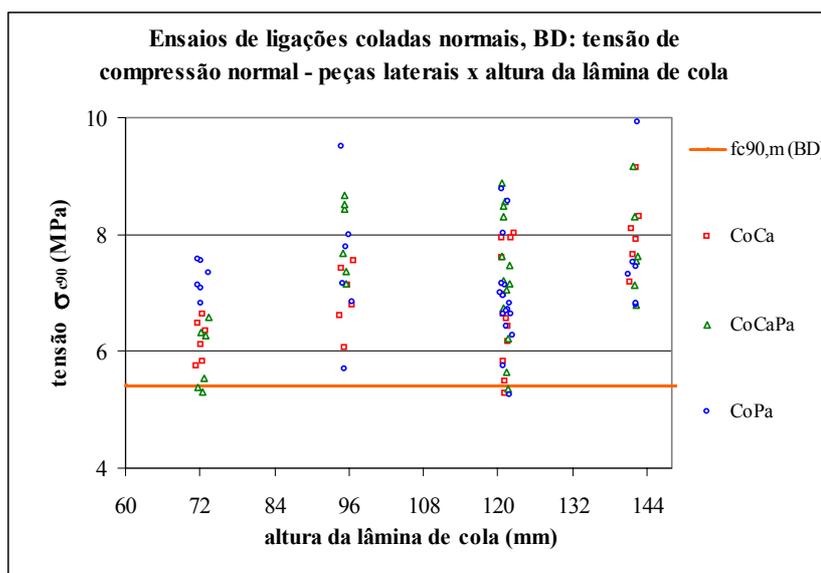


FIGURA 4.53 – Tensão de Compressão Normal Média nas Peças Laterais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD

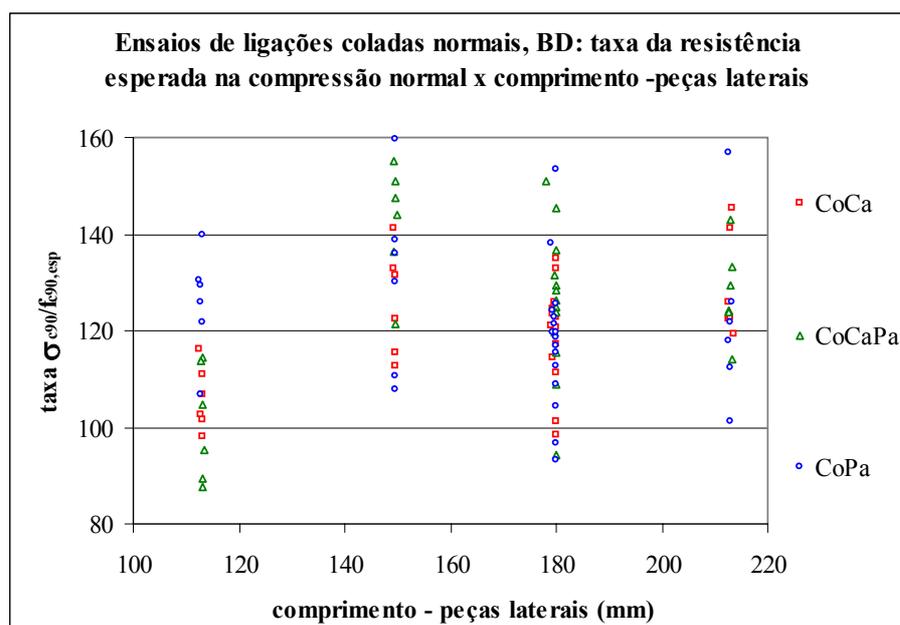


FIGURA 4.54 – Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) das Peças Laterais à Compressão Normal em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD

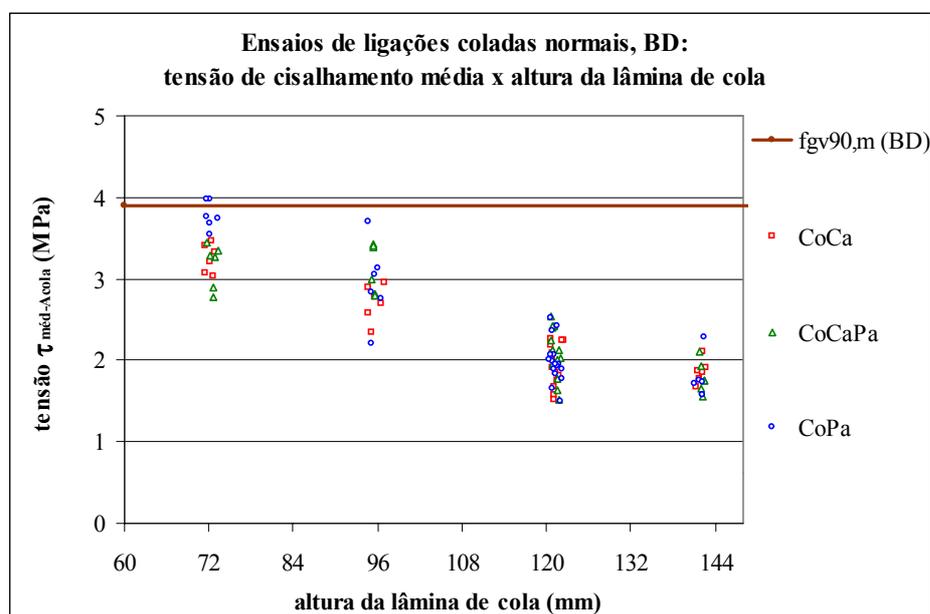


FIGURA 4.55 – Tensão Cisalhante Média na Área Colada em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD

4.6.4 Resistência de Ligações com Madeira AD

Na TAB. 4.33, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas normais, com madeira de maior densidade.

TABELA 4.33 - Resistência de LCN, Madeira AD

Dimensões nominais: bc / hc	n	Umid.	Dens.	Força (U=12%)			Tensões (U=12%)		
		$U_{méd}$ (%)	$d_{cp,méd}$ (kg/m ³)	$F_{0,2\%,méd}$ (N)	δ (%)	$F_{0,2\%,k}^{(1)}$ (N)	$F_{0,2\%,k}^{(2)}$ (N)	$\sigma_{c90}^{(3)}$ (MPa)	$\tau_{gv0-90,m}^{(4)}$ (MPa)
Todos									
72 / 72	19	11,24	779	28464	34,52	11993	19925	5,33	2,65
96 / 96	18	12,01	881	76290	17,48	53914	57219	10,72	4,17
120 / 120	19	12,04	879	78682	14,68	59320	64357	9,59	2,69
144 / 144	17	11,65	824	84464	11,28	68462	74076	8,89	2,05
CoCa									
72 / 72	6	11,32	787	30082	11,79	23956	26508	5,64	2,85
96 / 96	6	11,65	873	64161	23,98	37586	49584	9,01	3,50
120 / 120	7	11,71	879	70767	14,92	52530	52695	8,68	2,45
144 / 144	6	11,62	819	83141	11,03	67301	75862	8,76	2,01
Co/CoCaPa									
72 / 72	6	11,38	777	17067	49,29	2537	11947	3,19	1,58
96 / 96	6	12,21	892	86462	6,77	71528	85923	12,11	4,70
120 / 120	6	12,12	885	88335	7,56	73077	88236	10,76	3,03
144 / 144	6	11,73	842	86063	10,28	70782	76827	9,03	2,09
CoPa									
72 / 72	6	11,05	773	36847	6,44	30483	37601	6,90	3,40
96 / 96	6	12,16	877	78248	6,83	64733	80656	11,05	4,30
120 / 120	6	12,33	874	78262	12,90	60824	64558	9,52	2,66
144 / 144	6	11,59	809	84131	14,72	62741	68980	8,89	2,05

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão normal média nas peças laterais: $\sigma_{c90} = média \{F_{0,2\%} / (2 \cdot t \cdot bl)\}$

(4) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0-90} = média \{F_{0,2\%} / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

Nas FIG. 4.56 a 4.59, apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência ($F_{0,2\%}$) x altura da lâmina adesiva (h_c); tensão de compressão normal média nas peças laterais x h_c ; taxa de resistência à compressão normal (tensão média / resistência esperada) das peças laterais x h_c e tensão cisalhante média na área colada x h_c .

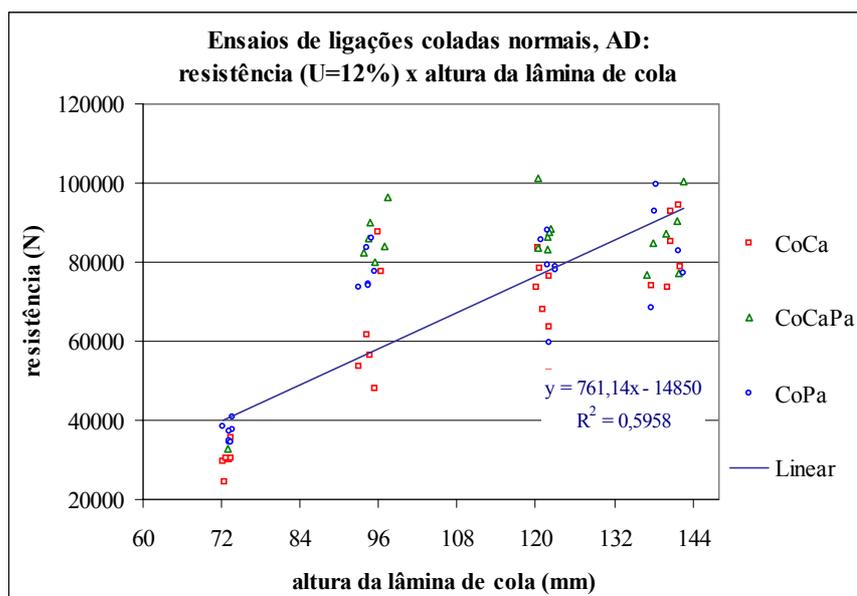


FIGURA 4.56 – Resistência de Ligações Coladas Normais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira AD

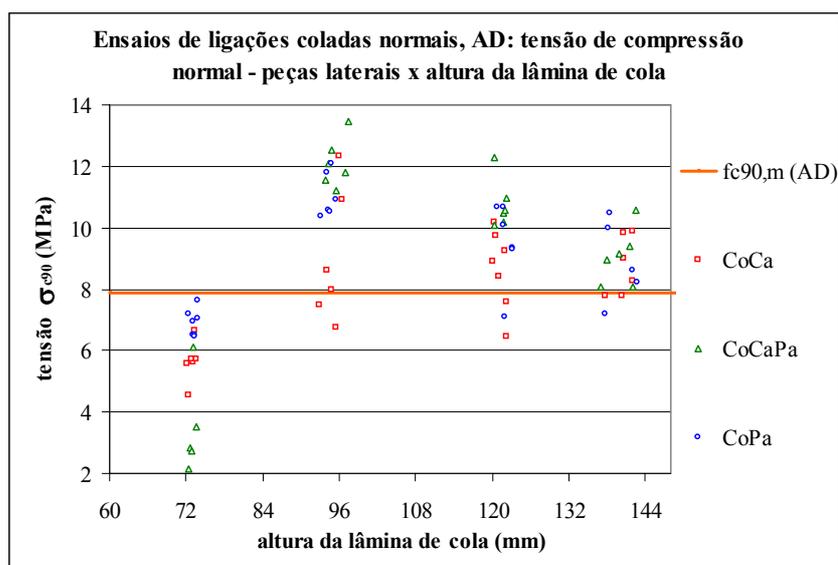


FIGURA 4.57 – Tensão de Compressão Normal Média nas Peças Laterais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira AD

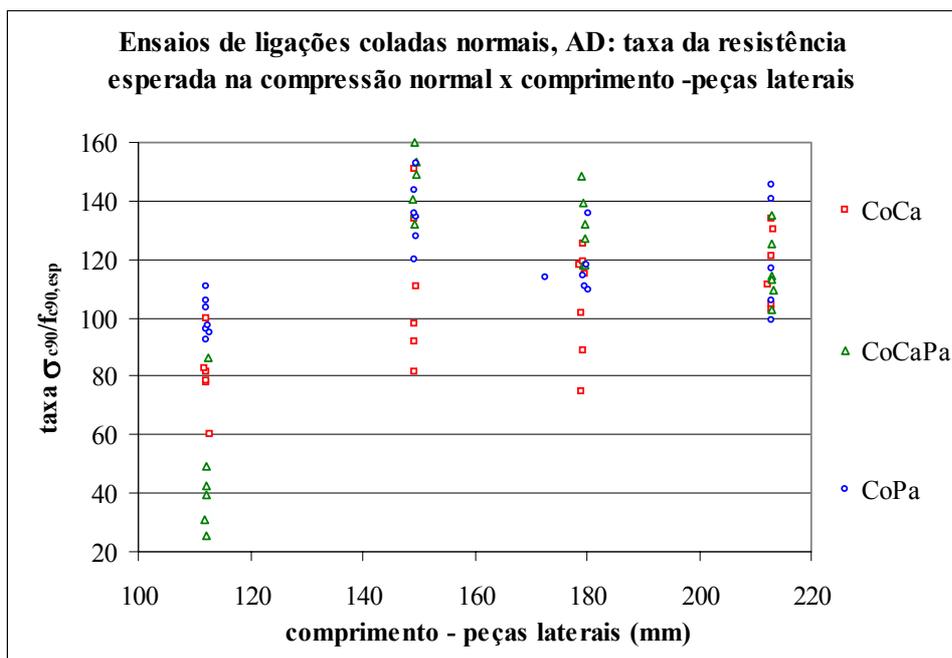


FIGURA 4.58 – Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) das Peças Laterais à Compressão Normal em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira AD

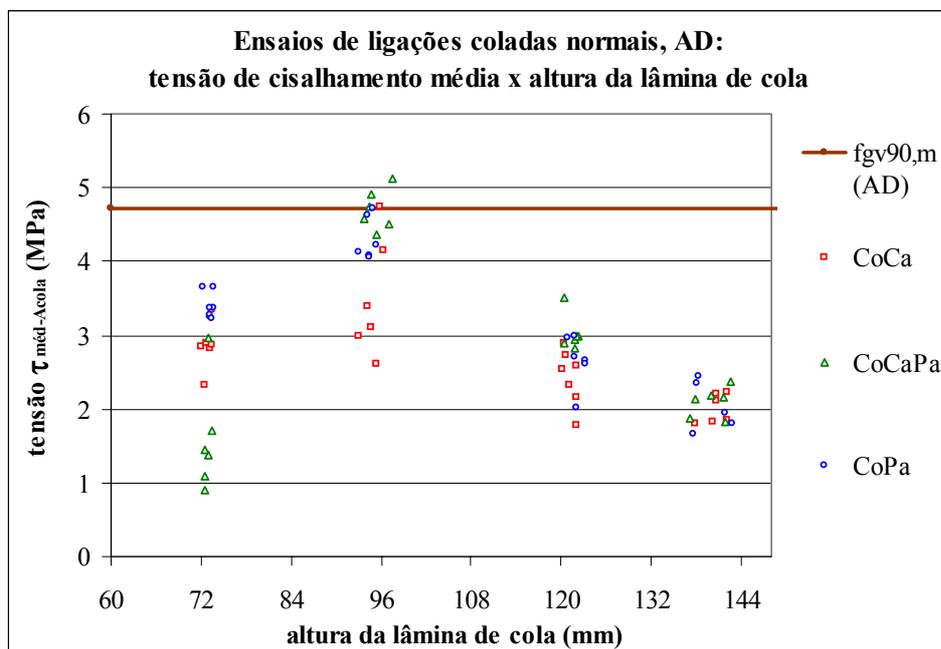


FIGURA 4.59 – Tensão Cisalhante Média na Área Colada em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira AD

4.6.5 Resistência de Ligações com Madeira BD e AD

Na TAB. 4.34, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência de ligações coladas normais, com madeira de menor e de maior densidade.

TABELA 4.34 - Resistência de LCN, Madeira BD e AD

Dimensões nominiais: bc / hc	n	Umid.	Dens.	Força (U=12%)				Tensões (U=12%)	
		U _{méd}	d _{cp,méd}	F _{0,2%,méd}	δ	F _{0,2%,k} ⁽¹⁾	F _{0,2%,k} ⁽²⁾	σ _{c90} ⁽³⁾	τ _{gv0-90,m} ⁽⁴⁾
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
Todos									
72 / 72	37	11,37	733	32000	25,78	18294	22400	5,87	3,02
96 / 96	36	11,86	774	64901	23,98	39043	45607	9,09	3,55
120 / 120	61	11,46	742	64993	20,23	41850	51768	7,80	2,22
144 / 144	35	11,49	767	79192	12,89	62232	70357	8,34	1,92
CoCa									
72 / 72	12	11,20	736	32070	10,70	26250	29057	5,91	3,05
96 / 96	12	11,50	766	56882	23,10	34597	46682	7,97	3,10
120 / 120	20	11,35	744	61739	17,84	43294	47124	7,42	2,11
144 / 144	12	11,58	768	79790	10,35	65784	76314	8,40	1,93
Co/CoCaPa									
72 / 72	12	11,49	732	25220	41,35	7533	17654	4,54	2,37
72 / 72	12	12,10	780	71805	22,51	44392	54455	10,04	3,92
72 / 72	19	11,45	745	69838	22,00	44083	50803	8,38	2,38
72 / 72	12	11,27	773	79871	12,99	62275	70458	8,40	1,94
CoPa									
72 / 72	13	11,43	730	38192	6,53	31727	37144	7,06	3,58
96 / 96	12	11,99	777	66014	22,12	41249	46210	9,27	3,62
120 / 120	22	11,56	739	63766	19,15	43357	53418	7,63	2,17
144 / 144	11	11,65	759	77799	16,15	56407	69955	8,21	1,89

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão normal média nas peças laterais: $\sigma_{c90} = \text{média} \{F_{0,2\%} / (2 \cdot t \cdot bl)\}$

(4) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0-90} = \text{média} \{F_{0,2\%} / (2 \cdot bc \cdot hc)\}$

Nas FIG. 4.60 a 4.63 apresentam-se, respectivamente, os seguintes gráficos: resistência ($F_{0,2\%}$) x altura da lâmina adesiva (h_c); tensão de compressão normal média nas peças laterais x h_c ; taxa de resistência à compressão normal (tensão média / resistência esperada) das peças laterais x h_c e tensão cisalhante média na área colada x h_c .

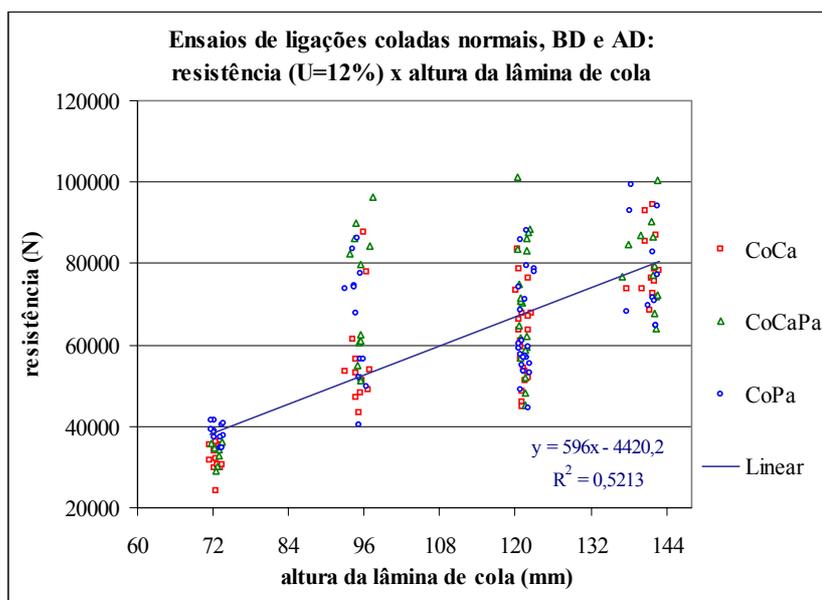


FIGURA 4.60 – Resistência de Ligações Coladas Normais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD e AD

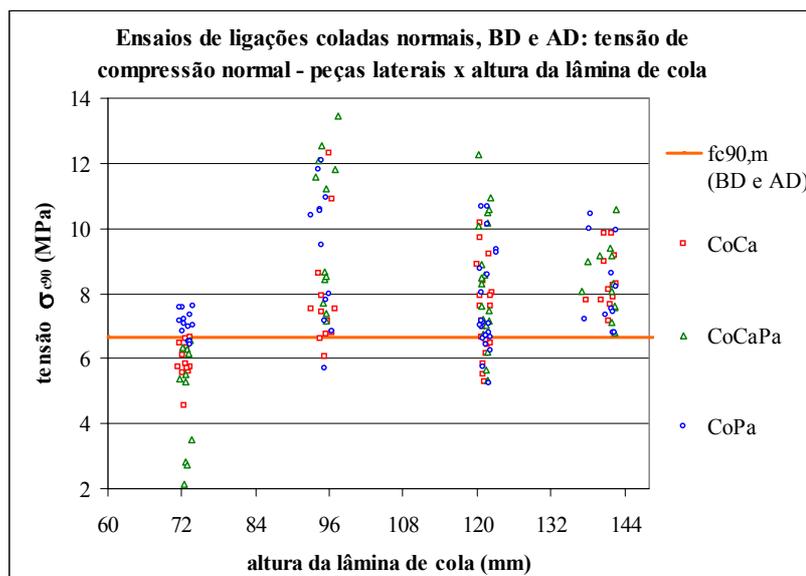


FIGURA 4.61 – Tensão de Compressão Normal Média nas Peças Laterais em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD e AD

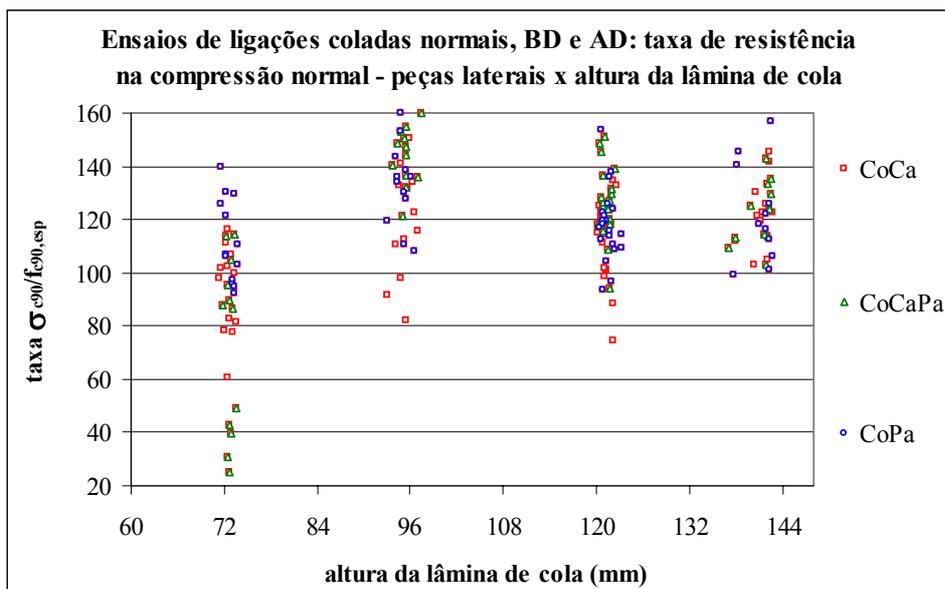


FIGURA 4.62 – Taxa de Resistência (Tensão Média / Resistência Esperada) das Peças Laterais à Compressão Normal em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD e AD

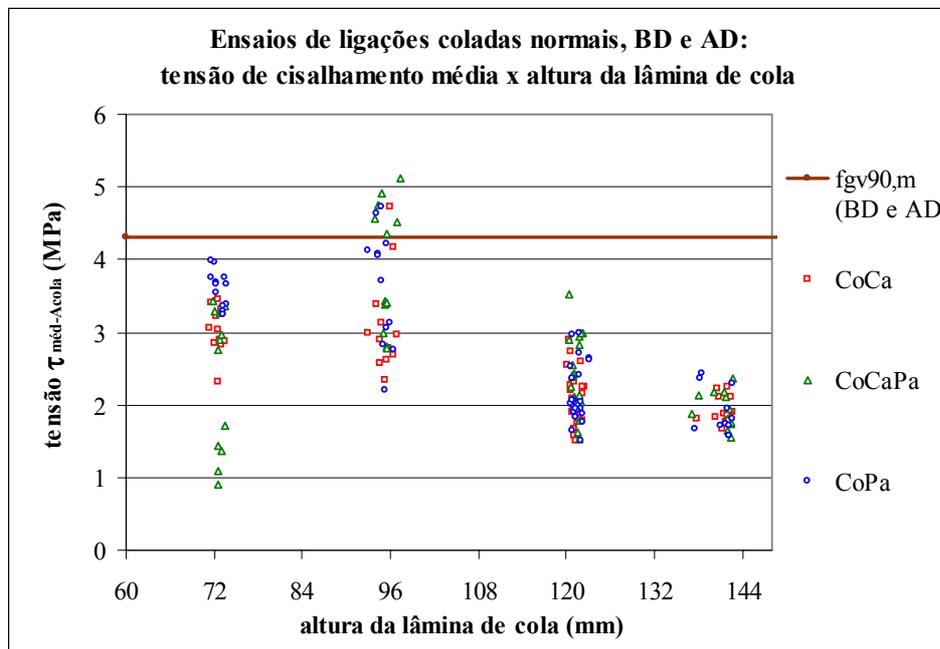


FIGURA 4.63 – Tensão Cisalhante Média na Área Colada em Função da Altura da Lâmina Adesiva, Madeira BD e AD

4.6.6 Resistência de Ligações com Peças Laterais de 360 mm

Na TAB. 4.35, apresenta-se o resumo dos resultados de resistência de ligações coladas normais, obtidos de ensaios com seis corpos-de-prova de madeira de menor densidade, $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 360$ mm, com duas repetições para cada tipo de ligação.

Na FIG. 4.64, apresentam-se, a título de exemplo, gráficos força x deformação de ligações coladas normais com $t_c = 30$ mm e $bl = 360$ mm. Os resultados individuais e os gráficos força x deslocamentos obtidos nos ensaios são apresentados no Anexo C.

TABELA 4.35 - Resistência de LCN, madeira BD, $bl = 360$ mm, $t_c = 30$ mm,
 $bc = hc = 120$ mm

Umíd.	Dens.	Força (U=12%)				Tensões (U=12%)	
$U_{méd}$	$d_{cp,méd}$	$F_{0,2\%,méd}$	δ	$F_{0,2\%,k}^{(1)}$	$F_{0,2\%,k}^{(2)}$	$\tau_{gv0-90,m}^{(3)}$	$\sigma_{c90,méd}^{(4)}$
(%)	(kg/m^3)	(N)	(%)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
11,79	655	93291	5,01	77177	90416	3,17	5,41

(1) $F_{k,est} = F_{u,méd} \cdot K_E = F_{u,méd} \cdot (1 - 1,645 K_{\sigma,esp} \delta_{am})$, com $\delta_{am,min} = 10\%$, ver Anexo E

(2) F_k (NBR-7190/97), ver Apêndice A

(3) Tensão normal média nas peças laterais: $\sigma_{c90} = média \{F_{0,2\%}/(2 \cdot t \cdot bl)\}$

(4) Tensão cisalhante média na área colada: $\tau_{gv0-90} = média \{F_{0,2\%}/(2 \cdot bc \cdot hc)\}$

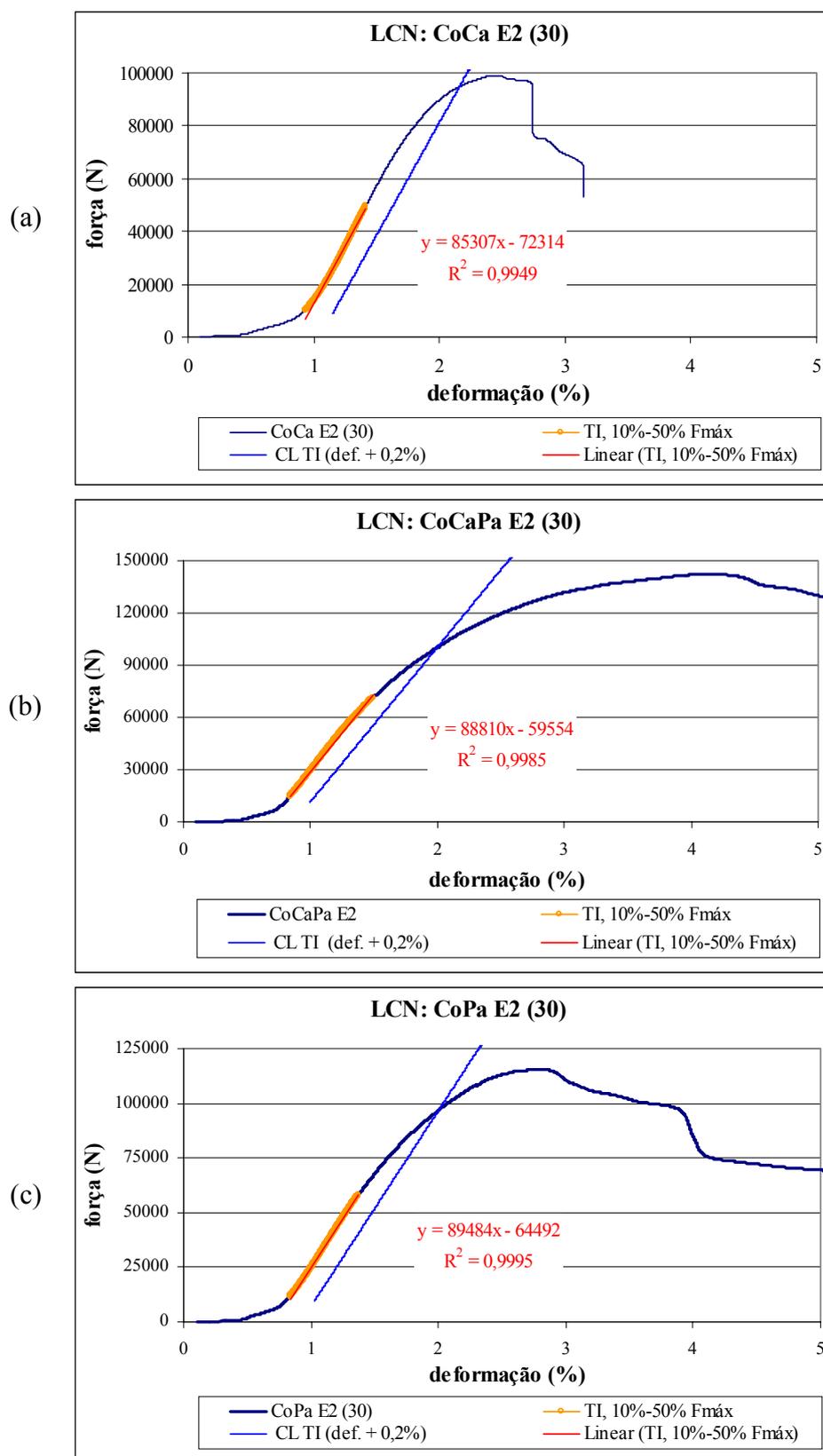


FIGURA 4.64 - Gráficos Força x Deformação, LCN, $t_c = 30$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm, $b_l = 360$ mm: a) CoCa; b) CoCaPa; c) CoPa

4.6.7 Rigidez de Ligações Coladas Normais

A avaliação da rigidez das ligações coladas normais sob força de compressão centrada foi efetuada a partir dos ensaios de 55 corpos-de-prova, com $b_c = h_c = 120$ mm e $b_l = 180$ mm.

Os resultados das análises de variância das rigidezes indicam, com nível de significância de 5%, que não se pode rejeitar a hipótese nula para os fatores definidos pelo tipo de ligação e espessura da peça central e que, para o fator faixa de densidade, a hipótese nula deve ser rejeitada, concluindo-se, com risco de 5%, que as resistências não são influenciadas pelas duas primeiras variáveis. Os resultados da análise de variância são apresentados no Anexo E.

Na TAB. 4.36, apresentam-se os valores médios obtidos nos ensaios de avaliação da rigidez de ligações normais, para agrupamento de corpos-de-prova de mesma dimensões b_c e h_c , independentemente do tipo de ligação e da espessura da peça central. Os valores individuais obtidos nos ensaios e os gráficos força x deslocamentos são apresentados no Anexo C.

Na TAB. 4.37, apresentam-se os valores médios obtidos nos ensaios de rigidez de ligações coladas normais, série de corpos-de-prova com $t_c = 30$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm e $b_l = 360$ mm. Os resultados individuais e os gráficos força x deslocamentos, obtidos nos ensaios, são apresentados no Anexo C.

Na FIG. 4.65 e 4.66, apresentam-se, a título de exemplo, os gráficos força x deslocamento obtidos para as ligações coladas normais, respectivamente, com $b_l = 180$ mm e $b_l = 360$ mm.

TABELA 4.36 – Rigidez de LCN, $bc = hc = 120$ mm e $bl = 180$ mm

Tipo de ligação	Faixa Dens.	n	Umid.	Dens.	$F_{0,2\%}$	Rigidez S_{lig}		δ
			(%)	(kg/m^3)	U = 12% (N)	U (N/mm)	U = 12% (N/mm)	U = 12% (%)
CoCa	BD	7	11,31	691	60342	56426	55642	14,74
	AD	7	11,71	879	70767	68826	68437	10,58
	BD e AD	14	11,51	785	65554	62626	62039	16,07
CoCaPa	BD	13	11,14	680	61301	57910	56955	14,61
	AD	6	12,12	885	88335	76601	76787	4,07
	BD e AD	19	11,45	745	69838	63812	63218	18,62
CoPa	BD	16	11,27	688	58330	55302	54496	18,53
	AD	6	12,33	874	78262	78215	78737	11,88
	BD e AD	22	11,56	739	63766	61551	61107	24,04
Todos	BD	36	11,23	686	59794	56462	55607	16,11
	AD	19	12,04	879	78682	74246	74326	10,97
	BD e AD	55	11,51	753	66319	62606	62074	20,05

TABELA 4.37 – Rigidez de LCN, $tc = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm e $bl = 360$ mm

Tipo de ligação / parâmetro	Umid.	Dens.	Força ($F_{0,2\%}$)	Rigidez (S_{lig})	
	(%)	(kg/m^3)	U = 12% (N)	U (N/mm)	U = 12% (N/mm)
CoCa	11,66	660	90573	72362	71867
CoCaPa	11,885	661	96775	69822	69652
CoPa	11,83	644	92527	70080	69842
Média	11,79	655	93291	70755	70453
Desvio-padrão	0,117	9,25	3171	1398	1228
Coef. de variação (%)	0,995	1,41	3,40	1,98	1,74

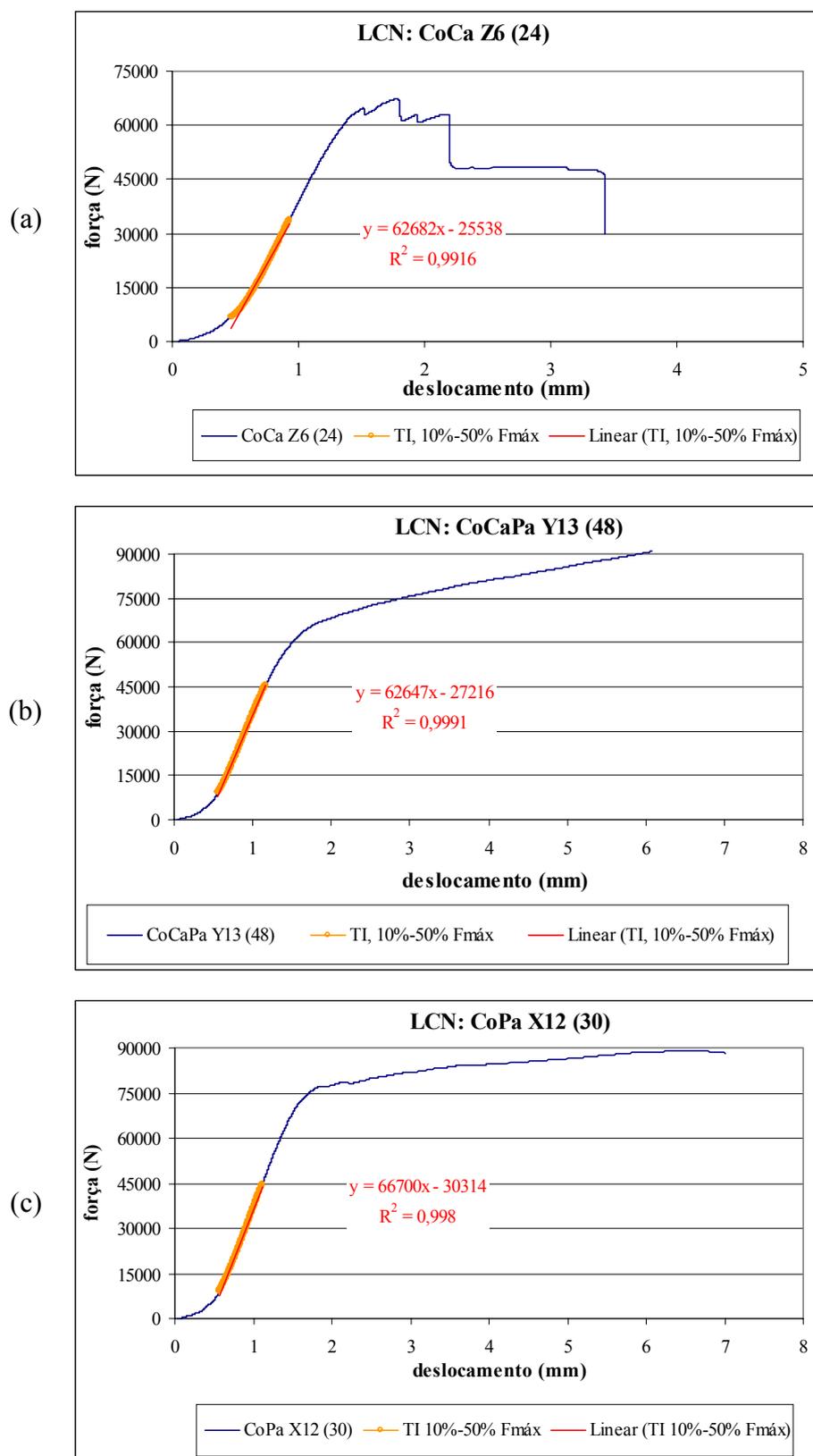


FIGURA 4.65 - Gráficos Força x Deslocamento, LCN, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm:

a) CoCa, $tc = 24$ mm; b) CoCaPa, $tc = 48$ mm; c) CoPa, $tc = 30$ mm

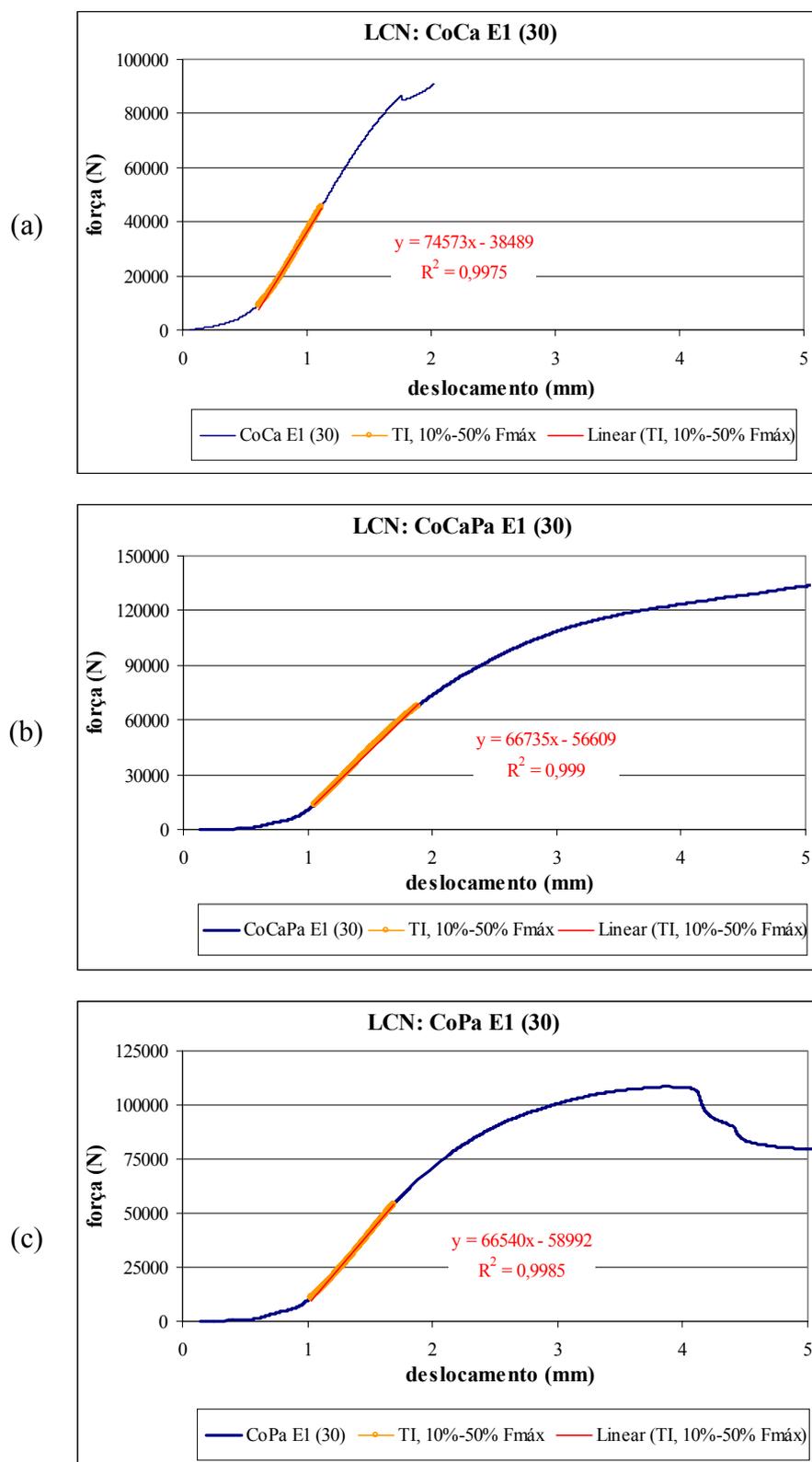


FIGURA 4.66 - Gráficos Força x Deslocamento, LCN, $t_c = 30$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm, $b_l = 360$ mm: a) CoCa; b) CoCaPa; c) CoPa

4.7 Resistência e Rigidez de Ligações Coladas Normais sob Força Excêntrica

4.7.1 Introdução

Apresentam-se neste item os resultados de avaliações exploratórias das resistências e rigidezes das ligações coladas paralelas sob força excêntrica. Foram ensaiados corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm e $bl = 180$ mm, sob força de compressão com excentricidade de 20 mm. Foram realizados 18 ensaios com duas repetições para cada tipo de ligação e para cada espessura de peça central t_c .

4.7.2 Análise Estatística dos Resultados

Os resultados das análises de variância para a resistência convencional ($F_{0,2\%}$) e para a rigidez (S_{lig}), indicaram, para o nível de significância de 5%, que as hipóteses nulas devem ser rejeitadas para os fatores definidos pelo tipo de ligação e pela espessura da peça central.

4.7.3 Resultados de Resistência e Rigidez

Na TAB. 4.38, apresentam-se os valores médios de resistência e rigidez das ligações coladas normais sob força excêntrica. No Anexo C apresentam-se os resultados individuais e os gráficos força x deslocamento obtidos nos ensaios. No Anexo E, apresentam-se os resultados das análises estatísticas.

TABELA 4.38 – Resistência e Rigidez de LCN Sob Força Excêntrica

Tipo de ligação / tc	Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
	$U_{méd}$	$d_{méd}$	$F_{0,2\%} (U)$	$F_{0,2\%} (U=12\%)$	$F_{máx}$	$S_{lig} (U)$	$S_{lig} (U=12\%)$
	(%)	(kg/m ³)	N	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
CoCa							
24	11,51	639	36250	35726	48408	22307	22092
30	11,59	687	47625	46983	50404	25332	25125
48	11,74	705	50750	50357	51882	24958	24838
CoCaPa							
24	11,56	654	56750	56015	77498	31987	31706
30	11,50	696	63875	62905	81844	34094	33755
48	11,69	703	65125	64521	84081	41264	41006
CoPa							
24	11,29	643	51125	50032	58177	25413	25050
30	11,86	698	62000	61732	68258	33736	33637
48	12,32	731	60250	60872	70793	34695	34923

4.7.4 Discussão dos Resultados

No caso de peças coladas ortogonais entre si é questionável a aplicação da expressão de Hankinson para a determinação da resistência ao cisalhamento, uma vez que as tensões nunca podem atuar paralelamente às fibras das madeiras de ambas as peças. Uma outra dificuldade, da avaliação dos efeitos da excentricidade da força aplicada, reside na constatação estatística da influência dos elementos mecânicos, na resistência de ligações coladas normais sob força excêntrica.

A avaliação desenvolvida no item 4.4.3 fica prejudicada pelos fatos acima referidos, embora a distribuição de tensões admitida para as ligações paralelas também possa ser considerada válida. No entanto, o desenvolvimento de uma avaliação análoga, apenas para efeito comparativo, conduz a seguinte relação:

$$F_y^e = 0,80.F_y \quad (4.10)$$

Na TAB. 4.39 apresenta-se a comparação dos valores das resistências obtidas nos ensaios com e sem excentricidade, para a madeira de menor densidade, que evidencia a influência do tipo de elemento mecânico na relação de resistência e a precariedade da relação obtida na Eq. (4.10).

TABELA 4.39 – Resistência Experimental e Estimada de LCN Sob Força Excêntrica

Tipo de Ligação	Resistências Experimentais			Resistência Estimada
	Força centrada F (N)	Força Excêntrica F ^e (N)	Taxa F ^e /F	
CoCa	56878	44355	0,78	45502
CoCaPa	61301	61146	1,00	49041
CoPa	58330	57545	0,99	46664
Média	58836	54349	0,92	47069

Nota-se que, para a ligação colada e cavilhada, a perda de resistência estimada pela Eq. (4.10) é bastante próxima da perda média obtida nos ensaios, enquanto para as demais ligações, praticamente não houve perda de resistência, evidenciando a influência dos elementos mecânicos utilizados. Como os ensaios foram realizados apenas para uma geometria, com $b = h = 120$ mm e excentricidade $e = h/6$, os resultados devem ser considerados apenas indicativos de tendências de comportamento, não sendo possível obter conclusões seguras.

Apresentam-se, na FIG. 4.67 e na FIG 4.68, a título de exemplos, respectivamente, gráficos força x deformação utilizados na determinação das resistências e gráficos força x deslocamentos originais obtidos em ensaios e utilizados para determinação das rigidezes das ligações.

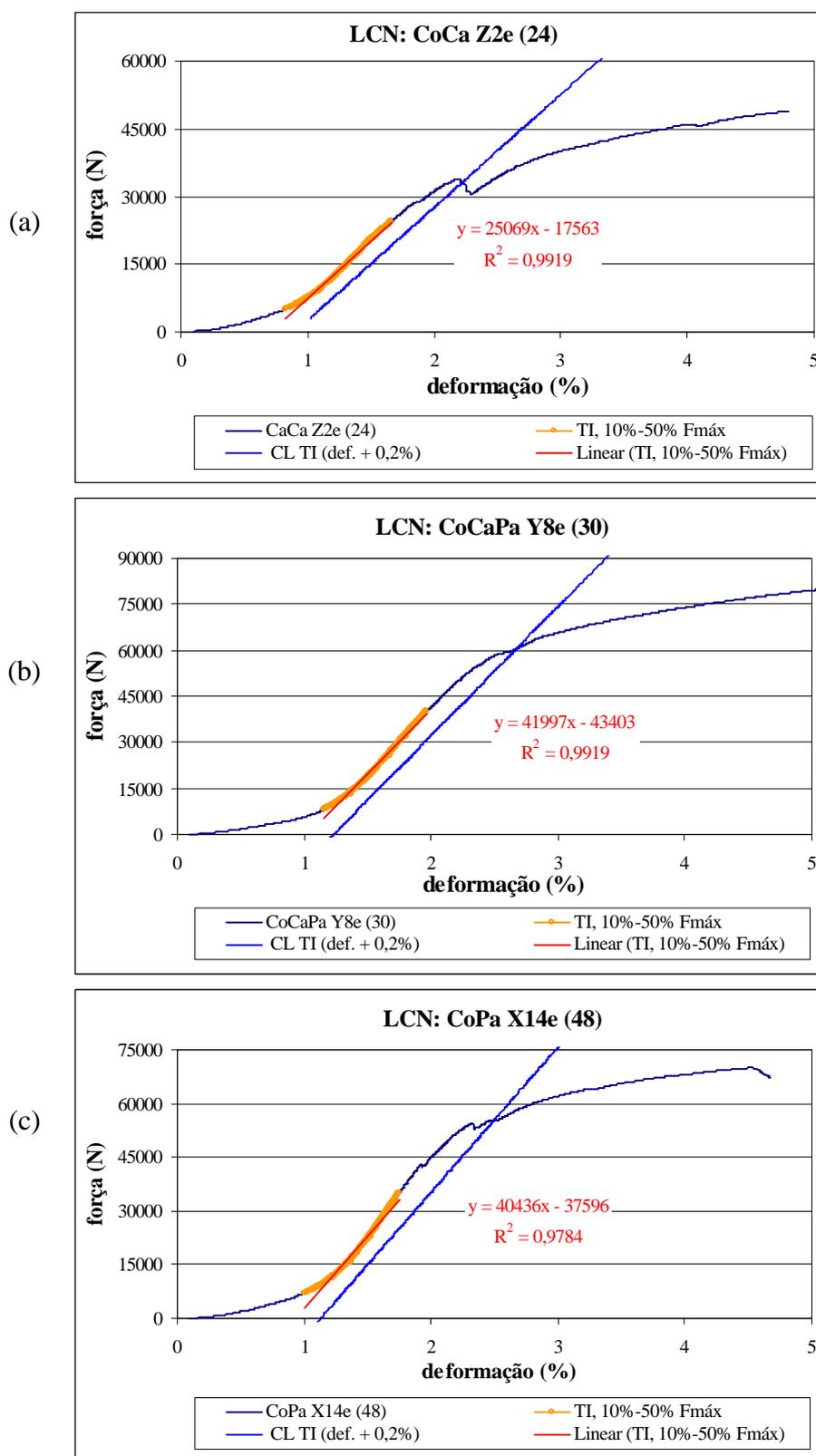


FIGURA 4.67 - Gráficos Força x Deformação, LCN Sob Força Excêntrica:

a) CoCa, $t_c = 24$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 30$ mm; c) CoPa, $t_c = 48$ mm

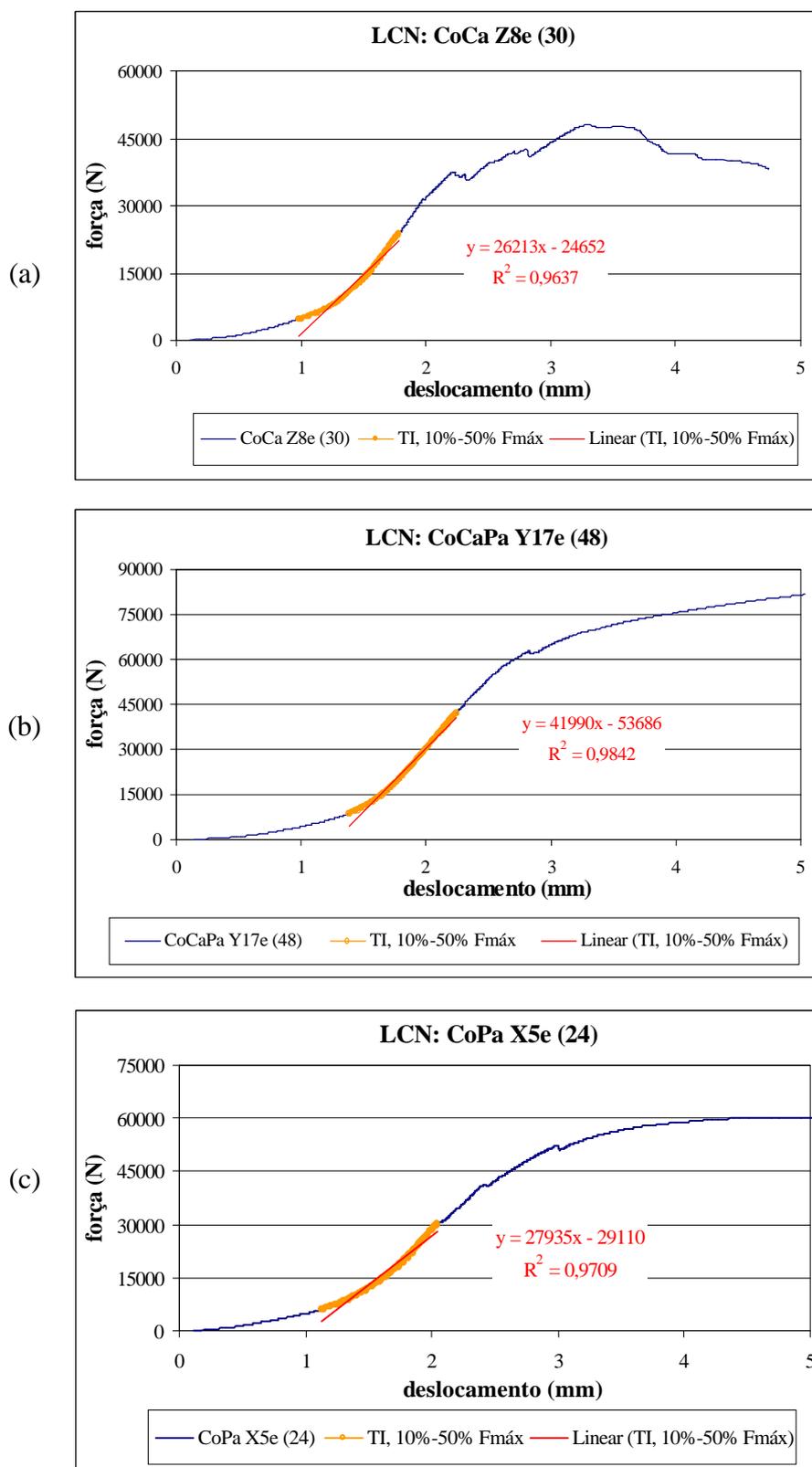


FIGURA 4.68 - Gráficos Força x Deslocamento, LCN Sob Força Excêntrica:

a) CoCa, $t_c = 30$ mm; b) CoCaPa, $t_c = 48$ mm; c) CoPa, $t_c = 24$ mm

4.8 Resistência e Rigidez de Ligações Mecânicas Normais

Apresentam-se neste item os resultados das avaliações experimentais das resistências e rigidezes das ligações normais com emprego unicamente de elementos mecânicos, em corpos-de-prova semelhantes aos das ligações coladas, com $b_c = h_c = 120$ mm e $b_l = 180$ mm, com o objetivo de permitir uma comparação com os correspondentes valores das ligações coladas.

Nas TAB. 4.40, apresentam-se os resultados médios das ligações com: cavilha central (Ca), cavilha e parafusos (CaPa) e parafuso central (Pa). Nas FIG. 4.69 e 4.70, apresentam-se gráficos força x deformação e força x deslocamento obtidos nos ensaios. No Anexo D, apresentam-se os resultados individuais e gráficos força x deslocamento obtidos nos ensaios.

TABELA 4.40 – Resistência e Rigidez de Ligações Mecânicas Normais

Tipo de ligação / tc (mm)	Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
	U	d	$F_{0,2\%}$	$F_{m\acute{a}x}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
	(%)	(kg/m^3)	(U) (N)	(U) (N)	(U=12%) (N)	(U) (N/mm)	(U=12%) (N/mm)
Cavilhadas							
24	11,50	725	21500	22143	21177	12740	12612
30	11,73	694	21125	23492	20950	12962	12891
48	11,91	722	21000	22788	20950	13914	13888
Cavilhadas e Parafusadas							
24	11,21	744	56750	88164	55425	30234	29765
30	11,21	692	46750	81096	45644	17699	17421
48	11,42	740	47875	84049	47028	16858	16662
Parafusadas							
24	11,53	725	25500	40081	25132	26852	26595
30	11,97	726	26250	41053	26179	25067	25026
48	11,88	736	27000	65459	26901	24814	24751

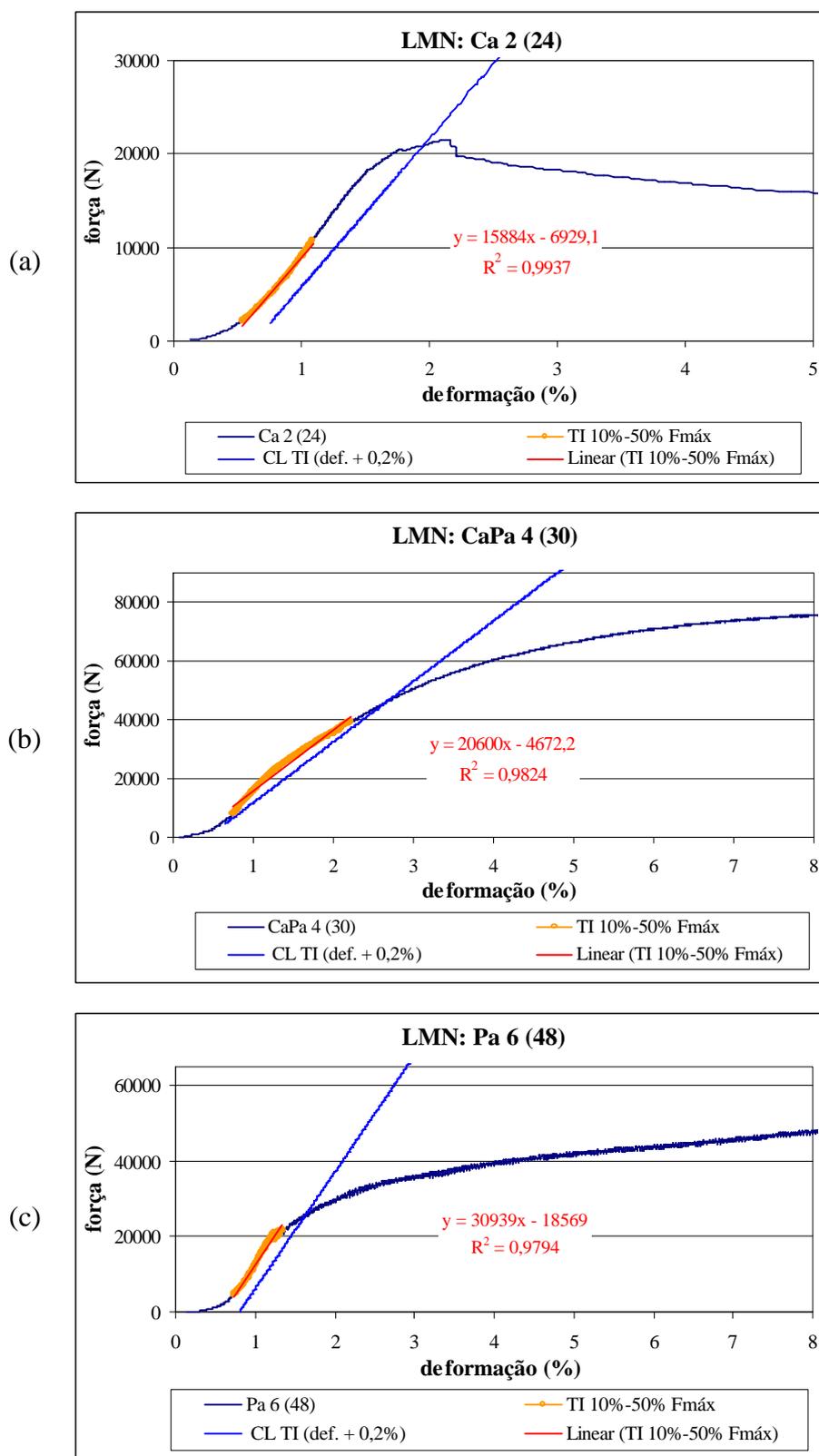


FIGURA 4.69 – Gráficos Força x Deformação de LMN: a) Ca, $t_c = 24$ mm;
b) CaPa, $t_c = 30$ mm; c) Pa, $t_c = 48$ mm

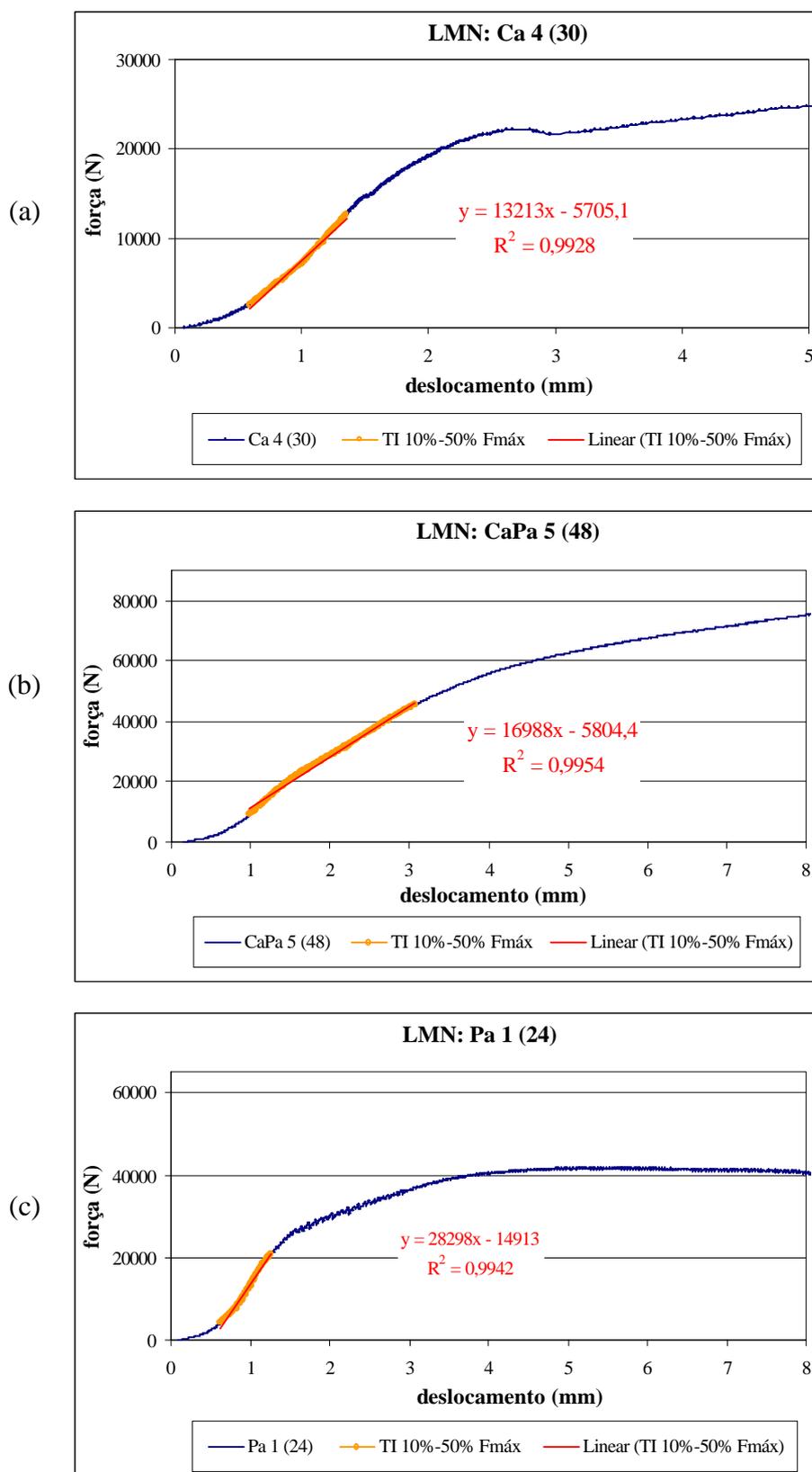


FIGURA 4.70 – Gráficos Força x Deslocamento de LMN: a) Ca, $t_c = 30$ mm;

b) CaPa, $t_c = 48$ mm; c) Pa, $t_c = 24$ mm

Para fins de comparação, apresentam-se na TAB. 4.41 os resultados médios e relações de resistência e rigidez das ligações normais mecânicas e coladas, para os corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm e madeira BD.

TABELA 4.41- Valores Médios e Relações de Resistência e Rigidez de Ligações Normais

Valores Médios Ligações Mecânicas Normais (LMN)			
Tipo de Ligação	$F_{m\acute{a}x}$ (U) (N)	$F_{0,2\%}$ (U=12%) (N)	S_{lig} (U=12%) (N/mm)
Ca	22808	21026	13130
CaPa	84436	49366	21283
Pa	48864	26071	25457
Valores Médios Ligações Coladas Normais (LCN)			
CoCa		56878	55642
CoCaPa		61301	56955
CoPa		58330	54496
Valores Relativos LMN/LCN			
	$F_{m\acute{a}x} / F_{0,2\%}$	$F_{0,2\%} / F_{0,2\%}$	S_{lig} / S_{lig}
Ca / CoCa	0,40	0,37	0,24
CaPa / CoCaPa	1,38	0,81	0,37
Pa / CoPa	0,84	0,45	0,47

4.9 Resultados das Análises Numéricas

4.9.1 Introdução

Apresentam-se neste item os resultados das análises numéricas de ligações coladas paralelas e normais de corpos-de-prova com $b = bc = hc = 120$ mm, efetuadas com o método dos elementos finitos com emprego do sistema Ansys, considerando-se estado plano de tensões, comportamento elástico linear e relações constitutivas de material isotrópico e ortotrópico para a madeira. Foram utilizadas malhas de elementos quadráticos de oito nós e dois deslocamentos de traslação (u_x e v_y), sem o uso elementos de junta para simular a linha adesiva.

Na FIG. 4.71, são representadas as malhas de elementos finitos utilizadas nas modelagens das ligações coladas paralelas, com 216 elementos de 4mm de lado nas peças de 24 mm, 288 elementos de 3,75 mm por 4 mm na peça central de 30 mm e 432 elementos de 4 mm de lado na peça central com 48 mm.

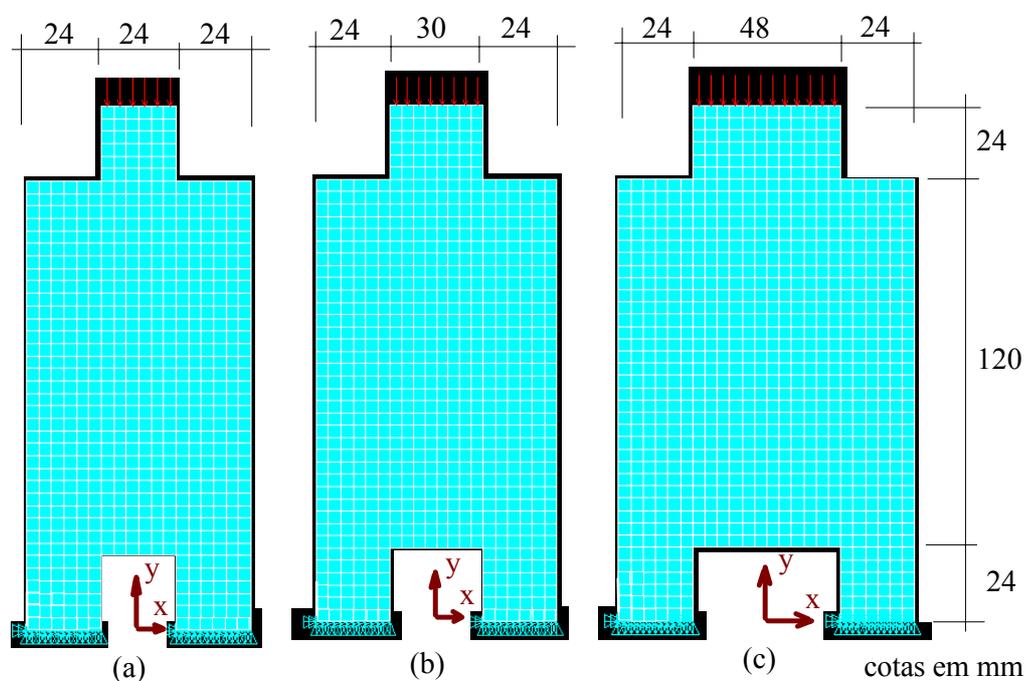


FIGURA 4.71 – Malhas de Elementos Finitos Utilizadas nas Análises de LCP:
a) $t_c = 24$ mm, 648 Elem.; b) $t_c = 30$ mm, 720 Elem.; c) $t_c = 48$ mm, 864 Elem.

Foi utilizado o módulo $E_L = 15167$ MPa, obtido para a madeira de menor densidade. Nos modelos ortotrópicos foram utilizadas para o módulo E_N duas alternativas: $E_N = E_L/21,23 = 715$ MPa, obtida pela extensômetria e designado de modelo ortotrópico 1 e $E_N = 438$ MPa, obtido na caracterização da madeira e designado de modelo ortotrópico 2. Foi utilizado para o coeficiente de Poisson o valor de forma a manter a simetria da matriz de flexibilidade:

$$\left(\frac{\nu}{E}\right) = \left(\frac{\nu_{NL}}{E_N} + \frac{\nu_{LN}}{E_L}\right) / 2 \quad (4.11)$$

Inicialmente, foi utilizado nas análises o valor $G_{LN} = E_L/14 = 1083$ MPa, obtido com emprego da Eq. (2.48c). Ao final do trabalho avaliou-se experimentalmente o valor do módulo G_{LN} , tendo sido obtido o valor médio de $G_{LN} = 1006$ MPa. As diferenças nos resultados das análises numéricas para os dois diferentes valores de G_{LN} . Foram desprezíveis, em média abaixo de 1%.

Nas análises efetuadas, considerou-se uma pressão uniforme aplicada no topo da peça central e o impedimento dos deslocamentos da base das peças laterais nas duas direções. Como a relação da resultante das reações horizontais em relação à das reações verticais foi reduzida, de apenas 6,6% no modelo com $t_c = 24$ mm, considerou-se válido o impedimento do movimento horizontal por atrito.

Na TAB. 4.42 são apresentados os resultados para os deslocamentos máximos para uma força aplicada equivalente a 100 kN e correspondentes rigidezes dos conjuntos obtidos com o modelo ortotrópico 2.

TABELA 4.42 - Resultados de Análises Numéricas (MEF) das LCP

Corpo-de-prova	Pressão aplicada p_y (MPa)	Desl. máximo $v_{y, \text{máx}}$ (mm)	Rigidez S_{lig} (N/mm)
lc 24-120	34,72	-0,261	383538
lc 30-120	27,78	-0,243	408163
lc 48-120	17,36	-0,226	440839

4.9.2 Ligação Colada Paralela com Peça Central de 24 mm

Na FIG. 4.72, apresentam-se os gráficos de variação das tensões σ_y , σ_x e τ_{xy} ao longo da superfície de ligação das peças e σ_x ao longo eixo de simetria, para o corpo-de-prova com espessura da peça central $t_c = 24$ mm.

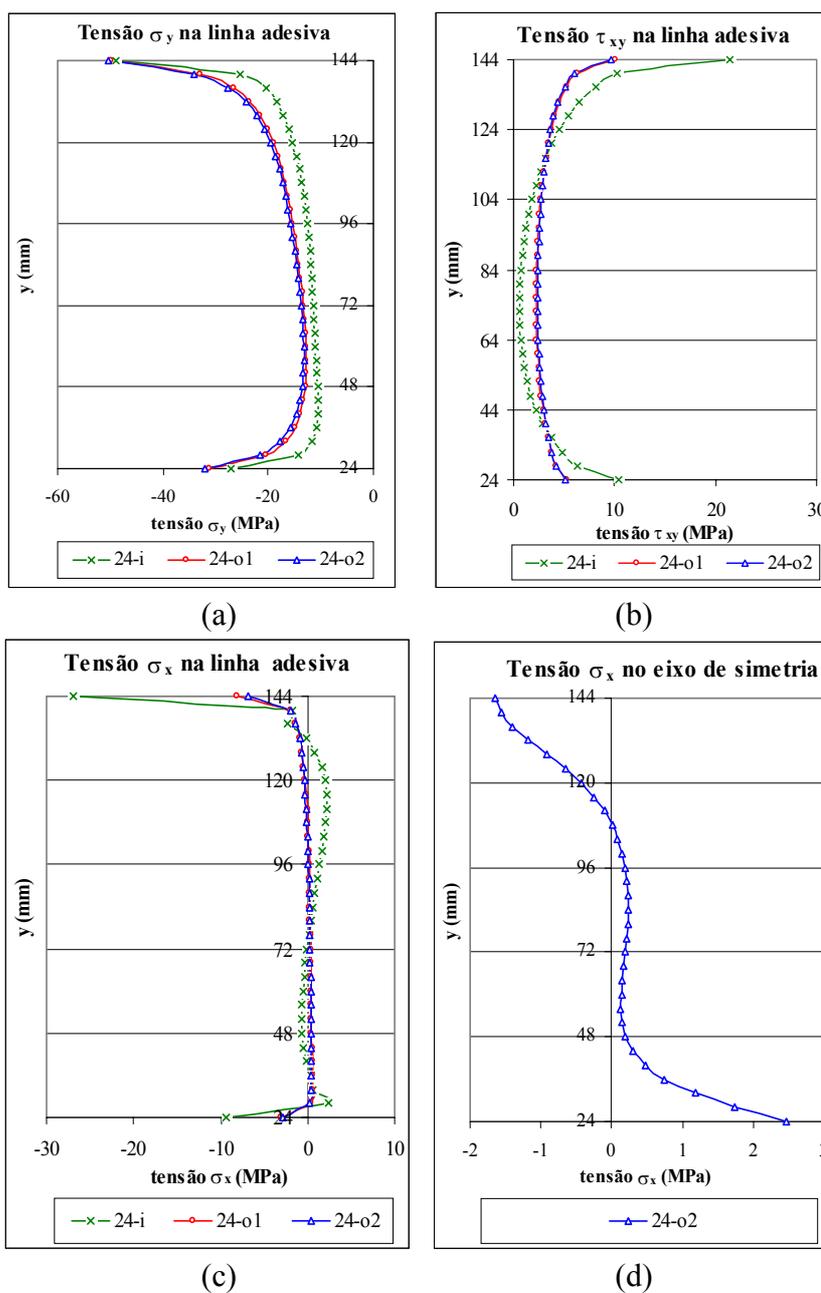


FIGURA 4.72 – Distribuição de Tensões na Linha Adesiva, LCP, $t_c = 24$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no Eixo de Simetria

Na FIG. 4.73, apresentam-se os mapas de tensões obtidos com o modelo ortotrópico 2.

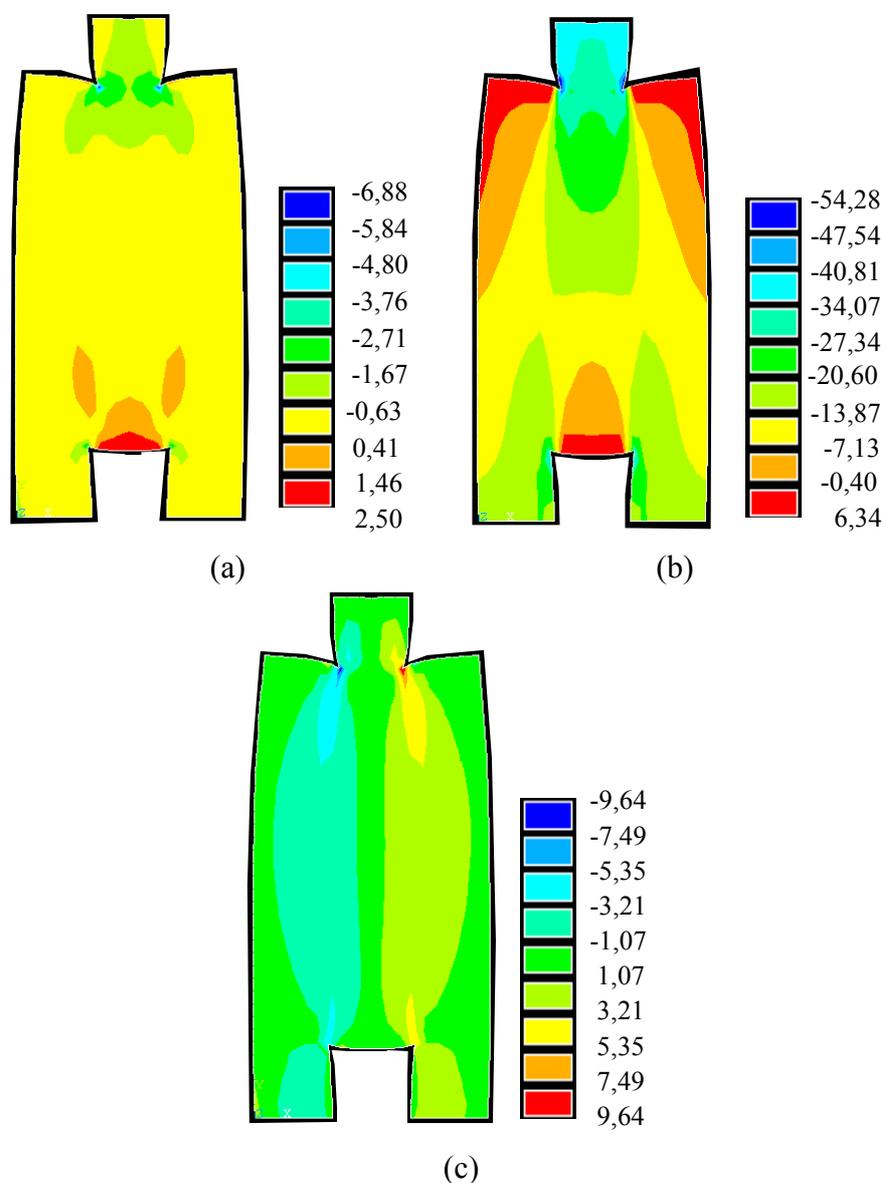


FIGURA 4.73 – Mapas de Tensões (MPa), LCP, $t_c = 24$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm:

a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}

A integração pela regra do trapézio, das tensões normais de tração (σ_x^+) ao longo do eixo de simetria e a correspondente força resultante (F_t), valem:

$$\int \sigma_x^+ .dy \approx 33,4 \text{ N/mm} \quad \text{e} \quad F_t = b . \int \sigma_x^+ .dy = 120 \times 33,4 \cong 4000 \text{ N} \quad (4.12)$$

4.9.3 Ligação Colada Paralela com Peça Central de 30 mm

Na FIG. 4.74, apresentam-se os gráficos de variação das tensões σ_y , σ_x e τ_{xy} ao longo da superfície de ligação das peças e σ_x ao longo eixo de simetria, para $t_c = 30$ mm.

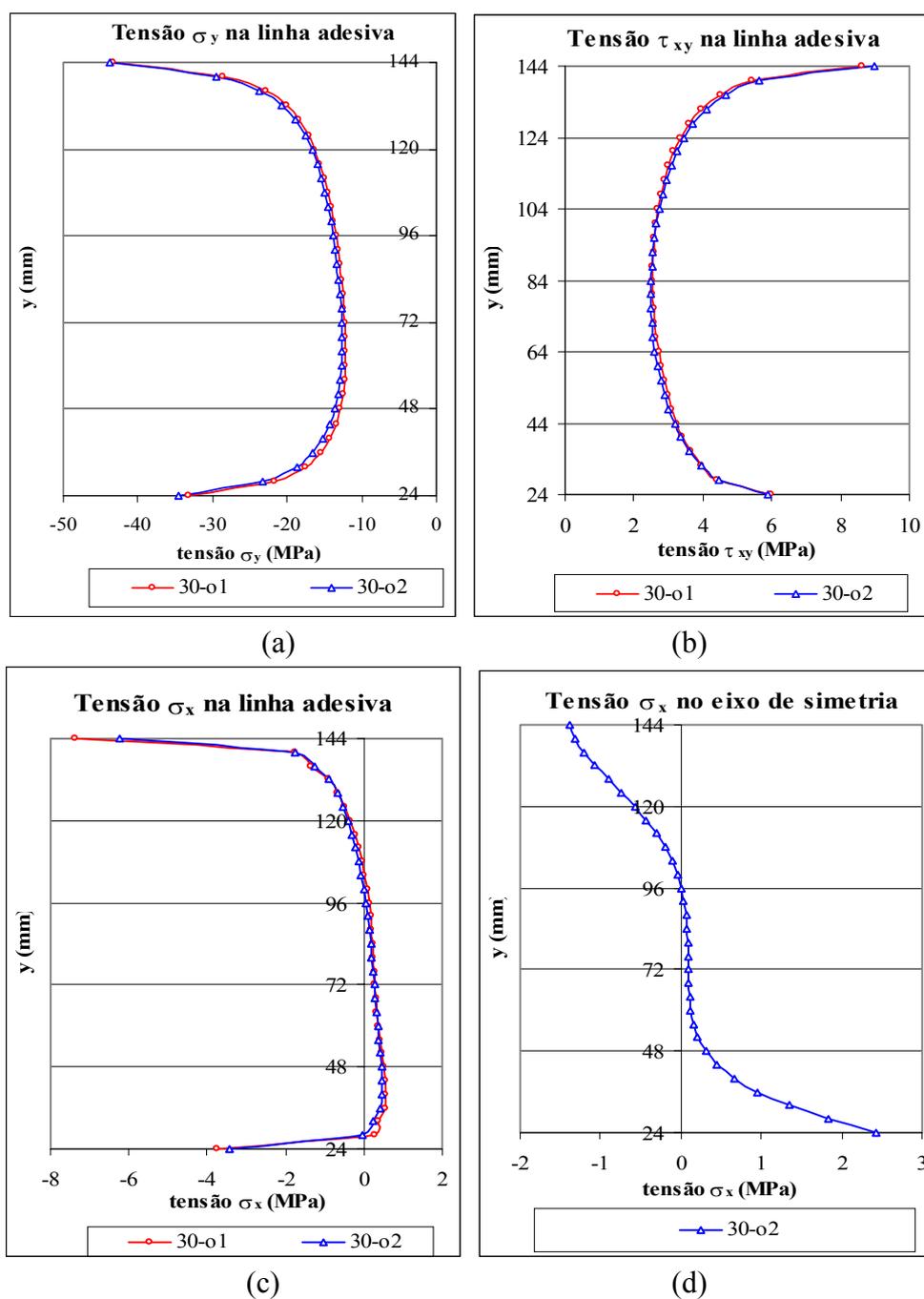


FIGURA 4.74 – Distribuição de Tensões na Linha Adesiva, LCP, $t_c = 30$ mm,

$b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no Eixo de Simetria

Na FIG. 4.75, apresentam-se os mapas de tensões obtidos com o modelo ortotrópico 2.

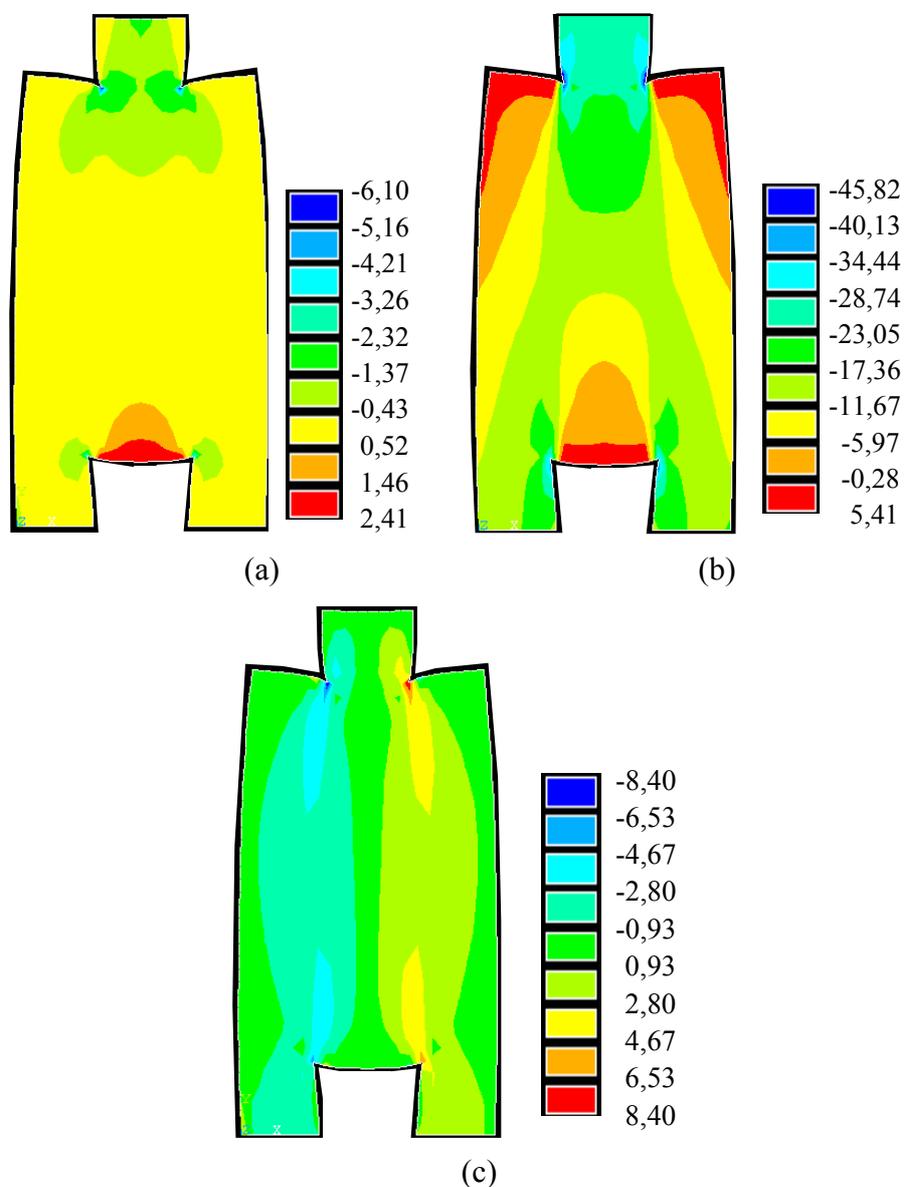


FIGURA 4.75 - Mapa de Tensões (MPa), LCP, $t_c = 30$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm:

a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}

A integração das tensões normais de tração (σ_x^+) ao longo do eixo de simetria e a força resultante (F_t) valem:

$$\int \sigma_x^+ . dy \approx 31,6 \text{ N/mm} \quad \text{e} \quad F_t = b . \int \sigma_x^+ . dy = 120 \times 31,6 \approx 3800 \text{ N} \quad (4.13)$$

4.9.4 Ligação Colada Paralela com Peça Central de 48 mm

Na FIG. 4.76, apresentam-se os gráficos de variação das tensões σ_y , σ_x e τ_{xy} ao longo da superfície de ligação das peças e σ_x ao longo eixo de simetria, para $t_c = 48$ mm.

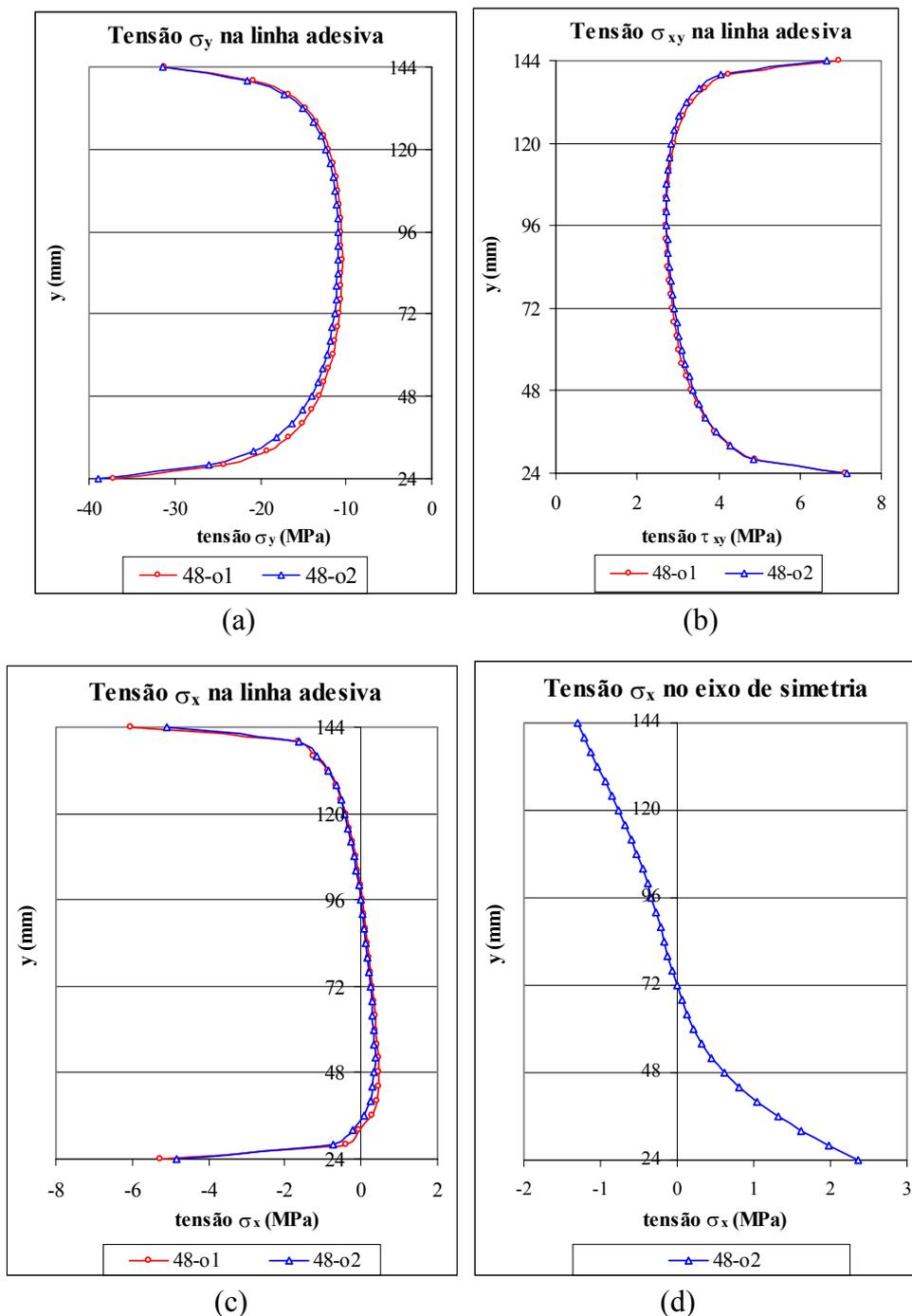


FIGURA 4.76 – Distribuição de Tensões na Linha Adesiva, LCP, $t_c = 48$ mm, $bc = hc = 120$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x ; d) σ_x no Eixo de Simetria

Na FIG. 4.77, apresentam-se os mapas de tensões obtidos com o modelo ortotrópico 2.

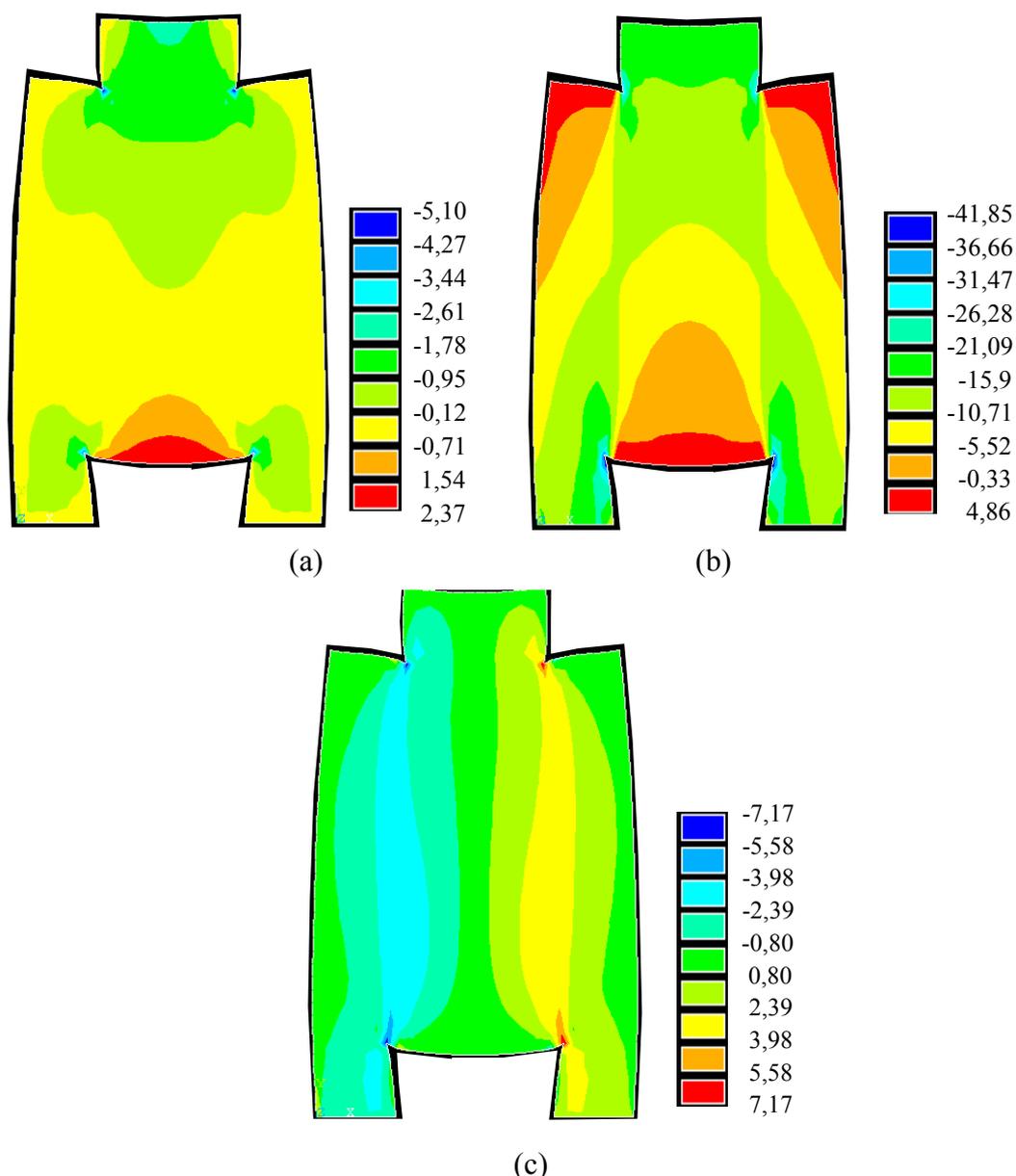


FIGURA 4.77 – Mapa de Tensões (MPa), LCN, $t_c = 48$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}

A integração das tensões normais de tração (σ_x^+) ao longo do eixo de simetria e a força resultante (F_t) valem:

$$\int \sigma_x^+ .dy \approx 38,9 \text{ N/mm} \quad \text{e} \quad F_t = b . \int \sigma_x^+ .dy = 120 \times 38,9 \approx 4670 \text{ N} \quad (4.14)$$

4.9.5 Resultados Comparativos das Tensões na Linha Adesiva para as Ligações Coladas Paralelas

Na FIG. 4.78, apresentam-se os gráficos comparativos das tensões na linha adesiva de ligações coladas paralelas, para as três diferentes dimensões da peça central.

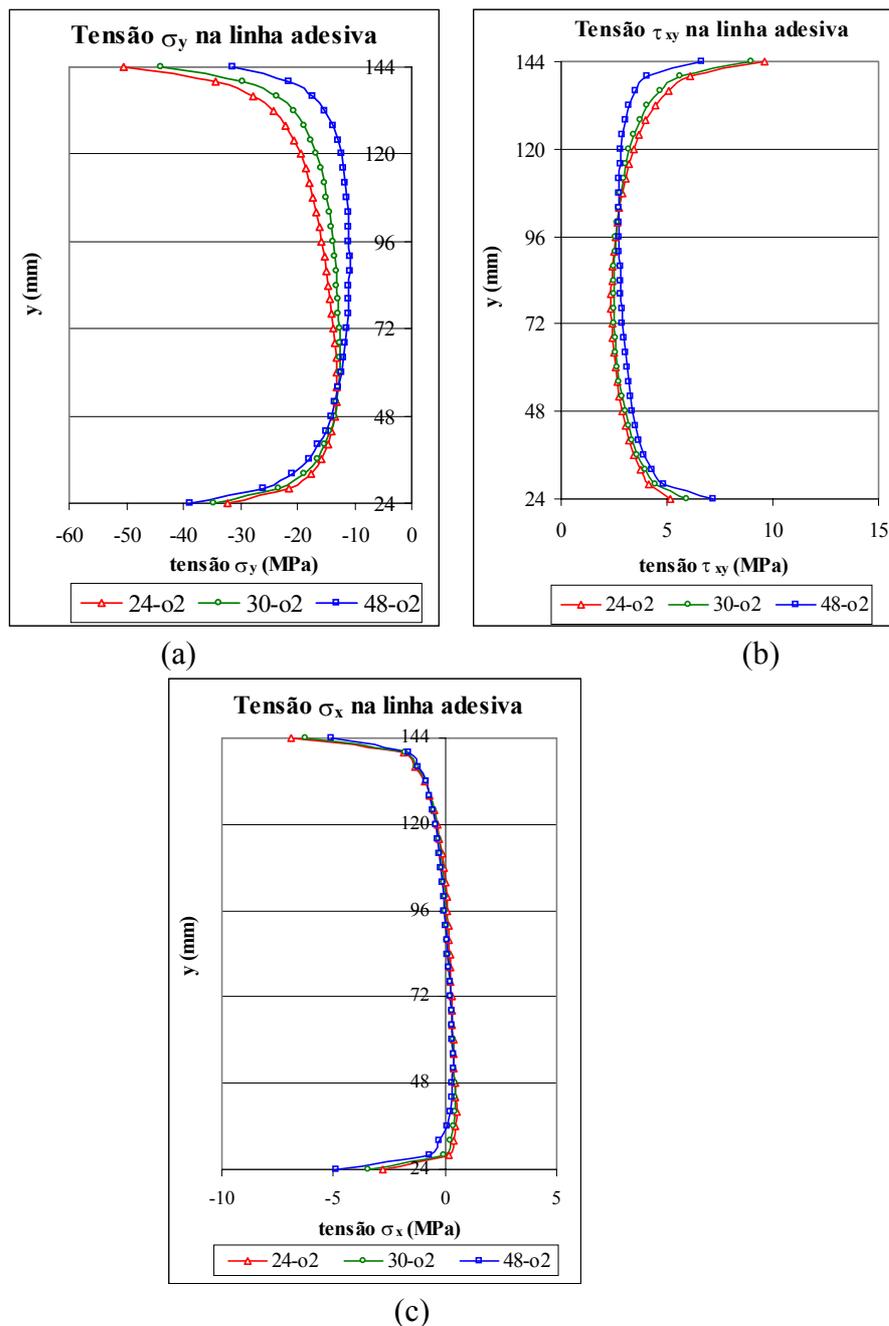


FIGURA 4.78 – Distribuição das Tensões na Linha Adesiva para as Três Espessuras de Peça Central, Modelo Ortotrópico 2: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x

4.9.6 Ligação Colada Normal

Para uma avaliação simplificada das ligações coladas normais, efetuaram-se análises numéricas pelo MEF do corpo-de-prova com $t_c = 24$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm e $b_l = 180$ mm. Foram utilizados o sistema Ansys, modelagem bidimensional com elementos quadráticos e comportamento elástico linear ortotrópico. A malha e as principais dimensões do modelo são representadas na FIG. 4.79.

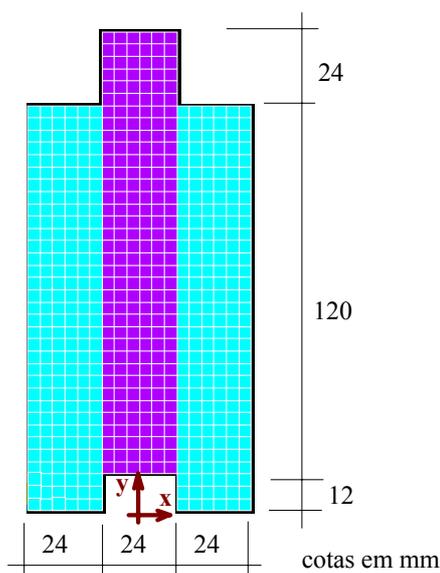
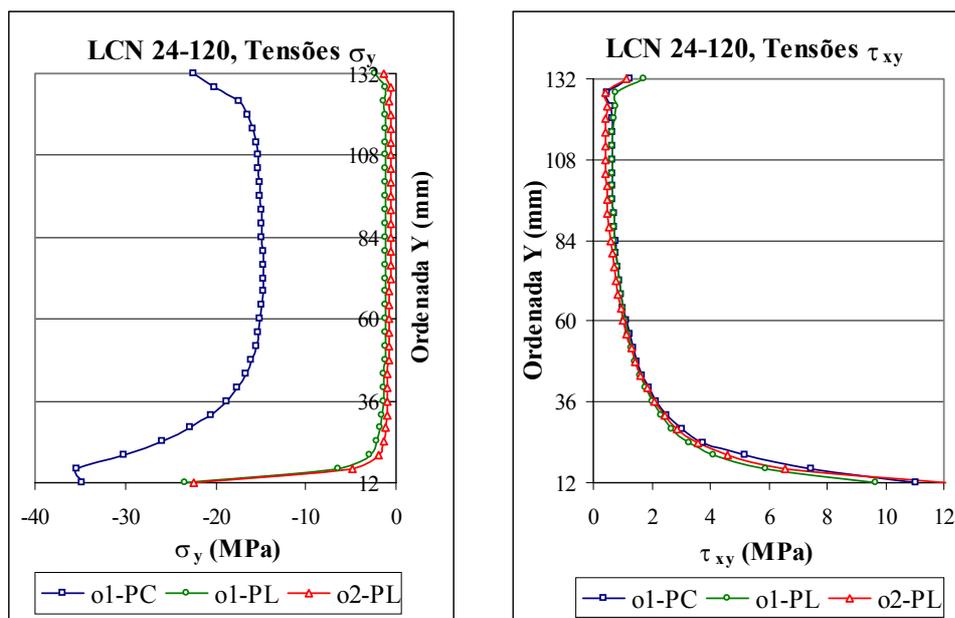


FIGURA 4.79 – Malha de 612 Elementos Finitos, Utilizada na Modelagem do Corpo-de-Prova de Ligação Colada Normal, com $t_c = 24$ mm, $b = h_c = 120$ mm

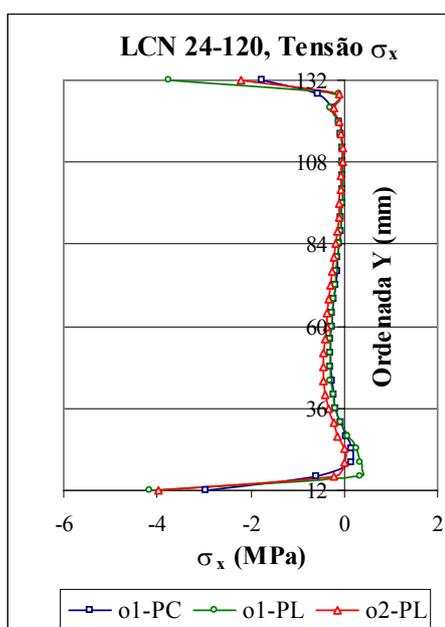
Para simular a contribuição das peças laterais de comprimento 180 mm, com abas sobressalentes em relação à largura da peça central de 120 mm, os módulos de elasticidade da madeira foram majorados por um fator de multiplicação. O coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento das peças laterais foram estimadas por meio das relações definidas, respectivamente, na TAB. 2.8 e na Eq. 2.48b. Foram utilizados no modelo ortotrópico 1: $E_x = 715$ MPa, $E_y = 15167$ MPa, $\nu_{xy} = 0,0266$ e $G_{xy} = 1083$ MPa, na peça central e $E_x = E_y = 715 \times 1,5 \cong 1072$ MPa, $\nu_{xy} = 0,33$ e $G_{xy} = 1,5 \times 1083 / 10 \cong 163$ MPa, nas peças laterais. No modelo ortotrópico 2, foram utilizados: $E_x = 438$ MPa, $E_y = 15167$ MPa, $\nu_{xy} = 0,0186$ e $G_{xy} = 1083$ MPa, na peça central e $E_x = E_y = 438 \times 1,25 \cong 548$ MPa, $\nu_{xy} = 0,33$ e $G_{xy} = 1,25 \times 1083 / 10 \cong 135$ MPa, nas peças laterais.

Para uma força aplicada equivalente de 500 kN, cujo valor é próximo da resistência das ligações coladas com $bc = hc = 120$ mm, os deslocamentos verticais máximos para os modelos ortotrópicos 1 e 2 foram, respectivamente, 0,442 mm e 0,668 mm. As rigidezes correspondentes foram de 113122 N/mm e 74850 N/mm. Na FIG. 4.80, apresentam-se às distribuições de tensões na linha adesiva.



(a)

(b)



(c)

FIGURA 4.80 – Tensões na Linha Adesiva, LCN, $t_c = 24$ mm: a) σ_y ; b) τ_{xy} ; c) σ_x

Na Figura 4.81, apresentam-se os mapas de tensões nos elementos, obtidos nas avaliações numéricas com o modelo ortotrópico 2.

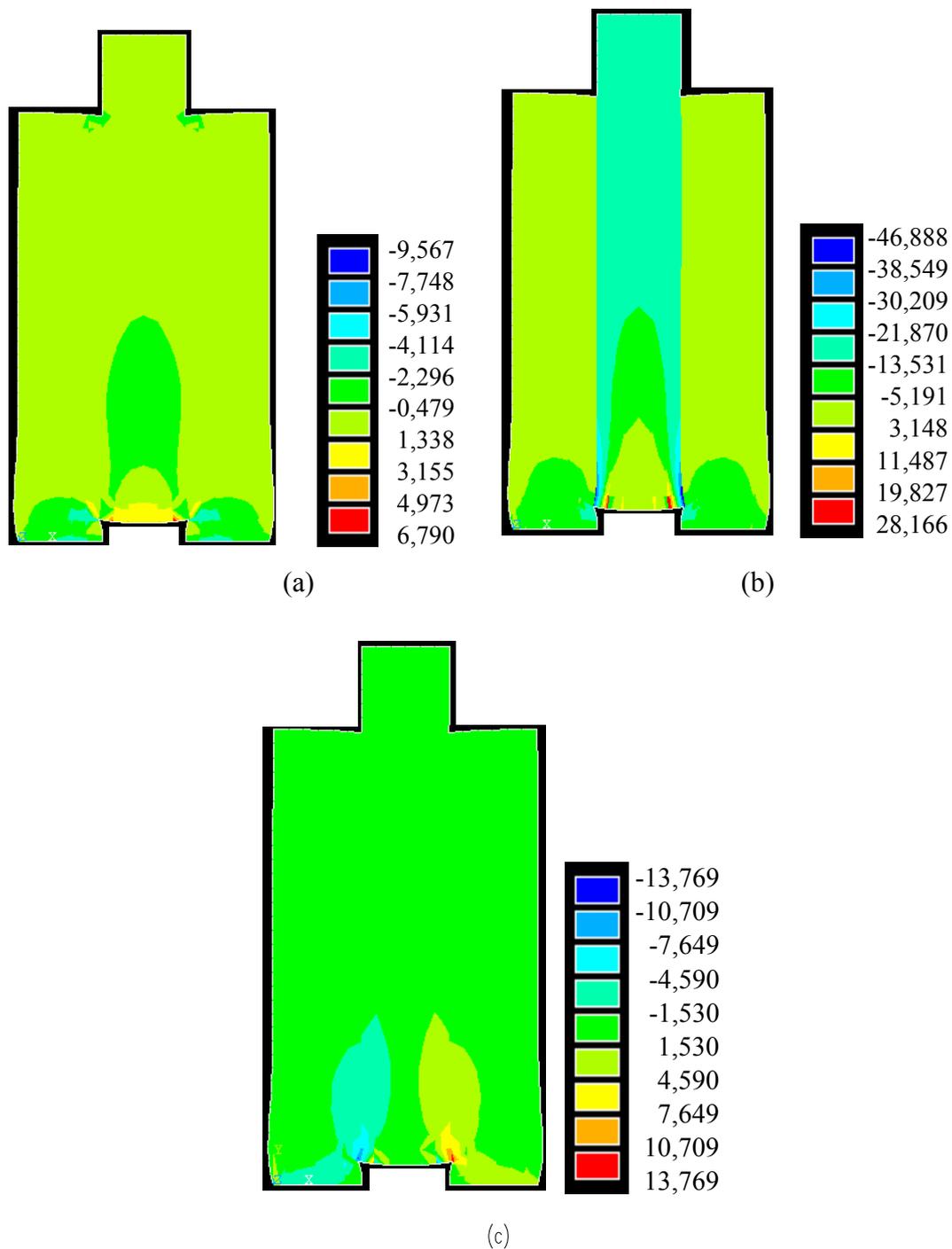


FIGURA 4.81 - Mapa das Tensões (MPa), LCN, $t_c = 24$ mm, $b_c = h_c = 120$ mm: a) σ_x ; b) σ_y ; c) τ_{xy}

4.10 Resultados da Análise Experimental com Extensômetros Elétricos

4.10.1 Introdução

Apresentam-se neste item os resultados das avaliações das constantes elásticas da madeira e do comportamento de ligações coladas paralelas, obtidos em ensaios com o uso de extensômetros elétricos. Para determinação das constantes elásticas da madeira foram realizados ensaios em corpos-de-prova prismáticos, descritos no item 3.7, submetidos à compressão paralela e inclinada em relação às direções principais da madeira. Nos ensaios de ligações coladas, foram avaliadas tensões em pontos da linha adesiva nas faces laterais em três corpos-de-prova com dimensões nominais de $b_c = h_c = 120$ mm, como descrito no item 3.7. O corpo-de-prova com $t_c = 30$ mm pode ser considerado maciço e portanto com uma falsa ou pseudolinha adesiva.

4.10.2 Constantes Elásticas da Madeira

Nas TAB. 4.43, apresentam-se os resultados médios obtidos para os coeficientes de Poisson (ν_{LN} e ν_{NL}) e para as relações E_L/E_N nos ensaios de três corpos-de-prova submetidos à compressão nas direções principais da madeira.

TABELA 4.43 - Valores Médios de Constantes Elásticas da Madeira Obtidos nos Ensaios de Compressão nas Direções dos Eixos Principais da Madeira

Corpo-de-prova	ν_{LN}	ν_{NL}	Relação E_L/E_N
CP1	0,358	0,0434	17,1
CP2	0,422	0,0442	26,1
CP3	0,447	0,0420	21,8
Média	0,409	0,0432	21,7

Os valores médios obtidos para ν_{LN} e ν_{NL} foram próximos aos valores sugeridos por BODIG e JAYNE (1982), TAB. 2.7. Foram obtidos $E_L = 21462$ MPa, $E_N = 1011$ MPa e $E_L/E_N = 21,7$. Estes valores de E_L e E_N foram superiores aos obtidos nos ensaios de caracterização do lote de madeira de menor densidade. A relação E_L/E_N foi próxima aos

valores propostos por BODIG e JAYNE (1982), Eq. (2.48a), sendo significativamente menor que a obtida nos ensaios de caracterização do lote de madeira, $E_L/E_N = 34,62$. Esta diferença pode ser creditada a grande variabilidade da madeira e pelo fato de os corpos-de-prova utilizados na extensometria terem densidade aparente entre 700 e 750 kg/m^3 , enquanto o lote de madeira apresentava variações de 550 a 750 kg/m^3 .

Na FIG. 4.82, apresentam-se os gráficos de carregamento da tensão média de compressão x tempo, do corpo-de-prova 1. Nas FIG. 4.83 e 4.84, apresentam-se os gráficos tensão x deformação e deformação longitudinal x deformação transversal obtidos em ensaios.

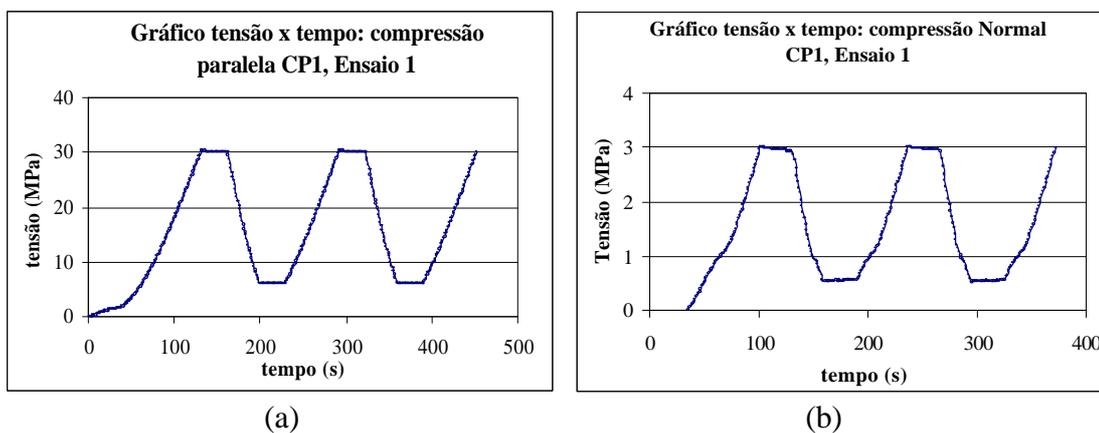


FIGURA 4.82 - Gráficos Força x Tempo de Ensaios: a) Paralelo; b) Normal

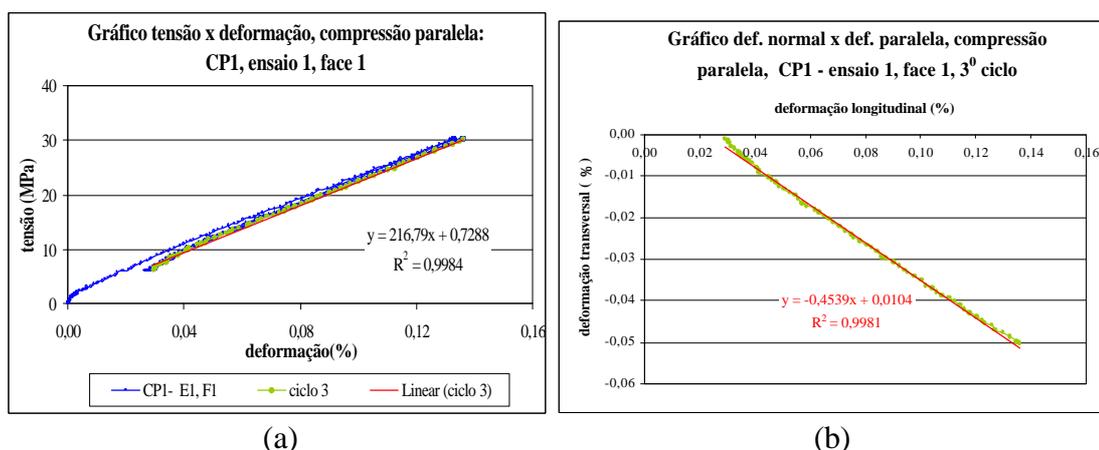


FIGURA 4.83 – Gráficos Obtidos em Ensaio de Compressão Paralela: a) Tensão x Deformação longitudinal; b) Deformação Longitudinal x Deformação Transversal

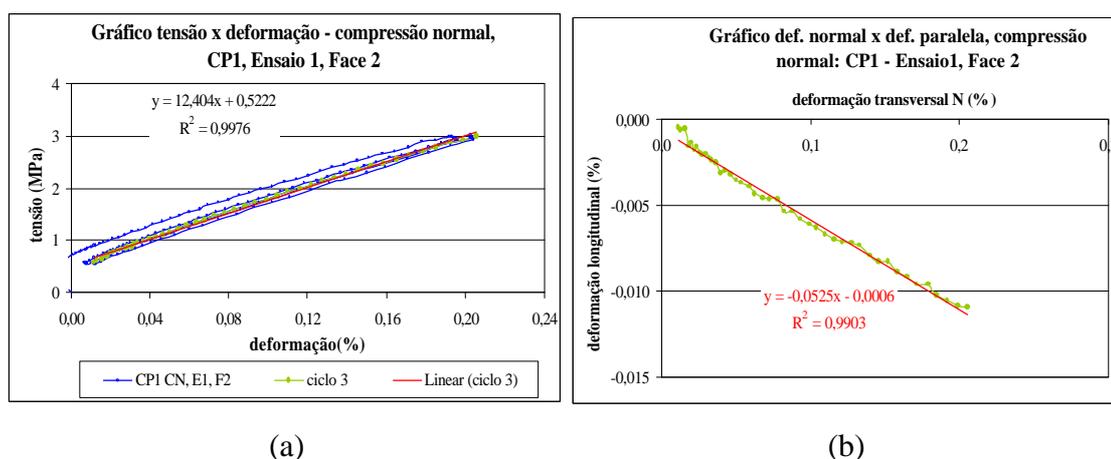


FIGURA 4.84 – Gráficos Obtidos em Ensaio de Compressão Normal: a) Tensão x Deformação; b) Deformação Longitudinal x Deformação Transversal

Na TAB. 4.44, apresentam-se os resultados médios das avaliações experimentais do módulo G_{LN} , obtidos em ensaios de compressão inclinada em relação às fibras de 2 corpos-de-prova como descrito no item 3.7.

TABELA 4.44 – Valores de G_{LN} Obtidos nos Ensaios de Compressão Inclinada

Corpo-de-prova	G_{LN} (MPa)	Corpo-de-prova	G_{LN} (MPa)	Média
1	1031	2	960	995
1M	902	2M	1029	965
1N	959	2N	1154	1056
Média	964	Média	1048	1006

Os corpos-de-prova 1N, 2N e 1M, 2M correspondem aos corpos-de-prova 1 e 2 ensaiados, respectivamente, com as direções invertidas e com a seção transversal reduzida. A densidade aparente média dos corpos-de-prova foi de 690 kg/m^3 . O valor médio obtido para $G_{LN} = 1006 \text{ MPa}$, corresponde a uma relação $E_L/G_{LN} = 15167/1006 = 15,07$.

Na FIG. 4.85, apresenta-se o gráfico de carregamento força x tempo e os gráficos de tensão vertical aplicada (em módulo) x deformação nas direções x e y, obtidos no trecho final de carregamento do ensaio 1 do corpo-de-prova CP1.

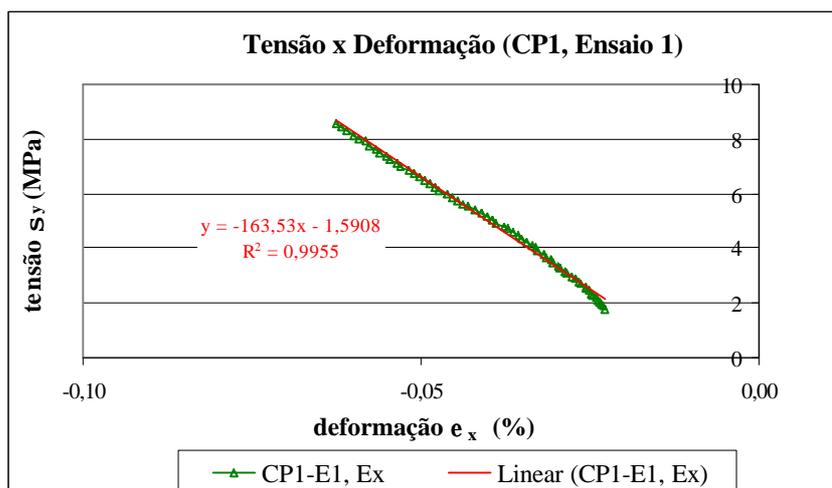
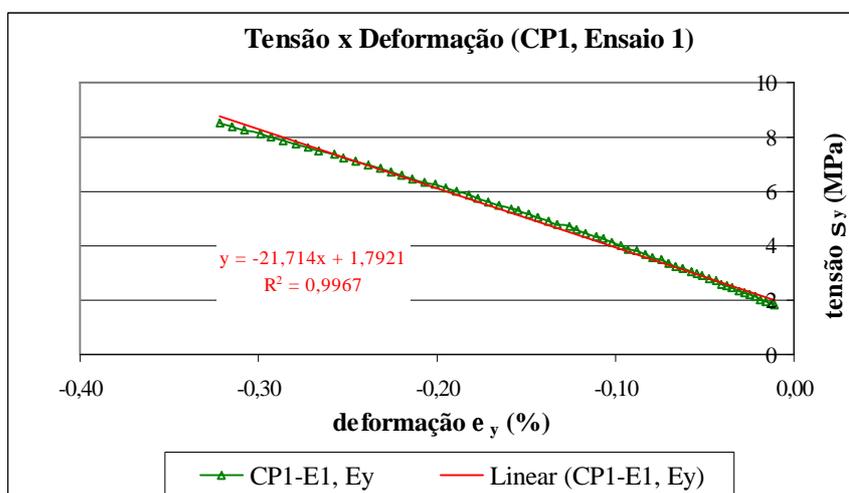
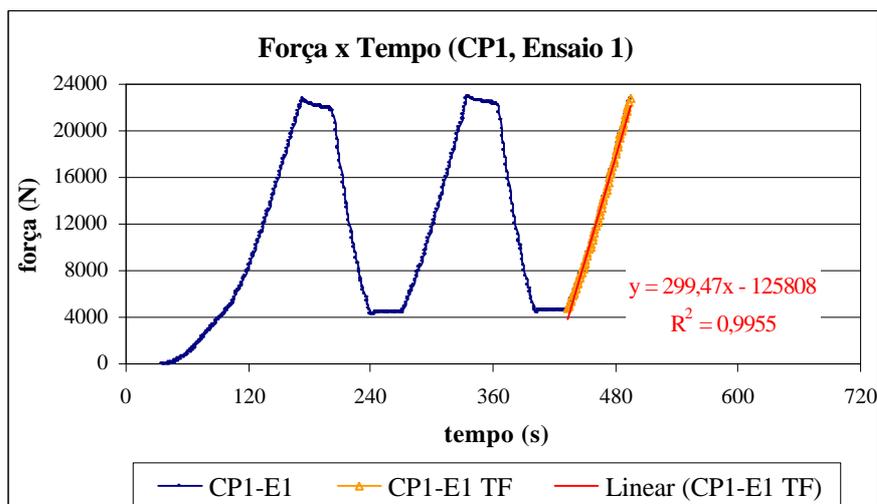


FIGURA 4.85 – Gráficos do Ensaio de Compressão Inclinada, CP1:

a) Força x Tempo; b) σ_y x ϵ_y ; b) σ_y x ϵ_x ;

4.10.3 Ligações Coladas Paralelas

Nos ensaios de ligações com uso de extensômetros elétricos na linha adesiva, realizado com objetivo de avaliar a distribuição de tensões nesta superfície, foi utilizado um carregamento com três ciclos de carga, com o representado na FIG. 4.86, obtido do ensaio do corpo-de-prova com espessura da peça central igual a 48 mm.

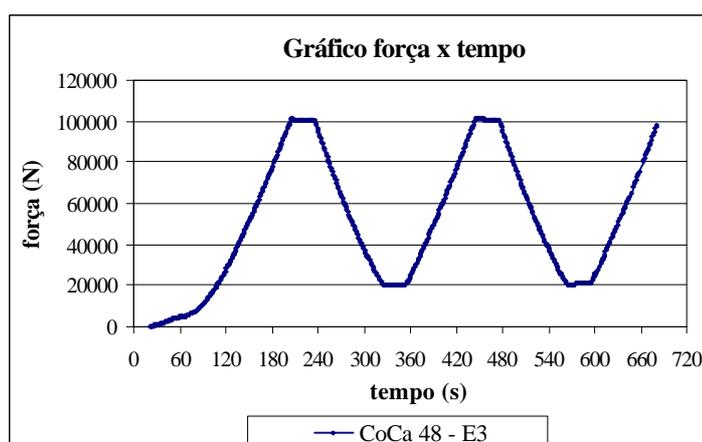


FIGURA 4.86 – Gráfico Força x Tempo, do Ensaio 3 da Ligação com $t_c = 48$ mm

Na TAB. 4.45 apresentam-se as rigidezes obtidas com as análises numéricas, as médias obtidas nos ensaios de rigidez e as obtidas nos três ensaios específicos com emprego de extensômetros elétricos. Nota-se a reduzida diferença das deformações no corpo-de-prova maciço em relação aos de ligação coladas, comprovando a grande rigidez e baixa energia de deformação do adesivo utilizado.

TABELA 4.45 – Rigidezes (N/mm) de LCP Obtidas em Análises Numéricas e em Ensaio Experimentais

tc (mm)	MEF	Experimentais		
		S_{lig} (TI, 10%-50%)	S_{lig} (TI, 20%-50%)	Específicos
24	383538	296917	319846	330901
30	408163	355596	381367	365470 *
48	440839	387831	426046	445683

(*) Resultado obtido com corpo-de-prova maciço de MLC, com geometria simulando o corpo-de-prova de ligação $t_c/bc/hc = 30/120/120$.

Na FIG. 4.87, apresenta-se o gráfico força x deformação nos extensômetros da roseta tri-axial T2, relativo ao primeiro ensaio do corpo-de-prova colado e cavilhado com espessura da peça central igual a 48 mm.

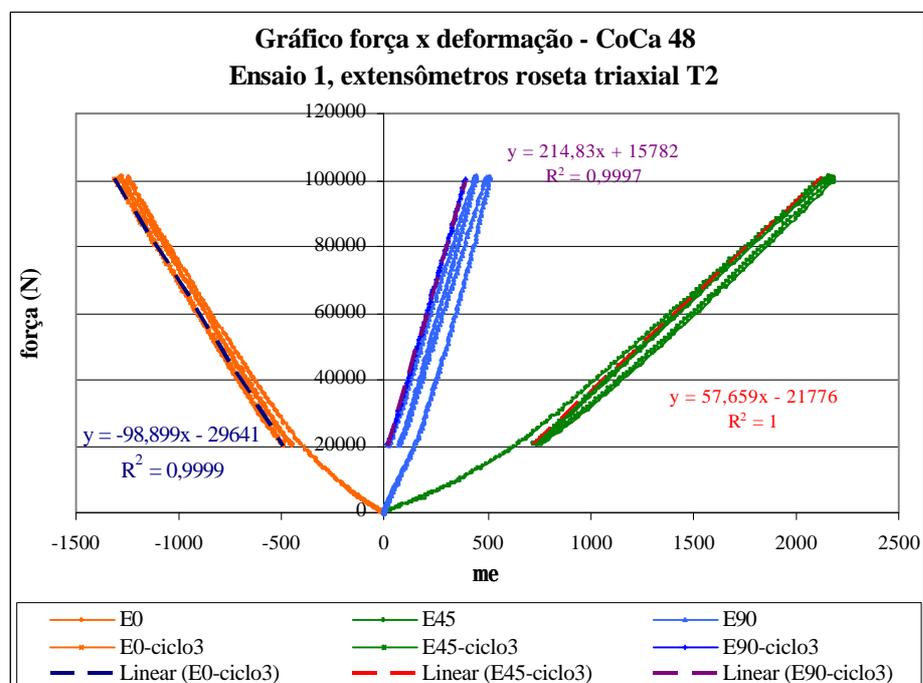


FIGURA 4.87 – Gráfico Força x Deformação nos Extensômetros, Ensaio 1 do Corpo-de-Prova Paralelo Colado Cavilhado, $t_c = 48$ mm, Roseta Tri-Axial T2

Na TAB. 4.46, apresentam-se as deformações nos extensômetros elétricos, correspondentes a uma força aplicada de 100 kN, para este mesmo corpo-de-prova.

TABELA 4.46 – Deformações (%) Obtidas nos Extensômetros em Ensaio de Ligação Colada e Cavilhada, com $t_c = 48$ mm e Força de 100 kN

Roseta / ext.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
E45	-0,199	0,173	-0,151	-0,230	0,194	-0,242
E0	-0,083	-0,101	-0,055	-0,079	-0,085	-0,081
E90	0,048	0,046	-0,039	0,058	-0,098	0,106

Nas FIG. 4.88, apresentam-se gráficos força x variação da deformação nos extensômetros elétricos, para o terceiro carregamento da terceira repetição do ensaio do corpo-de-prova com espessura da peça central $t_c = 48$ mm.

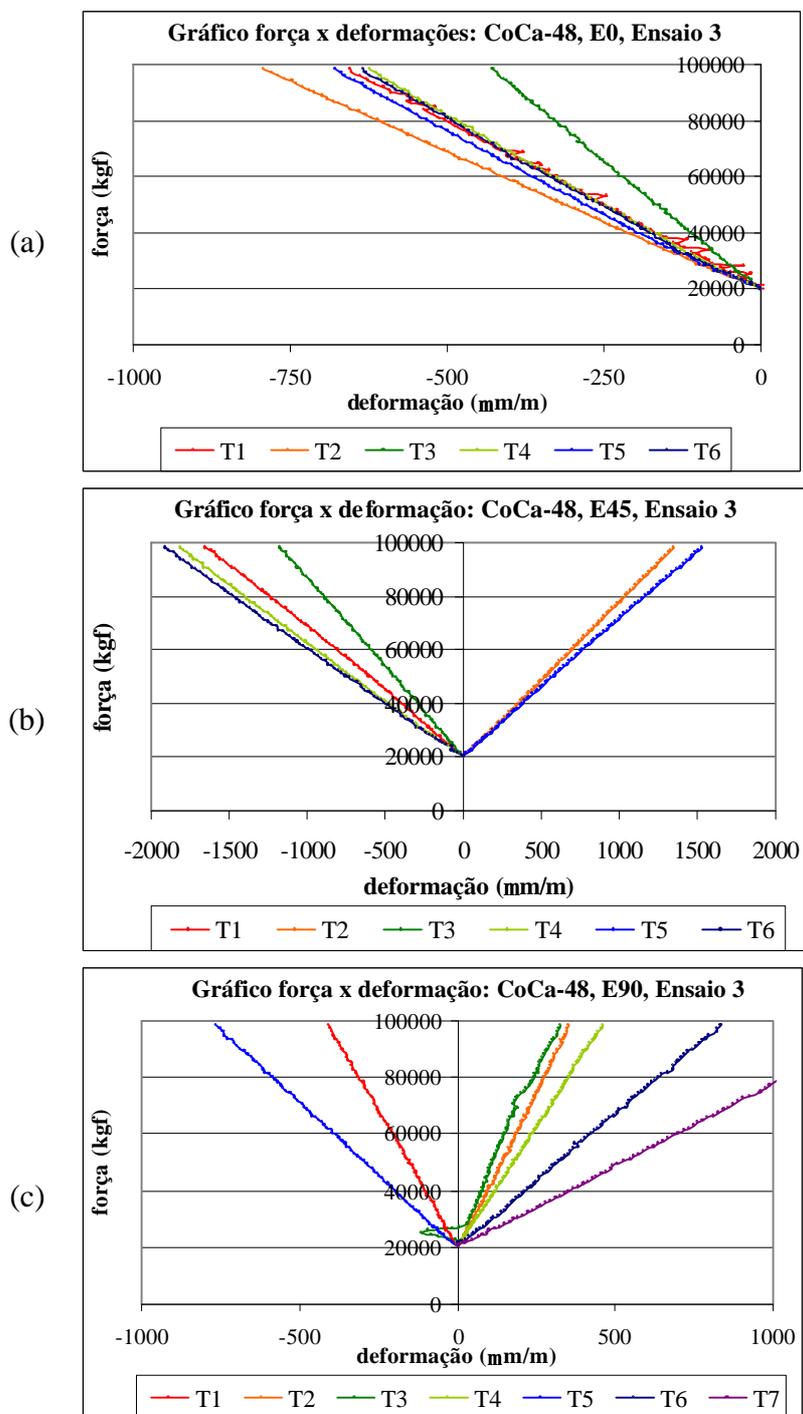


FIGURA 4.88 - Gráficos Força x Variação de Deformações nos Extensômetros, LCP, CoCa, $t_c = 48$ mm: a) E0; b) E45⁰; c) E90⁰

Nas FIG. 4.89 a 4.91, apresentam-se os gráficos de variação das tensões ao longo da linha adesiva ($t_c = 24 \text{ mm}$ e $t_c = 48 \text{ mm}$) e pseudo linha adesiva ($t_c = 30 \text{ mm}$), com as curvas obtidas pelo MEF e os valores pontuais obtidos da extensômetria, considerando-se o modelo ortotrópico 2 com $G_{LN} = 1006 \text{ MPa}$.

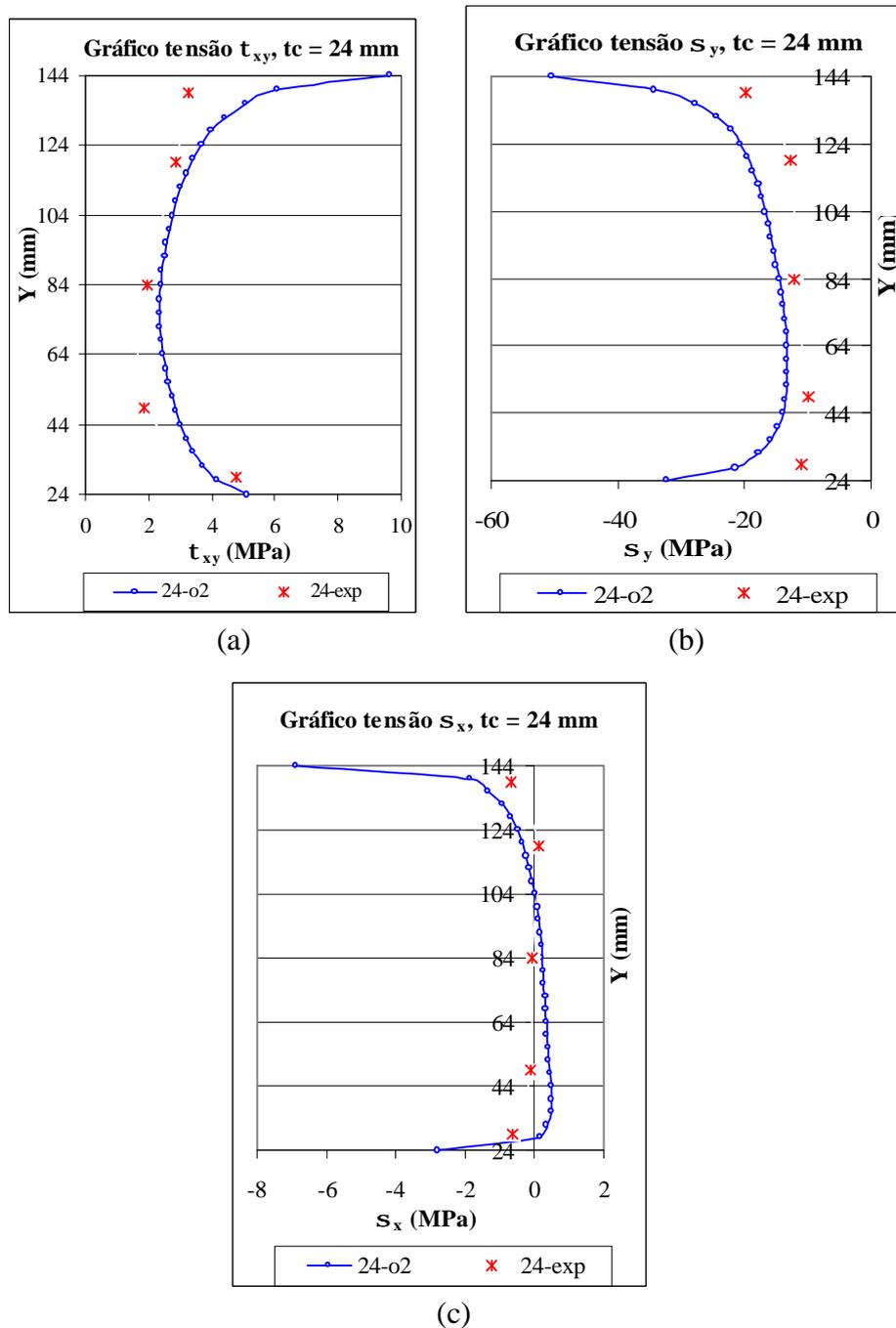


FIGURA 4.89 – Tensões (MPa) na Linha Adesiva, $t_c = 24 \text{ mm}$, MEF-o2 e Experimental

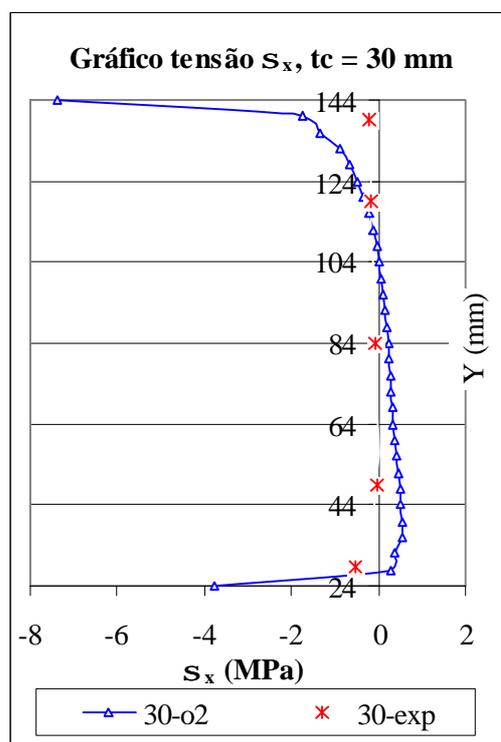
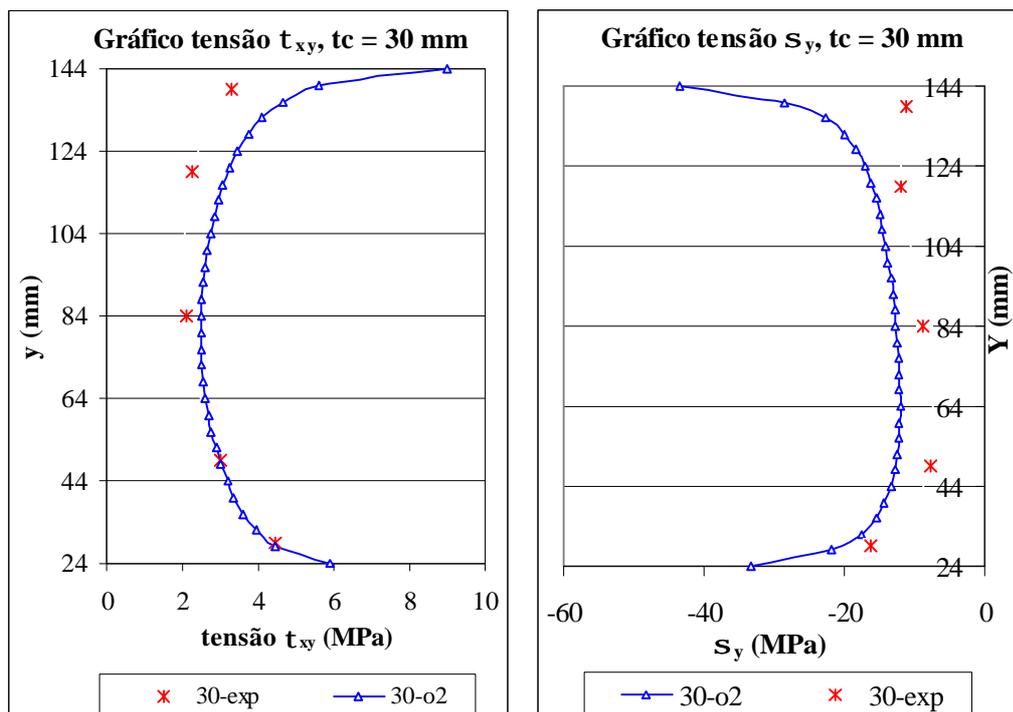


FIGURA 4.90 – Tensões (MPa) na Pseudolinha Adesiva, $t_c = 30$ mm, MEF-o2 e Experimental

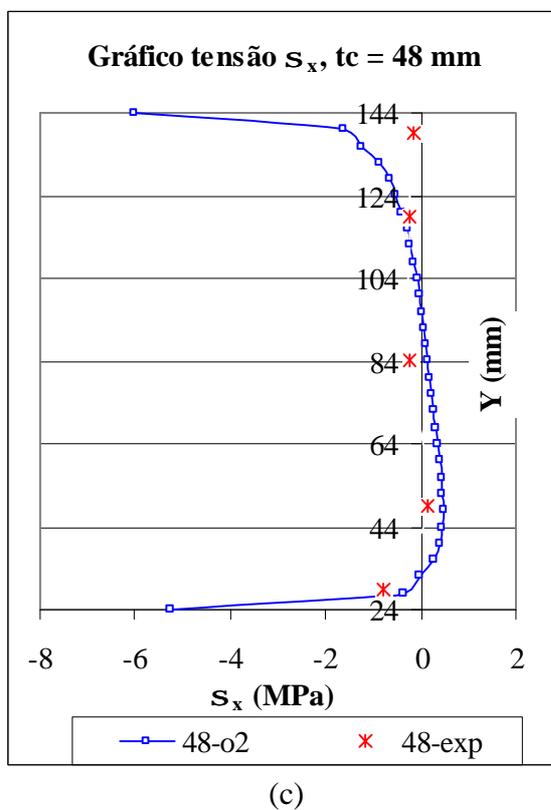
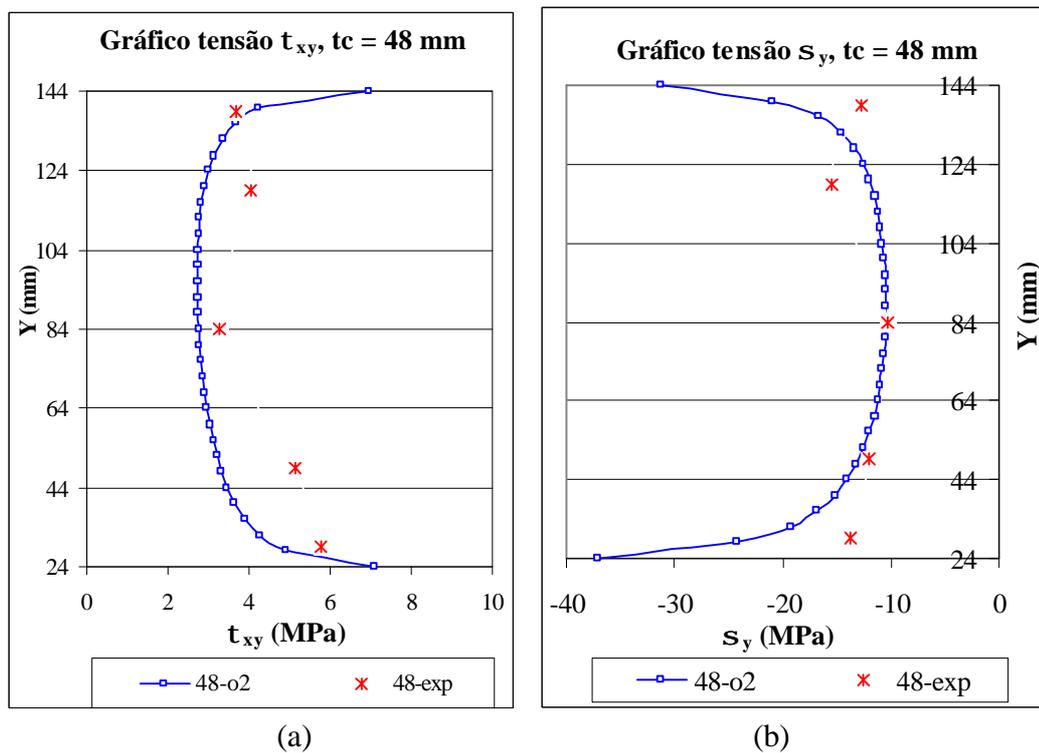


FIGURA 4.91 – Tensões (MPa) na Linha Adesiva, $t_c = 48$ mm, MEF-o2 e Experimental

4.11 Avaliação Analítica da Resistência e da Distribuição de Tensões na Superfície Adesiva de Ligações

4.11.1 Considerações Iniciais

Apresenta-se neste item a aplicação da formulação analítica desenvolvida no item 3.8 para ligações coladas submetidas à compressão. Inicialmente, apresenta-se uma avaliação da resistência de ligações paralelas, com madeira BD e espessura $t_c = 48$ mm. A seguir apresenta-se uma avaliação comparativa da distribuição de tensões para o corpo-de-prova de ligação colada com dimensões $t_c = 48$ mm e $b_c = h_c = 120$ mm. Por fim, apresenta-se uma avaliação analítica da resistência e distribuição de tensões de ligações coladas normais.

Uma limitação importante da formulação analítica apresentada refere-se ao fato de a mesma considerar a ocorrência uma fratura frágil na lâmina adesiva e um comportamento elástico linear para os materiais. No caso de ligações de peças de madeira solicitadas paralelamente às fibras, estas exigências podem ser consideradas atendidas, embora as superfícies de ruptura possam ocorrer na madeira. Nas ligações coladas com peças de madeira solicitadas por esforços com grandes inclinações em relação às fibras, como no caso de ligações normais, estas exigências não são atendidas, sendo necessária uma interpretação cuidadosa dos resultados, tendo em vista esta limitação.

Os resultados experimentais comprovaram que nas ligações coladas paralelas, sob forças centradas, quando as rupturas são provocadas pelo cisalhamento, ocorre um comportamento linear até a ruptura, que se dá de forma frágil. Nas ligações normais, o comportamento é mais complexo, sofrendo as influências do comportamento da madeira solicitada por compressão normal e dos elementos mecânicos adicionais, ocorrendo, essencialmente, forte não-linearidade para solicitações mais elevadas e rupturas nas madeiras solicitadas normalmente às fibras, variando de frágeis a muito dúcteis. Além disso, as resistências foram obtidas por um valor convencional correspondente à deformação plástica de 0,2%.

Na formulação analítica desenvolvida, três valores fundamentais devem ser definidos de início, referentes, respectivamente, à tensão de cisalhamento de ruptura ou de início da fratura τ_f , ao valor da energia de fratura G_f e ao fator β .

Com base na Eq. 3.21, observa-se que a tensão de cisalhamento de ruptura se aproxima da tensão média correspondente, para valores reduzidos do comprimento L da lâmina adesiva. Conseqüentemente, é de se esperar que o valor real de τ_f seja superior ao maior valor de $\tau_{méd}$ obtido nos ensaios, incluindo os valores obtidos nos ensaios de caracterização da resistência ao cisalhamento na lâmina adesiva, realizados em pequenos corpos-de-prova. No entanto, o valor de τ_f pode ser obtido a partir da definição do valor de G_f , de forma que a curva da força resistida estimada pela expressão analítica melhor se aproxime dos resultados experimentais. O valor do fator β deve ser definido caso a caso, sendo, a princípio, irrelevante para a estimativa da resistência da ligação e importante apenas para a estimativa da distribuição de tensões cisalhantes na lâmina adesiva.

4.11.2 Ligações Paralelas

Utilizando para G_f o valor de 800 J/m^2 e $\beta = 1$, obteve-se τ_f igual a $11,0 \text{ MPa}$, pela minimização do erro médio entre os valores da força P_f , estimados pela avaliação analítica e os correspondentes valores obtidos experimentalmente. No entanto, com emprego de τ_f igual a $9,5 \text{ MPa}$ e majoração de 50% no produto $G_f.E$, obtidos por inspeção, a avaliação analítica modificada conduziu a uma melhor aproximação aos valores experimentais.

Na TAB 4.47, são relacionados os valores das forças de ruptura experimentais médios e das avaliações analíticas e peça central com $t_c = t_2 = 48 \text{ mm}$. Na FIG. 4.92, apresentam-se os gráficos das forças de ruptura obtidas, por unidade de largura, em função do comprimento da ligação. Foram utilizados na avaliação analítica os seguintes parâmetros: $\beta = 1$; $\tau_f = 11,0 \text{ MPa}$; $G_f = 800 \text{ J/m}^2$; $E = 15167 \text{ MPa}$; $t_2 = 48 \text{ mm}$ e $t_1 = 24 \text{ mm}$. Na avaliação analítica modificada, foi utilizado $\tau_f = 9,5 \text{ MPa}$ e majoração de 50% no produto $G_f.E$.

TABELA 4.47 – Valores Experimentais Médios e Analíticos da Força de Ruptura de LCP, Madeira BD, $t_c = 48$ mm

Dim. b x L (mm)	Resultados experimentais		Solução analítica			Solução analítica modificada		
	Fu	Fu/2b	P _f	P _f /2b	Erro	P _f	P _f /2b	Erro
	(N)	(N/mm)	(N)	(N/mm)	(%)	(N)	(N/mm)	(%)
72 x 72	96800	672	97197	675	0,44	90554	629	6,42
96 x 96	131000	682	155910	812	19,07	151755	790	15,89
72 x 108	119500	830	124451	864	4,13	123822	860	3,60
120 x 120	225600	940	217724	907	3,49	221279	922	1,92
96 x 144	194300	1012	186318	970	5,42	196911	1026	0,04
144 x 144	299400	1040	279476	970	6,69	295367	1026	1,39
120 x 180	276600	1153	246144	1026	11,05	272852	1137	1,40
144 x 216	332900	1156	303312	1053	8,90	348017	1208	4,53
Média					7,40			4,40

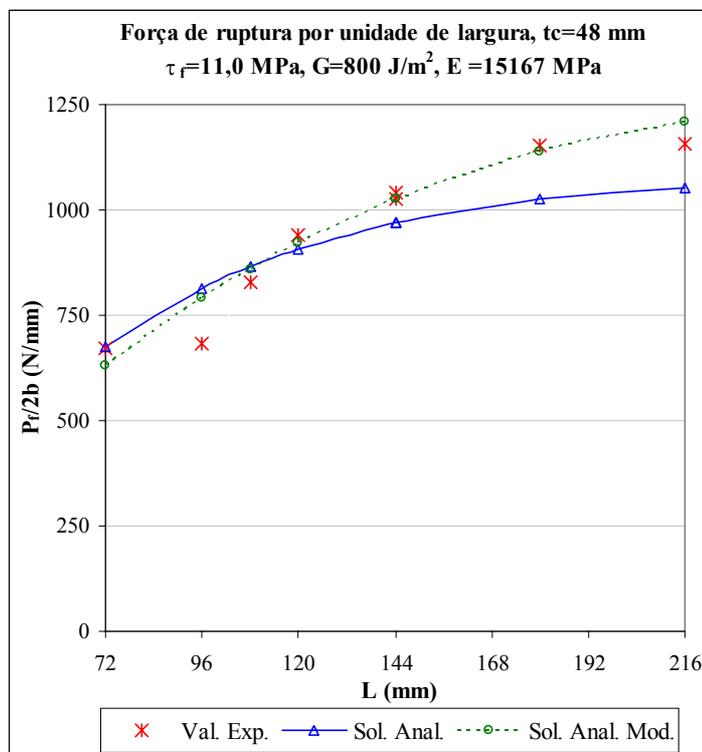


FIGURA 4.92 – Avaliações Analíticas e Experimentais da Força de Ruptura por Unidade de Largura x Comprimento da Linha Adesiva, LCP, $t_c = 48$ mm, Madeira BD

Na FIG. 4.93a, são representadas as distribuições de tensões cisalhantes na lâmina adesiva, obtidas por meio das avaliações analíticas com $\beta = 1$ e $\beta = 0,81$, para $t_c = 48$ mm, $t_1 = 24$ mm e $L = 120$ mm, força de ruptura de 217,7 kN. O valor $\beta = 0,81$, foi obtido com o MEF e o modelo ortotrópico 2, pela relação entre as tensões σ_y no início e no fim da lâmina adesiva, respectivamente de -31,45 MPa e -38,92 MPa. Na avaliação com $\beta = 0,81$, manteve-se o valor de $\tau_f = 11,0$ MPa.

Na FIG. 4.93b, apresentam-se as distribuições de tensões cisalhantes obtidas com a avaliação analítica, com o MEF - modelo ortotrópico 2 e com os extensômetros elétricos, para uma força aplicada de 100 kN. As tensões da avaliação analítica foram definidas a partir dos correspondentes valores obtidos com a força de ruptura de 217,7 kN, pela multiplicação pelo fator $100/217,7$.

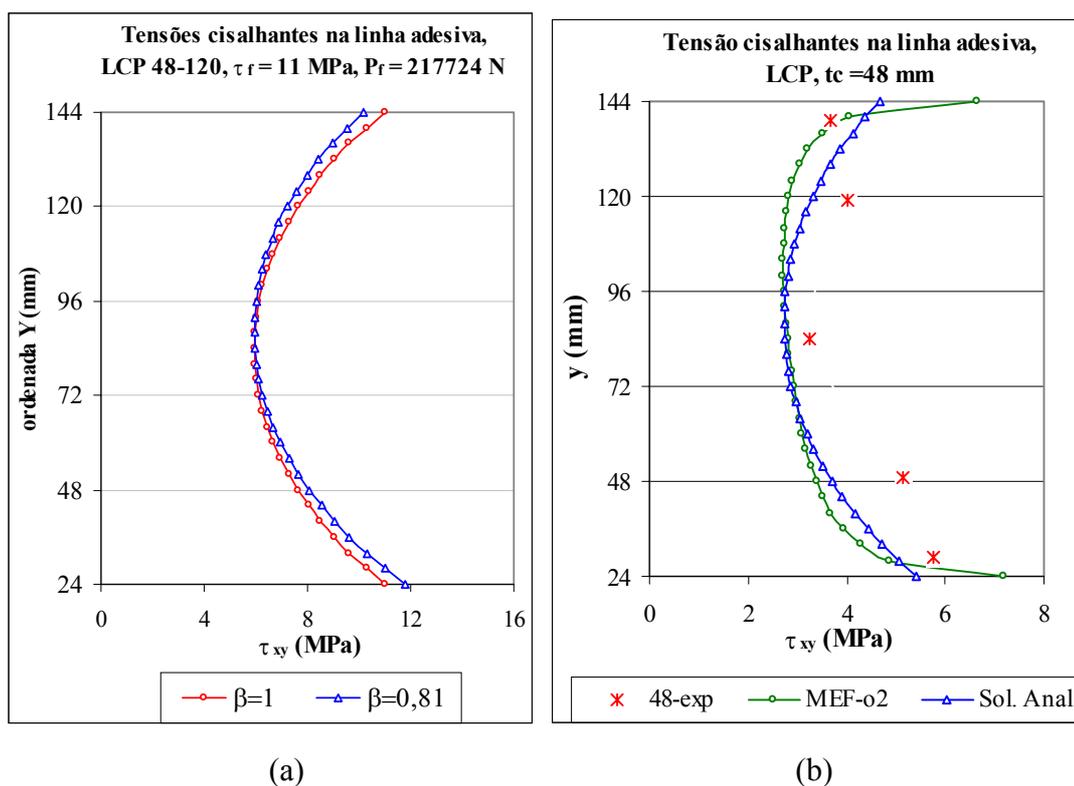


FIGURA 4.93 – Avaliações Analíticas, Numéricas e Experimentais das Tensões Cisalhantes na Linha Adesiva, LCP, $t_c = 48$ mm: a) $P_f = 217,7$ kN; b) $P = 100$ kN

A utilização de um fator $\beta \neq 1$, mantendo-se o valor de τ_f inalterado, produz a perda de simetria em relação à ordenada média $x = L/2$, com aumento ou diminuição do valor das tensões cisalhamento nas extremidades da lâmina de cola, sem alterar o valor da força de ruptura. Neste caso, τ_f deve ser entendido como um valor de referência e a força de ruptura da ligação colada, estimada com $\beta \neq 1$, fica modificada em relação a obtido com $\beta = 1$, apenas ao se definir um novo valor para τ_f de referência ou ao se definir um valor específico para τ_f em uma das extremidades da linha de cola.

4.11.3 Ligações Normais

Na TAB. 4.48, apresentam-se as resistências das ligações coladas normais de corpos-de-prova com madeira de menor densidade, obtidas nos ensaios ($F_{0,2\%}$) e por avaliações analíticas. Devido ao reduzido valor do módulo de elasticidade normal às fibras da madeira, o fator ω e a resistência estimada pela avaliação analítica praticamente não se alteram com a variação da espessura da peça central $t_2 = t_c$, em concordância com a análise estatística dos resultados experimentais. Com a utilização $E_1 = E_N = 438$ MPa e de $t_c = 34$ mm, correspondendo ao valor médio das diferentes espessuras de peça central, obteve-se para $\tau_f = 7,80$ MPa o menor erro médio das avaliações analíticas das resistências em relação aos valores experimentais.

TABELA 4.48 – Valores Experimentais Médios da Resistência e Analíticos da Força de Ruptura para LCN, Madeira BD

Dimensões (mm)	Analítica (N)	Erro (*) (%)	Resultados experimentais médios (N)			
			Geral	CoCa	Co/CoCaPa	CoPa
72 x 72	35739	0,02	35731	34058	33374	39762
96 x 96	48546	10,23	53511	49604	57149	53780
120 x 120	60942	3,51	58800	56878	61301	58330
144 x 144	73202	1,38	74213	76440	73679	72522

(*) Erro em relação aos resultados experimentais médios gerais.

Na FIG. 4.94, apresenta-se o gráfico das avaliações analíticas das forças de ruptura por unidade de largura e os correspondentes valores obtidos das resistências médias experimentais ($F_{0,2\%}$).

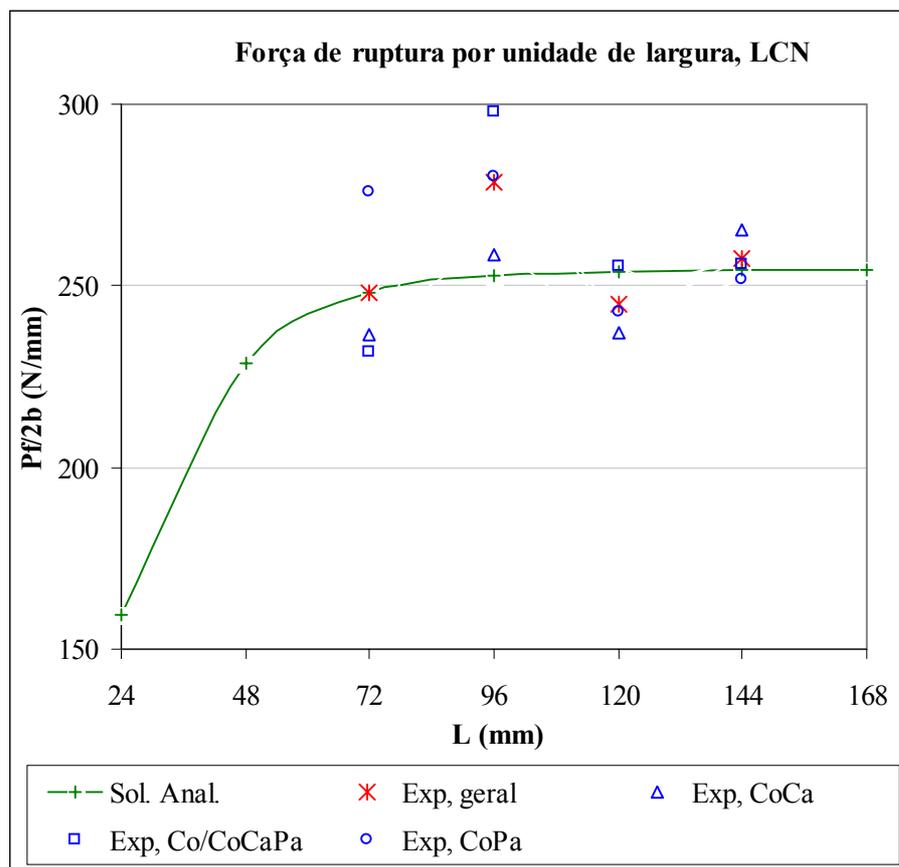


FIGURA 4.94 - Avaliações Experimentais e Analítica da Força de Ruptura ou Resistência por Unidade de Largura x Comprimento da Linha Adesiva, LCN

Na FIG. 4.95, apresentam-se as avaliações analíticas da distribuição de tensões cisalhantes na linha de cola para $\beta = 1$ e $\beta = 0,036$, para a ligação colada normal, com $b_c = h_c (L) = 120$ mm, força de ruptura $P_f = 60942$ N e $t_2 = t_c = 34$ mm. O valor $\beta = 0,036$ representa a relação entre as deformações normais médias no início e fim da lâmina adesiva, obtidas, respectivamente, na peça central ($\epsilon_y = -0,0013765$) e nas peças laterais ($\epsilon_y = -0,038512$), na análise numérica pelo MEF, em modelagem bidimensional elástica linear, com $t_c = 24$ mm e modelo ortotrópico 2.

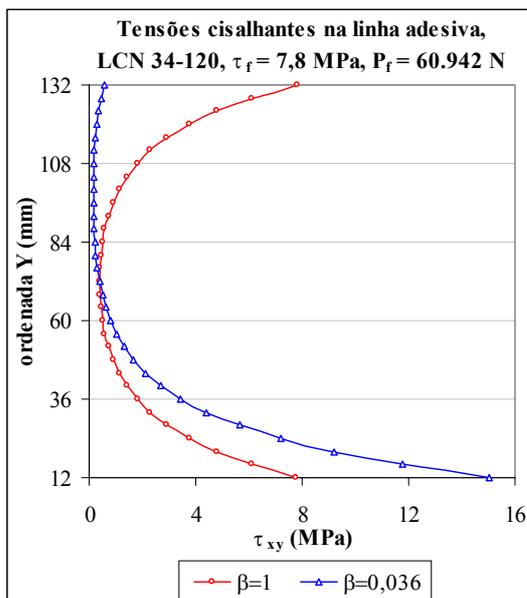


FIGURA 4.95 – Avaliações Analíticas das Tensões Cisalhantes na Linha Adesiva, LCN, com $\tau_f = 7,80$ MPa, $t_c = 34$ mm, para $\beta = 1$ e $\beta = 0,036$

Na FIG. 4.96, apresenta-se o gráfico das distribuições de tensões cisalhantes para o corpo-de-prova com $t_c = 24$ mm, obtidas pelo MEF (modelo ortotrópico 2) e por meio da avaliação analítica ($\tau_f = 7,80$ MPa, $P_f = 60.455$ N, $\beta = -0,036$) com emprego do fator de multiplicação 60455/50000.

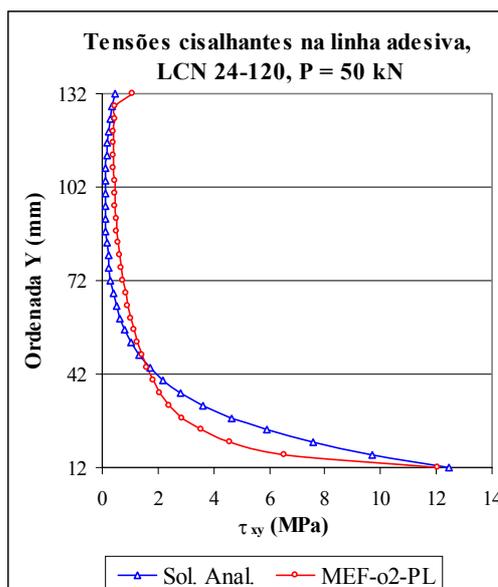


FIGURA 4.96 – Avaliação Numérica (MEF-o2, $t_c = 24$ mm) e Analítica ($t_c = 34$ mm, $\tau_f = 7,8$ MPa, $\beta = 0,036$) das Tensões Cisalhantes na Linha Adesiva, LCN, P = 50 kN

Embora ocorra uma boa concordância entre os valores máximos da tensão cisalhante na superfície adesiva, obtidos com a avaliação analítica e com a análise numérica, nota-se que esta última apresenta um maior gradiente na distribuição de tensões no final da linha adesiva e a solução analítica apresenta valores muito reduzidos das tensões na parte superior da linha adesiva.

O emprego de um valor menor para τ_f reduz o efeito de concentração de tensões na parte inferior da ligação. Assim, com a utilização de τ_f com o valor de 5,0 MPa, definido pela majoração de $\approx 20\%$ da resistência média ao cisalhamento normal obtido nos ensaios de caracterização da madeira, obtém-se com a avaliação analítica uma força de ruptura P_f de 59497 N, para a ligação com $t_c = 24$ mm e $b_c = h_c = 120$ mm. Na FIG. 4.97, apresenta-se a correspondente distribuição de tensões cisalhantes, obtida para $P = 50$ kN.

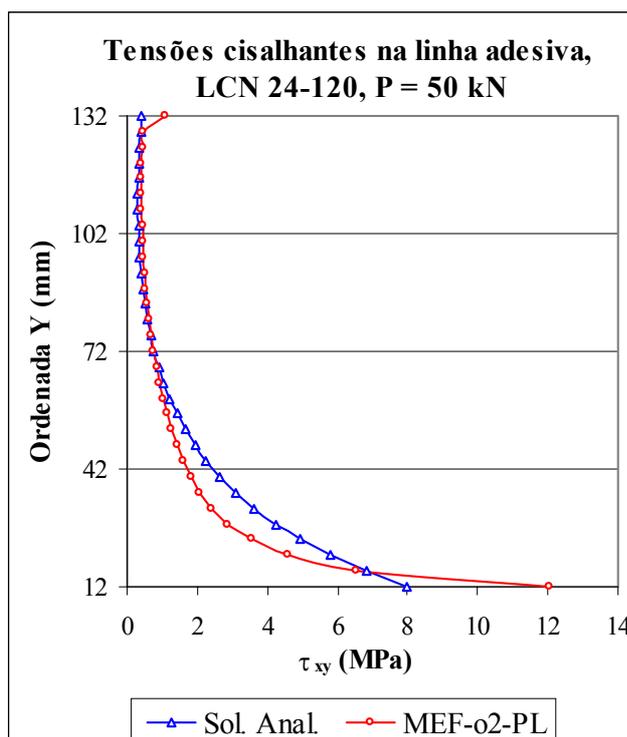


FIGURA 4.97 – Avaliação Numérica (MEF-o2, $t_c = 24$ mm) e Analítica ($t_c = 34$ mm, $\tau_f = 5$ MPa, $\beta = 0,036$) das Tensões Cisalhantes na Linha Adesiva, LCN, $P = 50$ kN

5

CONCLUSÕES

5.1 Gerais

Ao longo do trabalho desenvolvido foram confeccionados e ensaiados 548 corpos-de-prova de ligações coladas associadas com elementos mecânicos, sendo 352 paralelos e 196 normais. Na confecção destes corpos-de-prova, o processo de execução mostrou-se eficiente, de fácil sistematização e de custo relativamente baixo. Adicionalmente, foram confeccionados e ensaiados 62 corpos-de-prova de ligações com emprego unicamente de elementos mecânicos de pinos, sendo 34 paralelos e 28 normais.

Nos ensaios das ligações coladas paralelas, foram obtidas elevadas resistências e rigidezes. As rupturas foram frágeis, com esmagamento da peça central por compressão ou por cisalhamento na madeira e superfície adesiva. Em alguns corpos-de-prova com espessura da peça central de 48 mm, foram identificados inícios de ruptura por tração na parte inferior da peça central.

A resistência das ligações coladas normais foi condicionada pela baixa rigidez e resistência à compressão normal das peças laterais, conseqüentemente, o processo de ruptura foi dúctil, em grande parte dos ensaios. A resistência foi definida pelo valor convencional correspondente à deformação residual de 0,2%.

As estimativas de resistências das ligações por meio das avaliações analíticas obtiveram boa concordância com os resultados experimentais. As avaliações analíticas das distribuições das tensões cisalhantes na linha adesiva apresentaram também boa concordância com os resultados numéricos obtidos com o MEF. Os resultados das avaliações das tensões na linha adesiva com uso de extensômetros elétricos, efetuadas na fase elástica de ligações paralelas, foram próximos aos obtidos nas análises numéricas pelo MEF.

As avaliações anteriores indicam que as ligações coladas utilizadas apresentam bom potencial de uso em estruturas de pequeno a médio porte. No entanto, deve-se alertar que as resistências de ligações coladas em áreas reduzidas são acentuadamente influenciadas pela qualidade da fabricação, exigindo um rigoroso controle em todas as suas fases, em particular na introdução da pressão de colagem. Esta constatação exige que a execução dessas ligações coladas seja restrita a condições de fabricação nas quais seja possível, de início, um aprimoramento do processo de produção, e, a seguir, um controle sistemático e permanente de qualidade.

Em função dos resultados e das conclusões anteriormente descritos, pode-se concluir que a adequação efetiva do emprego das ligações coladas em áreas reduzidas associadas a elementos mecânicos, bem como a definição de uma metodologia de dimensionamento, esta condicionada a dois aspectos fundamentais. O primeiro aspecto está relacionado à tipologia e geometria da estrutura como um todo e de seus membros e ligações componentes em particular. O segundo aspecto diz respeito à garantia de uma resistência mínima para a ligação e, conseqüentemente, à confiabilidade da colagem ou à resistência proporcionada pelos elementos mecânicos adicionais.

A tipologia e geometria que podem ser empregadas no conjunto da estrutura e em seus membros e ligações componentes apresentam uma gama expressiva de alternativas construtivas de difícil generalização, devendo as composições construtivas apresentar redundâncias no sistema estrutural correspondente e as avaliações das solicitações atuantes e as estimativas das resistências correspondentes, serem efetuadas caso a caso. Os estudos apresentados neste trabalho devem ser entendidos como avaliações de formas primárias das ligações possíveis de serem executadas com as peças de madeira coladas lateralmente, associadas a elementos mecânicos de pino, empregando-se peças de madeira de espessuras não elevadas oriundas de florestas plantadas disponíveis no mercado brasileiro.

Em relação à confiabilidade de ligações coladas em áreas reduzidas, uma vez que ainda não é possível avaliar individualmente a capacidade resistente de ligações coladas componentes de uma dada estrutura, por meio de ensaios não-destrutivos, duas alternativas são válidas em relação à metodologia de dimensionamento.

A primeira alternativa consiste em efetuar ensaios, destrutivos e não destrutivos, em amostras adequadas das estruturas fabricadas, que permitam um controle estatístico sistemático e rigoroso da capacidade de carga dessas estruturas.

A segunda alternativa consiste em utilizar as rigidezes das ligações coladas na análise do comportamento estrutural como parâmetro balizador na avaliação da deformada da estrutura e da distribuição de esforços nos membros componentes e utilizar como resistência da ligação, na verificação nos estados limites últimos, apenas a capacidade de carga dos elementos mecânicos. Neste caso, a resistência dos elementos mecânicos da ligação pode ser definida a partir dos valores de força máxima resistida pela ligação, sem restrições severas sobre o nível de deformações. Apesar de conservadora, principalmente no caso de ligações paralelas, esta metodologia tem aplicação simples e permite a redução de custos no controle de qualidade na fabricação das estruturas, em relação à exigida na primeira alternativa. No entanto, a ruptura da ligação colada pode configurar a ocorrência de um estado limite da estrutura, em função dos possíveis rearranjos da distribuição de esforços na estrutura.

5.2 Relativas às Propriedades da Madeira

Nos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas da madeira, as seguintes conclusões merecem destaques:

- Para o lote de madeira utilizado, com variação de densidade aparente entre 550 e 950 kg/m³, comprovou-se a existência de elevada correlação entre a densidade aparente e importantes propriedades de resistência e rigidez.
- Esta elevada correlação e a elevada correlação obtida entre a densidade aparente da madeira, medida em amostras de reduzidas dimensões e nas tábuas de origem, indicam que a medição da densidade das tábuas pode ser utilizada pela indústria como parâmetro para a classificação preliminar de resistência e rigidez estrutural, visando a maior uniformidade dos produtos finais.
- Para maiores inclinações relativas entre as peças coladas, o comportamento resistente ao cisalhamento de juntas coladas de pequenas dimensões foi influenciado pela reduzida resistência e rigidez da madeira sob compressão normal, sendo a resistência ao cisalhamento definida pelo valor correspondente à deformação residual de 0,2%. A resistência ao cisalhamento de juntas coladas com as peças de madeira paralelas foi cerca de 2,5 vezes a resistência com as peças ortogonais.

5.3 Relativas às Ligações Coladas Paralelas

As análises de variância da resistência das ligações coladas paralelas sob força centrada indicaram, com risco de 5%, que ocorreram influências da espessura da peça central e da faixa de densidade da madeira e que não ocorreram diferenças devido ao tipo de elemento mecânico utilizado. Em função destes resultados foi possível efetuar avaliações da resistência para os oito grupos de diferentes dimensões, para madeira de menor densidade, para a de maior densidade e para duas faixas em conjunto.

As resistências médias dos ensaios com madeira de maior densidade foram superiores às obtidas com madeira de menor densidade, com algumas exceções. No entanto, a

eficiência das ligações coladas com madeira de menor densidade foi sistematicamente maior. Esta eficiência foi avaliada pela relação entre a resistência esperada à compressão da madeira da peça central em comparação com a correspondente tensão atuante na ruptura do corpo-de-prova. Estes resultados evidenciam a maior dificuldade de colagem da madeira de maior densidade, particularmente em áreas reduzidas, e a necessidade de maiores comprimentos de lâmina adesiva para se obterem as mesmas relações de resistências obtidas com madeira de menor densidade.

As resistências das ligações coladas paralelas para comprimentos não reduzidos da lâmina adesiva podem ser consideradas elevadas quando comparadas à resistência à compressão paralela da peça central. Para relações $hc/tc \cong 4$ a 5 , a eficiência média obtida aproximou-se de 100%. Assim, as diferenças entre as resistências das ligações coladas, para as diferentes espessuras da peça central, podem ser explicadas, em grande parte, pelo esgotamento da capacidade resistente da peça central de menores espessuras, para comprimentos menores da lâmina adesiva.

As análises numéricas de ligações coladas, efetuadas com diferentes espessuras e força aplicada de mesmo valor, indicam que as tensões máximas na lâmina de cola, de cisalhamento e normal, na direção da força aplicada, ocorrem em seu início, na transição das tensões da peça central carregada para as peças laterais, apresentando valores mais elevados para peças de menor espessura. Este fato indica que as resistências de ligações coladas paralelas com mesmas dimensões bc e hc , com ruptura por efeito predominante de cisalhamento, as resistências de ligações com peças centrais de maiores espessuras devem superar as de ligações com peças centrais de menores espessuras.

Essas regiões de tensões máximas, situadas no início das superfícies adesivas e de transição do fluxo de tensões da peça central para as laterais, podem ser consideradas as regiões críticas das ligações paralelas, onde se tem o início da ruptura da ligação, desde que os elementos mecânicos existentes possam garantir a segurança à tração normal às fibras na parte inferior da peça central, de maior importância nas ligações com peças centrais de maiores espessuras. A validade desta hipótese fica evidenciada quando se

avaliam os resultados experimentais das resistências das ligações de menores comprimentos, principalmente as obtidas com espessura da peça central de 48 mm em relação às demais.

Os resultados das análises numéricas indicaram reduzida influência dos valores alternativos empregados para o módulo de elasticidade normal às fibras, sobre as tensões na linha adesiva, obtendo-se resultados praticamente iguais para o modelo ortotrópico 1 e 2. Indicaram também que as tensões normais à linha de cola, próximas ao início da peça central, são de compressão, no modelo com deslocamentos transversais impedidos, contrariando as previsões de modelos simplificados com base em equilíbrio de forças, do tipo tirantes e bielias. Nessas avaliações numéricas, verificou-se que as tensões normais à linha adesiva, atuante na parte inferior dos corpos-de-prova, passam a ser de tração apenas em ordenadas da ordem de $hc/10$ e se prolongam até cerca de $3hc/5$. Estas tensões podem produzir fraturas extremamente frágeis em ligações sem elementos transversais.

A análise estatística dos resultados das ligações paralelas sob força excêntrica indicou, com risco de 5%, que a resistência convencional, a força máxima resistida e a rigidez foram influenciadas pela espessura da peça central e que não houve influência dos diferentes tipos de ligação nestas variáveis.

Os resultados experimentais das ligações coladas submetidas à força excêntrica, indicaram a ocorrência de uma perda significativa de resistência e acentuada de rigidez. Os resultados médios tiveram perda média da ordem de 25% para a resistência e de 50% para a rigidez. A perda percentual da resistência foi diferenciada em função da espessura da peça central, com maiores perdas ocorrendo para as ligações com menores espessuras.

A constatação, nas avaliações numéricas, de ocorrência de distribuição mais uniforme das tensões nas superfícies adesivas, para maiores espessuras da peça central, pode explicar a menor perda percentual de resistência das ligações submetidas à força

excêntrica, uma vez que o efeito do momento de torção sobre a superfície adesiva tende a acentuar as tensões cisalhantes nas regiões críticas.

As resistências das ligações paralelas com elementos mecânicos foram muito inferiores às das ligações coladas. Os resultados das ligações cavilhadas e parafusadas foram, em média, 2,5 vezes superior às das ligações apenas cavilhadas ou parafusadas e menos de 30% das resistências das ligações coladas. As rigidezes das ligações paralelas com elementos mecânicos foram próximas entre si e inferiores a 10% das rigidezes das ligações coladas. As rigidezes obtidas na correlação com o trecho inicial correspondente a 20%-50% da força máxima foram próximas às obtidas com o MEF. A rigidez do corpo-de-prova maciço foi intermediária entre a média experimental e o valor obtido com o MEF, provando a grande rigidez da ligação com o adesivo utilizado.

As diferenças entre as ligações coladas e com apenas elementos mecânicos evidenciam que, em ligações coladas com elementos mecânicos, não ocorre um trabalho conjunto significativo da ligação adesiva e dos pinos na resistência direta ao cisalhamento. Esta constatação decorre da exigência, por parte dos pinos, de maiores deslocamentos relativos entre as peças ligadas, incompatíveis com a rigidez da ligação colada. Assim, o efeito dos pinos, quando associados às ligações coladas, ocorre essencialmente na direção transversal à lâmina adesiva, produzindo um confinamento lateral ou uma costura transversal das peças de madeira, capaz apenas de aumentar a rigidez do conjunto e contribuir na resistência aos esforços atuantes nesta direção transversal.

As rupturas obtidas nos ensaios das ligações coladas paralelas foram frágeis frágeis. No entanto, nos corpos-de-prova cuja capacidade resistente da peça central foi esgotada, o processo de propagação da ruptura ao longo da seção transversal da peça foi mais gradual. Nos ensaios com ruptura por cisalhamento, as mesmas ocorreram de forma extremamente frágil, com perda acentuada instantânea da força resistida. Nestes casos, a presença dos elementos mecânicos impediu a ocorrência de ruptura explosiva e a separação das peças de madeira, apesar do impacto transmitido na ruptura.

Os resultados das avaliações das tensões na linha adesiva, nos ensaios com emprego dos extensômetros elétricos, podem ser considerados próximos aos obtidos com as análises numéricas. As diferenças encontradas podem ser creditadas, à simplificação do modelo constitutivo utilizado e a elevada variabilidade das propriedades da madeira em geral.

A aplicação da formulação analítica às ligações coladas paralelas permitiu a obtenção de valores da força de ruptura de ligações paralelas por unidade de largura, em função do comprimento da lâmina adesiva, com forma e valores muito próximos aos obtidos experimentalmente. As distribuições de tensões cisalhantes na lâmina adesiva, obtidas com a avaliação analítica e com a análise numérica, foram bastante próximas entre si, embora o efeito de concentração de tensões nas extremidades da linha adesiva tenha sido mais acentuado nas avaliações numéricas.

5.4 Relativas às Ligações Coladas Normais

As análises de variância das resistências das ligações coladas normais sob força centrada indicaram, com 5% de risco, que as resistências e rigidezes foram influenciadas pela faixa de densidade da madeira e que não ocorreram diferenças em função do tipo de elemento mecânico adicional e espessura da peça central. Para a força máxima resistida pela ligação, os resultados foram influenciados pelo tipo de ligação e pela faixa de densidade, não se podendo rejeitar a hipótese de igualdade de resultados para o fator definido pela espessura da peça central.

Com base nos resultados das análises estatísticas, foi efetuada a avaliação da resistência de ligações coladas normais por grupo de mesma dimensão, independentemente da espessura da peça central, para todos os tipos de ligação em conjunto e para cada tipo de ligação em separado, para madeira de menor densidade, para a de maior densidade e para as duas faixas de densidade em conjunto.

A resistência das ligações coladas foi condicionada pela baixa rigidez e resistência à compressão normal das peças laterais. Esta influência fica evidenciada quando se analisam os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova com diferentes comprimentos

das peças laterais, uma vez que a resistência e a rigidez média para comprimentos das peças laterais de 360 mm superaram, respectivamente, em mais de 50% e 25% os valores correspondentes para comprimentos de 180 mm.

Embora as resistências e rigidezes das ligações normais tenham sido muito inferiores às das ligações paralelas, os processos de rupturas das ligações coladas normais apresentaram, em muitos ensaios, elevadas taxas de ductilidade, principalmente para as ligações coladas, cavilhadas e parafusadas. A relação média entre a força máxima resistida e a resistência convencional foi de 1,17, 1,26 e 1,59, respectivamente, para as ligações coladas e cavilhas, coladas e parafusadas e coladas, cavilhadas e parafusadas. As rigidezes das ligações coladas normais foram superiores as das ligações com apenas elementos mecânicos, com diferenças reduzidas em comparação às das ligações paralelas.

A análise de variância dos resultados dos ensaios de ligações coladas normais sob força excêntrica indicou, com risco de 5%, que ocorreu influência do tipo de ligação e que não ocorreu influência da espessura da peça central nas três variáveis dependentes analisadas: resistência convencional, força máxima resistida e rigidez do conjunto.

A perda média de resistência das ligações coladas normais sob força excêntrica, em relação à resistência das ligações sob força centrada, foi quase de 30% para a ligação colada e cavilhada e inferior a 1,5 % para as demais ligações. A perda de rigidez foi mais acentuada, atingindo em média cerca de 43%, 57% e 62% da rigidez das ligações sob força centrada para, respectivamente, as ligações coladas e cavilhas, coladas e parafusadas e coladas, cavilhadas e parafusadas.

Nas ligações com emprego unicamente de elementos mecânicos, a taxa média de resistência em relação à da ligação colada correspondente foi de 37%, 81% e 45% para, respectivamente, as ligações cavilhadas, parafusadas e cavilhadas, e parafusadas. De forma análoga, as taxas de rigidezes foram, respectivamente, de 24%, 37% e 47%.

O resultado da análise numérica, em regime elástico-linear, apresentou elevado efeito de concentrações de tensões na linha adesiva no início da peça central, evidenciando, para níveis de solicitações mais elevados, a necessidade da utilização de modelos matemáticos mais adequados que considerem o escoamento da madeira sob compressão normal. Além disso, devido às acentuadas diferenças das forças máximas resistidas para os diferentes elementos mecânicos associados, uma avaliação mais precisa do comportamento das ligações normais sob solicitações elevadas exige uma modelagem tridimensional que contemple a presença dos elementos mecânicos.

A solução analítica apresentou boa concordância com os resultados experimentais na previsão das resistências. A distribuição de tensões cisalhantes na linha adesiva, estimada pela avaliação analítica, é dependente do valor da tensão de fratura de referência τ_f , cujo valor mais adequado não ficou claramente definido.

5.5 Comentários Finais e Sugestões para Trabalhos Complementares

Em função das boas aproximações das resistências das ligações coladas, obtidas com as avaliações analíticas, podem ser traçadas estratégias interessantes para obtenção e análise da resistência destas ligações. Assim, a partir da caracterização das propriedades de interesse da madeira e da definição das espessuras das peças de madeira disponíveis, é possível se obter a curva de resistência da ligação colada, a partir de resultados obtidos em ensaios de ligações com diferentes comprimentos da lâmina adesiva. De posse desta curva, pode-se conhecer o comprimento da lâmina adesiva a partir da qual não se tem crescimento da resistência ou a partir do qual a taxa de crescimento é reduzida. É possível também avaliar a eficiência de uma determinada solução, pela comparação da resistência estimada da ligação com a resistência estimada do elemento mais fraco da ligação.

A resistência característica obtida com emprego da expressão sugerida pela NBR-7190 é fortemente influenciada pelo valor médio inferior ($F_{n/2}$) e por sua relação com a média dos valores inferiores $(F_1 + F_2 + \dots + F_{n/2-1}) / (\frac{n}{2} - 1)$, podendo-se obter um valor

característico superior ao valor médio do conjunto para resultados com baixo coeficiente de variação. Poderia-se prever um limite máximo para a resistência característica em relação ao valor médio a partir da definição de um valor mínimo para o coeficiente de variação.

De forma a complementar os estudos realizados neste trabalho, os seguintes temas relacionados à avaliação do comportamento de ligações coladas em áreas reduzidas associados a elementos mecânicos de pinos apresentam importância relevante:

- Ligações submetidas a diferentes condições de contorno, tais como na tração-tração e na tração-compressão.
- Ligações em vigas solicitadas à flexão simples.
- Ligações solicitadas por força excêntrica, com diferentes valores de excentricidade.
- Ligações submetidas a carregamentos de longa duração.
- Ligações submetidas a impactos.
- Ligações com maior número de peças componentes.
- Análises numéricas de comportamento até a ruptura, com modelos que considerem a plastificação da madeira por compressão normal às fibras.
- Análises numéricas tridimensionais com modelagens dos pinos.
- Ligações com emprego de cola PVAc, que apresentam maior valor de energia de fratura e permitem a distribuição mais uniforme das tensões nas superfícies adesivas.
- Estudo experimental de estruturas de formas treliçadas de pequeno a médio porte, com diferentes arranjos construtivos e emprego de ligações coladas associadas a elementos mecânicos de pinos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *Annual book of A.S.T.M.* Philadelphia: A.S.T.M., 1994. 608p. (Standards, 4.10, wood).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7190 *Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AICHER S.; KLOCK, W. Reability Based Analysis of Glued Lap Joint Resistance. In: JOINTS IN TIMBER STRUCTURES. *Proceedings of the International RILEM Symposium*. Stuttgart: RILEM Publications S.A.R.L., 2001. p.473-482.

AFONSO, V.A. Caracterização Anatômica do Lenho e da Casca das Principais Espécies de Eucalytus L'Herit. Cultivadas no Brasil. São Paulo, 1987. 188p. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, P.A.O. Modos de Ruptura das Peças de Madeira. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992a. v.1, p.115-126.

ALMEIDA, P.A.O.; FUSCO, P. B. Dimensionamento das Uniões Pregadas e Parafusadas Baseado no Método dos Estados Limites. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992. v.2, p.79-88.

ALMEIDA, P.A.O. Introdução ao Estudo Experimental da Fluência das Uniões Pregadas. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992b, v.3, p.219-228.

ALMEIDA, P.A.O.; FUSCO P.B.; RODRIGUES J., M.S. Fundamentos do Método para Determinação das Resistências das Ligações Pregadas ou Parafusadas em Estruturas de Madeira. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.2, p.315-326.

ARANTES E.M. Análise Experimental e Computacional de Vigas Compostas de Madeira Pregada de Seção Transversal T. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.1, p.3-10.

BARALDI, L.T.; CALIL JUNIOR, C. Seções Transversais Compostas em Peças de Madeira Solidarizadas por Pregos In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.1, p.95-105.

BARALDI, L.T.; CALIL JUNIOR, C. Dimensionamento e Ensaio de Ligações de Peças Estruturais de Madeira por Chapas com Dentes Estampados. V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.2, p.307-314.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982, 712p.

CARRASCO, E.V.M. *Ligações Estruturais de Madeira por Adesivos*. 1984. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 436p.

CARRASCO, E.V.M.; BREMER, C.F. Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada Solicitadas a Esforços Combinados. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Florianópolis: 1988. v.2, p.408-418.

CARRASCO, E.V.M.; BREMER; C.F. Determinação da Resistência ao Embutimento em Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada com Parafusos Ocos. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: 2000. Ligações.

CEN (1992): *EN 383 – Determination of Embedding Strength and Foundation Values For Dowel Type Fasteners*.

CROW, E.L.; DAVIS, F.A.; MAXFIELD, M.W. *Statistic Manual*. New York: Dover Publications, Inc., 1960. 288p.

DEMARZO, M.A.; BARTHOLOMEU, A. Semi-Rigidez em Ligações com Conectores Metálicos Dentados. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.2, p.377-386.

EUCLYDES, R.F. *SAEG - Sistema para análises estatísticas*. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, 2004. Disponível em: www.saeg.com.br.

EUROCODE 5 (1993). *Design of Timber Structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings – ENV 1995-1-1*. European Prestandard, Bruxelas, 1993.

FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A. *Curso de Estatística*. São Paulo: Ed. Atlas S.A., 1995. 317p.

FRIDMAN, A. Estudo do Comportamento e das Possibilidades de Aplicação de um Sistema de Conectores Metálicos Pregados. In: III ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: 1989. v.2, p.219-252.

GEHRI, E. Load Introduction and Transfer Perpendicular to Grain. In: 5th World Conference on Timber Engineering. *Proceedings ...* Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, 1998. v.1, p.175-182.

GESUALDO, F.A.R.; HELLMEISTER, J.C. Análise Teórica e Experimental de Uma Viga Trelaçada de Madeira com Ligações Cavilhadas e sua Comparação com a de Ligações Parafusadas III ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: 1989. v.2, p.7-27.

GUAN, Z.W. Structural Behaviour of Glued Bolt Joints Using FRP. In: 5th World Conference on Timber Engineering. *Proceedings ...* Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, 1998. v.1, p.265-272.

GUSTAFSSON, P.J; SERRANO, E. Glued Truss Joints Analysed by Fracture Mechanics. . In: 5th World Conference on Timber Engineering. *Proceedings ...* Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, 1998. v.1, p.257-264.

HART-SMITH, L.J. Adhesive-Bonded Double-Lap Joints. Douglas Aircraft Co., NASA Langley CR 112235, Technical Report. 1973.

HELLMEISTER, J.C. *Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira*, 1983. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Métodos de Ensaio Adotados no IPT para o Estudo de Madeiras Nacionais, Tabelas de Resultados Obtidos para Madeiras Nacionais, Nomenclatura das Madeiras Nacionais. 2.ed. São Paulo, IPT, 1956. 62p. (Boletim Técnico, 31)

KAIRI, M. Diagonal Laminated Veneer Lumber (LVL-D) Gives Ductility to Dowel-Type Connection. In: JOINTS IN TIMBER STRUCTURES. *Proceedings of the International RILEM Symposium*. Stuttgart: RILEM Publications S.A.R.L., 2001. p.233-242.

LEKHNITSKII, S.G. *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*. Moscou: Mir Publishers, 1981, 430p.

MARK, R.E. *Cell Wall Mechanics of Tracheids*. New Haven: Yale University Press, 1967. 310p.

MELO, J.E.; SIQUEIRA, M.J. Correlação entre Propriedades Físicas e Mecânicas de Madeira da Amazônia. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992. vol. 1, pg 67-79, 13p.

MENDES, A.P. Cisalhamento em Peças de Madeira. In: I ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1983, v.1 – Características, 31p.

MAGALHÃES, J.G.R. A qualidade da Madeira, seus Defeitos na Qualidade do Carvão e Impactos Econômicos de Sua Utilização. In: SIMPÓSIO BILATERAL BRASIL-

FINLÂNDIA SOBRE ATUALIDADES DAS FLORESTAS. *Anais ...* Curitiba: UFPr, 1988. p.215-65.

MOREIRA, M.S.S.; PETRAUSKI, A. Avaliação da Resistência de Ligações Coladas de Peças de Madeira Protendidas Transversalmente no Ensaio de Compressão Paralela. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Florianópolis: 1998. v.3, P383-394.

MOREIRA, S.S.M.; FASSONI, D.P. Avaliação da Distribuição de Tensões e da Resistência da Madeira Protendida Transversalmente em Ensaio de Cisalhamento. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Florianópolis: 1998. v.1, p.145-156.

MOREIRA, M.S.S.; LÚCIA, R.M.D. An Evaluation of the Influence of the Deformations of Joints Made With Mechanical Connectors on Structural Wooden Trusses. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN PRODUCTOS FLORESTALES. *Anais ...* Concepción: 2002.

NOGUEIRA, M.C.J.A. Indicações para o Emprego de Dezesesseis Espécies de Eucaliptos na Construção Civil. 1991. 134p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NOGUEIRA, M.C.J.A.; LAHR, F.A.R. Indicações para o Emprego de Dezesesseis Espécies de Eucaliptos na Construção Civil. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais...São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992. v.1, p.37-48.*

NOGUEIRA, M.C.J.A.; LAHR, F.A.R.; CALIL JUNIOR C. Métodos de Ensaio para Caracterização de Ligações com Anéis Metálicos In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Belo Horizonte: 1995. v.2, p.347-355.

OLIVEIRA, J.T. *Caracterização da Madeira de Eucalipto para a Construção Civil.*1997. 429p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

PETRAUSKI, A. *Comportamento de Ligações Adesivas e Avaliação Experimental de Tesouras de Telhados Feitas de Laminado Colado em Madeira de Eucalyptus grandis.* 2000. 128p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PASSOS, M.E.M.; CHAHUD, E. O Comportamento do Parafuso Auto-atarraxante em Ligações. In: V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. *Anais ...* Belo Horizonte, v.2, p.357-365, 1995.

RODRIGUES J., M.S. Vigas Compostas de Quatro Elementos de Madeira Interligados por Anéis Metálicos. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais...São Carlos: LaMEM EESC-USP, 1992. v.2, p.215-223.*

RODRIGUES J., M.S.; FUSCO, P.B. Uniões Mecânicas com Elementos de Pinos de Elementos Estruturais em Madeira Sujeitas a Carregamentos Repetidos. In: VI Encontro

Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. *Anais ... Florianópolis*, v.2, p.419-430, 1998.

SILVA, M.C.J.A.N; LAHR, A.R.; CALIL J., C. Resistência ao Arrancamento de Pregos. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... Belo Horizonte*: 1995. v.2, p.367-376.

SERAPHIM, J.H.C.; FRANCO, N. Chapas Metálicas de Dentes Estampados: Ensaios Exploratórios de Tração Paralela às Fibras da Madeira e à Direção de Maior Inércia da Chapa Metálica. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 2000. Ligações.

SOUZA, A.J.; CHAHUD, E. Análise Elasto-Plástica de Conectores em Corpos-de-Prova de Cisalhamento via Método dos Elementos Finitos. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... Florianópolis*: 1998. v.2, p.371-381.

SZÜCS, C.A. Influência da Variação da Densidade da Madeira Sobre o Seu Módulo de Elasticidade. . In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 1992a. vol. 1, p.13-18.

SZÜCS, C.A. Estudo do Comportamento da Madeira Submetida a Esforços Inclinados. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 1992b. vol. 2, p.53-60.

SZÜCS, C.A. Madeira Laminada Colada Reforçada com Fibras de Vidro na Direção Transversal às Fibras. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 1992.vol. 3, p.79-90.

TANAAMI, R.G.; LAHR, F.A.R. Avaliação da Influência da Posição dos Anéis de Crescimento na Resistência à Tração Normal às Fibras. In: V ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... Belo Horizonte*: 1995. v.2, p.43-52.

TIMOSHENKO, S.P.; GERE J.M. *Mechanics of Materials*. New York: D. Van Nostrand Company, 1972. 552p.

TIMOSHENKO, S.P; GOODIER, J.N. *Teoria da Elasticidade*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. 545p.

VALLE, A.; KÖHLER, A.D.; SZÜCS, C.A.; FUSCO, P.B. Determinação Experimental da Resistência e da Rigidez de Embutimento da Madeira com Orientação das Fibras Variável. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 2000. Ligações.

VELOSO, L.A.C.M; ALVIM, R.C.; ALMEIDA, P.A.O. Avaliação Numérica do Modelo de Cálculo das Ligações Mecânicas da NBR 7190/97. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ... São Carlos*: 2000. Ligações.

YOJO, T.; WATAI, L.T. Análise da Resistência Mecânica e da Elasticidade da Madeira Baseando-se nas Características das Paredes Celulares. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais ...* Florianópolis: 1998. v.1, p.223-230.

ANEXO A**ENSAIOS PRELIMINARES DE LIGAÇÕES**

A.1

MATERIAIS E MÉTODOS

1. 1 Descrição dos Materiais e Corpos-de-Prova

Apresenta-se neste Anexo, a descrição dos materiais e métodos empregados nos ensaios de avaliação preliminar de ligações coladas em áreas reduzidas associadas a elementos mecânicos de pinos. Foram confeccionados corpos-de-prova e realizados ensaios para as seguintes ligações: colada e cavilhada (CoCa); colada, cavilhada e pregada (CoCaPr); colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa); colada e parafusada (CoPa); pregada (Pr); parafusada (Pa) e cavilhada (Ca)

1. 2 Descrição dos Materiais e Corpos-de-Prova

As ligações coladas foram executadas com emprego de mistura adesiva à base de resorcinol-formaldeído, de nome comercial Cascophen RS 216M, da Alba Química S.A. Os corpos-de-prova foram confeccionados com madeira de *Eucalyptus saligna*.

Inicialmente, foram confeccionados 45 corpos-de-prova de ligação com geometria e dimensões nominais representados na FIG. A.1, divididos em três séries de repetições: A, B, C. Cada uma das três séries foi executada a partir de uma viga de dimensões aproximadas de 4,5 cm x 12 cm x 650 cm, de um lote de madeira de *Eucalyptus saligna* seca ao ar. Foram estudados cinco tratamentos para as ligações, três com emprego de ligações coladas e elementos mecânicos adicionais: colada e cavilhada (CoCa), colada, cavilhada e pregada (CoCaPr) e colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa). Em dois tratamentos foram empregados apenas elementos mecânicos, um com pregos (Pr) e outro com parafusos (Pa). De cada viga, foram confeccionados para cada tratamento, um corpo-de-prova de ligação normal e dois de ligação paralela, totalizando três corpos-de-prova para ligações normais e seis para ligações paralelas em cada tratamento.

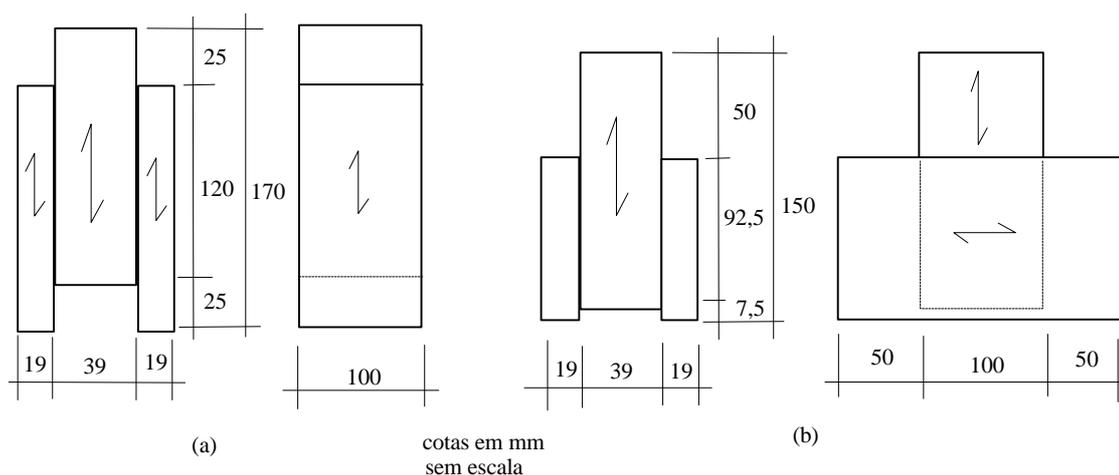


FIGURA A.1 – Geometria e Dimensões Nominais dos Corpos-de-Prova

Foram realizados ensaios para avaliação da resistência e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, com oito corpos-de-prova para a resistência e três para o módulo de elasticidade, com dimensões nominais de 4 cm x 4 cm x 15 cm.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LPFMM/DEF/UFV), com emprego de máquina universal com capacidade de 400 kN.

Os corpos-de-prova de ligações foram fabricados com peças laterais de espessura de 19 mm e peças centrais com espessura de 39 mm. Nas ligações coladas foi empregada mistura adesiva resorcinol-formaldeído aplicada em uma das faces, com um consumo de 300g/m^2 . A pressão de colagem foi da ordem de 1,2 MPa, tendo sido aplicada por meio de um torquímetro a um parafuso de aço ($d=12,5$ mm) centralizado na área colada. Para distribuição da pressão transmitida pelo parafuso, foram utilizadas arruelas quadradas de aço, de 6,0 mm de espessura e 50 mm de lado, e uma peça de madeira de 22,5 mm de espessura e área com dimensões de 72,5 mm e 95 mm. O furo efetuado nas peças ligadas para a passagem do parafuso foi também de 12,5 mm.

Após um período 24 horas, os parafusos foram retirados e os furos alargados para um diâmetro de 22,2 mm, sendo introduzida cavilha partida de madeira de Jatobá (*Hymenaea spp*) desse mesmo diâmetro, com auxílio de uma prensa (torno). Também foi utilizado adesivo nas duas partes da cavilha, conforme representado na FIG. A.2. Os ensaios foram realizados após um período mínimo de sete dias da fabricação dos corpos-de-prova

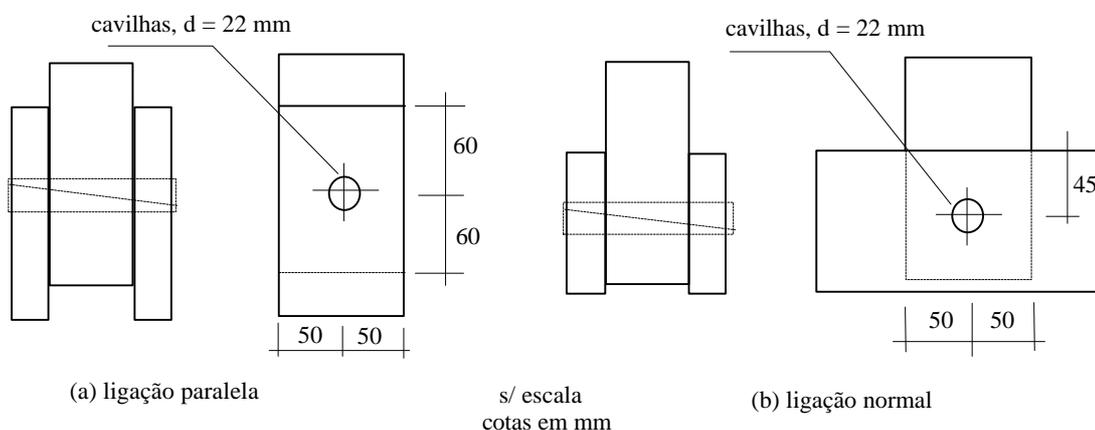


FIGURA A.2 – Corpos-de-Prova Colados e Cavilhados

Nas ligações coladas e pregadas foram utilizados 2 x 2 x 2 pregos 17 x 21 ($d = 3,2$ mm, $l = 43$ mm), cravados metade em cada lado da ligação em furação prévia efetuada com 3 mm, como representado na FIG. A.3. Nas ligações coladas e parafusadas foram adicionados 2 x 2 parafusos de aço comum com diâmetro de 8 mm, em furação efetuada com o mesmo diâmetro, conforme representado na FIG. A.4.

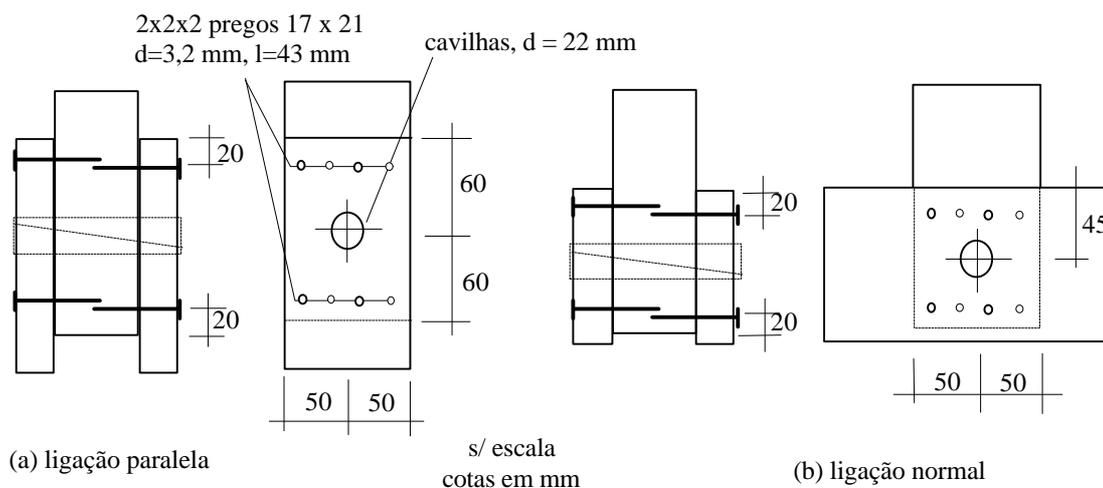


FIGURA A.3 – Corpos-de-Prova de Ligações Coladas, Cavilhadas e Pregadas

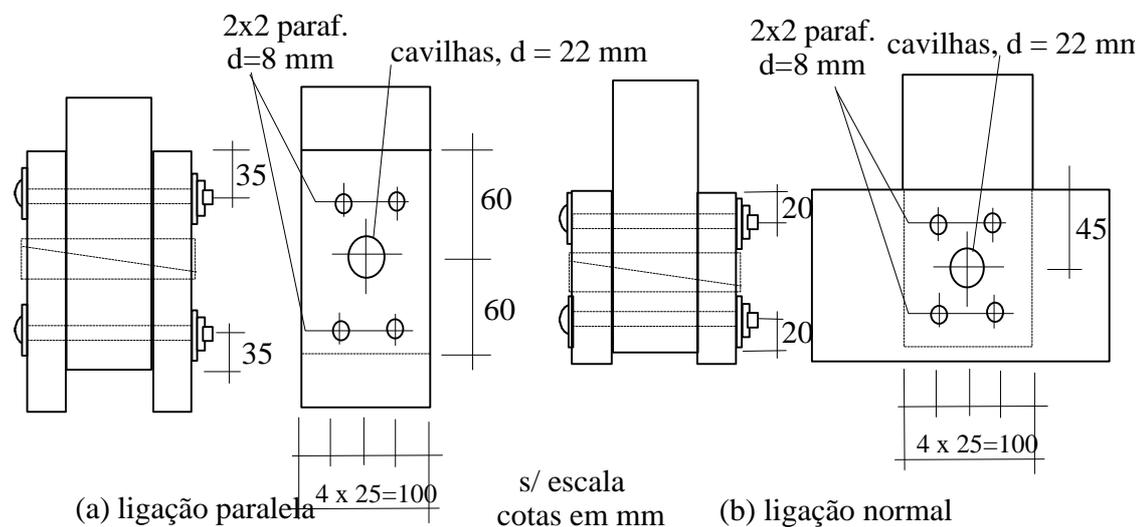


FIGURA A.4 – Corpos-de-Prova de Ligações Coladas, Cavilhadas e Parafusadas

Nos corpos-de-prova com ligações com parafusos de aço, foram utilizados seis parafusos de aço galvanizado ($d = 9,5$ mm), dispostos como representado na FIG. A.5.

Nos corpos-de-prova com ligações com pregos, foram utilizados 15 pregos 19 x 36 ($d = 4,0$ mm, $l = 76$ mm), trabalhando a corte duplo, dispostos como representado na FIG. A.6, sendo sete introduzidos de um lado e oito do outro lado. Foi efetuada uma furação prévia com diâmetro do furo igual ao do prego.

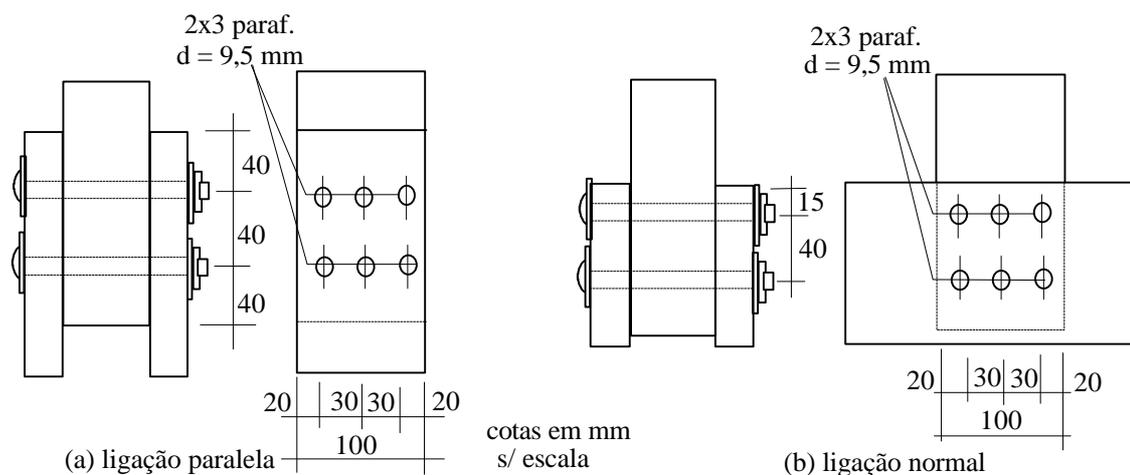


FIGURA A.5 – Corpos-de-Prova de Ligações Parafusadas

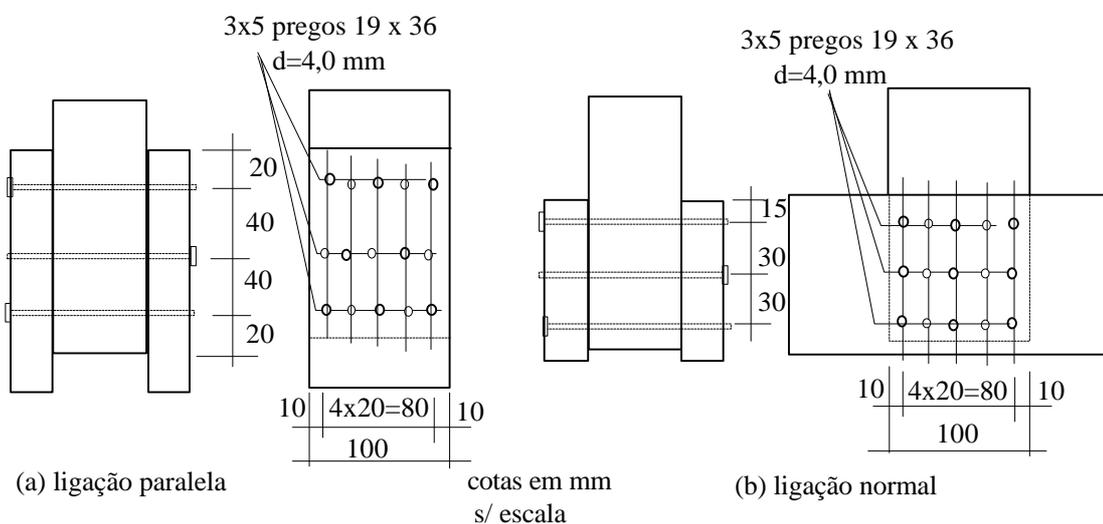


FIGURA A.6 – Corpos-de-Prova de Ligações Pregadas

Utilizando-se de peças do mesmo lote de madeira, foram realizados ensaios de outras três ligações: ligação colada e parafuso central (CoPa); com uma única cavilha central (Ca) e com uma cavilha central associada a quatro parafusos leves (CaPa). Nos corpos-de-prova de ligações coladas e parafusadas, os parafusos de aço utilizados para promoverem a pressão de colagem, com diâmetro de 12,5 mm, foram mantidos.

Foram confeccionados seis corpos-de-prova para as ligações coladas, três para ligações paralelas e três para ligações normais. Nos corpos-de-prova de ligações coladas paralelas a espessura das peças laterais foi aumentada para 30 mm, tendo em vista a predominância de ruptura por esmagamento das peças laterais ocorrida nos ensaios das

ligações coladas paralelas anteriores. Para os demais corpos-de-prova as espessuras das peças laterais foram mantidas em torno de 19 mm. As demais dimensões nominais dos corpos-de-prova foram mantidas como representado na FIG. A.2.

Nos corpos-de-prova de ligações com elementos mecânicos foram utilizadas cavilhas de madeira Jatobá com 22 mm de diâmetro e parafusos de aço galvanizado, com diâmetro de 9,5 mm, como representado nas FIG. A.7 e FIG. A.8. Foram confeccionados oito corpos-de-prova para cada tipo de elemento mecânico, quatro para ligações paralelas e quatro para ligações normais.

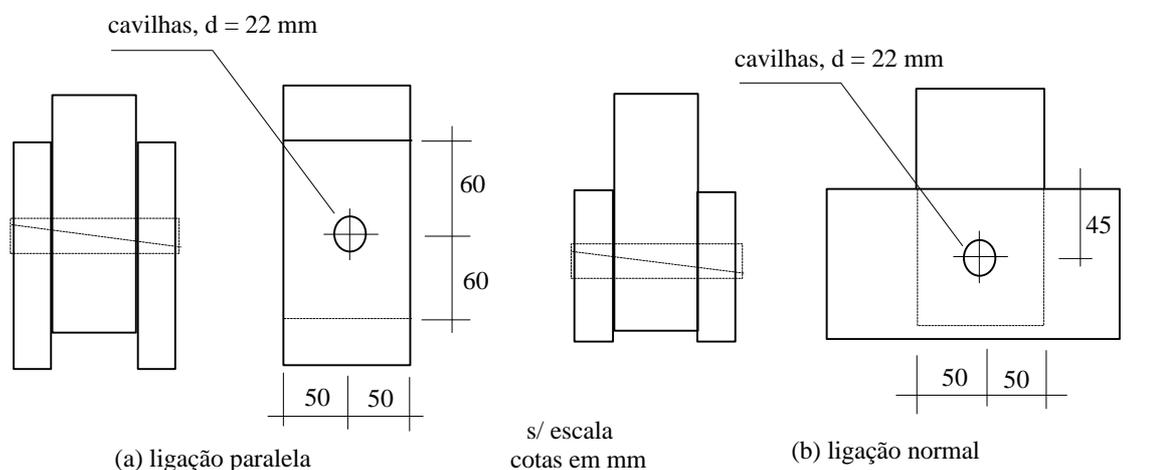


FIGURA A.7 – Corpos-de-Prova de Ligações Cavilhadas

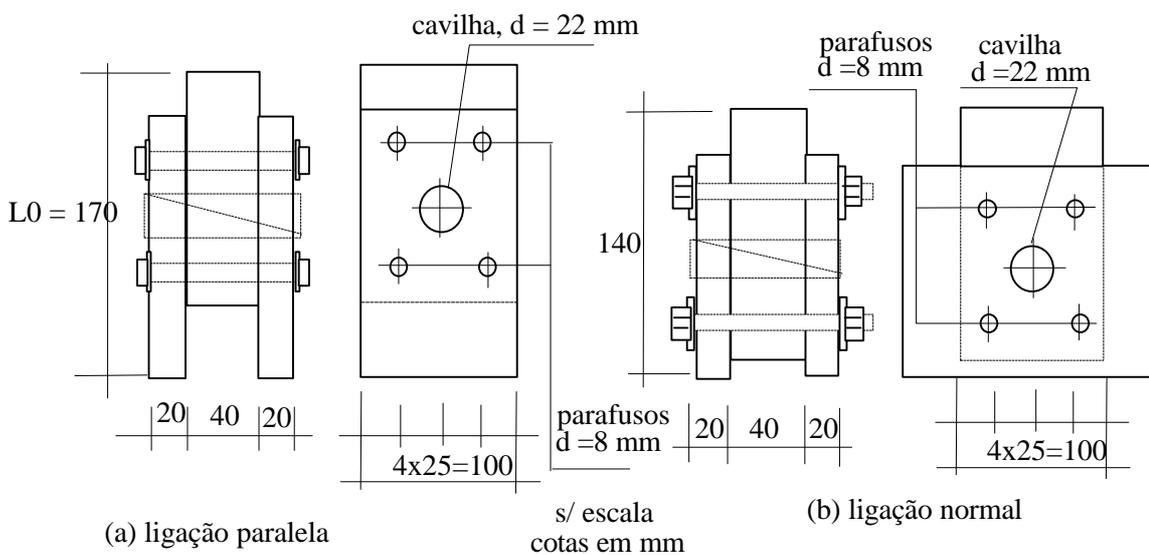


FIGURA A.8 – Corpos-de-Prova de Ligações Cavilhadas e Parafusadas

2. 2 Métodos de Ensaio

Devido ao comportamento resistente da madeira e das tensões mobilizadas, a ruptura nos ensaios de compressão de ligações coladas com três elementos, pode ocorrer por cisalhamento, por esmagamento devido à compressão, por tração normal da peça central ou por uma combinação desses esforços.

Nesta fase do trabalho de caráter exploratório, com expectativa de ocorrência de rupturas frágeis nos ensaios das ligações coladas, não houve acompanhamento das deformações, obtendo-se apenas a força de ruptura ou força correspondente ao limite da resistência do corpo-de-prova. O carregamento foi crescente e monotônico, com uma taxa de aproximadamente 10 MPa/min em relação à peça central.

Os ensaios das ligações por elementos mecânicos foram efetuados segundo os procedimentos definidos na NBR-7190/97, com exceção das condições de apoio das ligações normais, nas quais as peças laterais foram apoiadas ao longo de toda base. A carga limite foi obtida a partir do ensaio de um corpo-de-prova de referência para cada tipo de ligação e definida pelo valor correspondente a uma deformação residual de 0,2%, no terceiro ciclo de carregamento. Foram utilizados dois relógios comparadores para medição dos deslocamentos, com precisão de centésimo de milímetro, localizados em faces opostas do corpo-de-prova, como representado na FIG. A.9.

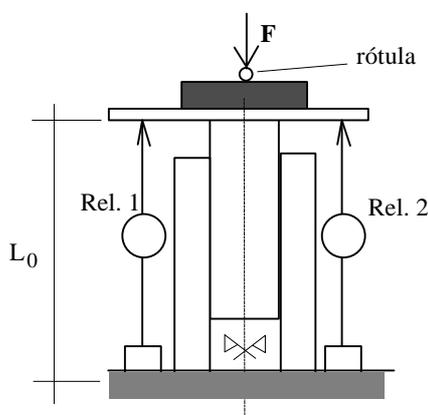


FIGURA A.9 – Esquema dos Ensaios de Ligações com Elementos Mecânicos

ANEXO B**RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS LIGAÇÕES
COLADAS PARALELAS**

B.1

INTRODUÇÃO

Nos itens 2, 3 e 4, apresentam-se as tabelas com os resultados dos ensaios de resistência das ligações coladas paralelas sob força centrada para a espessura da peça central t_c igual, respectivamente, a 24 mm, 30 mm e 48 mm. Nestas tabelas estão listadas as dimensões principais de cada corpo-de-prova e os resultados mais significativos obtidos nos ensaios, contendo as seguintes informações:

- t_c , espessura da peça central;
- b_c , largura do corpo-de-prova;
- $h_{c\text{méd}}$, altura média das superfícies coladas;
- $U_{\text{méd}}$, teor de umidade médio das peças de madeira do corpo-de-prova;
- $d_{\text{méd}}$, densidade aparente média;
- F_u , força última obtida no ensaio;
- $F_u (U=12\%)$, força última corrigida para o teor de umidade de referência de 12%;
- τ_{gv0} , tensão média de cisalhamento na superfície colada, para $F_u (U=12\%)$; e
- σ_{c0} , tensão média de compressão na peça central, para $F_u (U=12\%)$.

Nas tabelas de ligações sob força centrada apresenta-se uma coluna com a descrição sucinta do tipo de ruptura do corpo-de-prova, com emprego da seguinte nomenclatura:

- cis. - ruptura por cisalhamento;
- comp. - ruptura por compressão;
- pc - peça central do corpo-de-prova;
- ple - peça lateral esquerda do corpo-de-prova; e
- pld - peça lateral direita do corpo-de-prova.

O tipo de ruptura assinalado como tração corresponde ao fenômeno ocorrido em alguns ensaios com peça central de espessura de 48 mm, nos quais foi detectado um princípio de fendilhamento no início da superfície média colada da peça central, embora as rupturas finais tenham sempre ocorrido por outros motivos, devido à presença dos elementos mecânicos transversais.

No item 5 estão as tabelas com os resultados individuais dos ensaios de avaliação da rigidez de ligações coladas paralelas sob força centradas. Apresentam-se neste item gráficos força x deslocamento de resultados individuais e os gráficos força x deslocamento de um conjunto de seis corpos-de-prova de cada tratamento, com dois resultados para cada dimensão de peça central.

No item 6 estão as tabelas com os resultados individuais dos ensaios de avaliação de resistência e rigidez de ligações coladas paralelas sob força excêntrica.

B.2

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PEÇA CENTRAL DE 24 MM

Nas tabelas B.1 a B.8 apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de resistência das ligações coladas paralelas com espessura da peça central $t_c = 24$ mm.

TABELA B.1 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 24 / 72 / 72 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B37	24,27	72,66	70,96	12,42	738	47200	47795	4,63	27,10	cis. (ple)
2	CoCa B38	24,15	72,63	69,24	13,03	696	59000	60828	6,05	34,68	cis. duplo
3	CoCa A637	23,95	72,12	70,39	13,74	833	46500	48922	4,82	28,32	cis. (ple)
4	CoCa A638	23,93	72,27	70,31	13,92	808	47800	50559	4,98	29,23	cis. duplo
5	Co B337	23,97	72,63	68,88	13,62	696	64000	67120	6,71	38,55	cis. duplo
6	Co B338	24,42	72,33	70,69	13,04	720	73500	75790	7,41	42,91	cis. (ple)
7	Co A737	23,90	72,33	70,62	13,19	802	44500	46087	4,51	26,66	cis. duplo
8	Co A738	23,65	72,20	71,07	13,20	807	49000	50766	4,95	29,73	cis. (ple)
9	CoPa B237	24,39	71,99	69,69	12,77	720	47200	48297	4,81	27,51	cis. (pld)
10	CoPa B238	24,40	72,36	70,43	12,47	703	59000	59836	5,87	33,89	cis. duplo
11	CoPa A537	23,89	72,39	71,16	13,19	832	42000	43499	4,22	25,15	cis. duplo
12	CoPa A538	23,93	72,26	71,43	13,10	776	54000	55785	5,40	32,26	cis. duplo
Média		24,07	72,35	70,41	13,14	761	52808	54607	5,36	31,33	
Desvio-padrão		0,25	0,21	0,78	0,46	54	9340	9622	0,96	5,34	
Coef. de variação (%)		1,03	0,29	1,11	3,51	7,11	17,69	17,62	17,97	17,03	

TABELA B.2 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 24 / 96 / 96$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umíd.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B01	24,3	95,48	95,80	12,16	712	128000	128603	7,03	55,43	cis. duplo
2	CoCa B02	23,95	95,80	95,24	11,76	655	103000	102261	5,60	44,57	cis. duplo
3	CoCa A601	23,92	95,72	96,23	13,73	806	107000	112554	6,11	49,16	cis. (pld)
4	CoCa A602	23,88	95,27	94,84	13,53	817	141500	147975	8,19	65,04	cis. duplo
5	CoCaPa B101	24,15	95,73	95,29	12,65	667	129000	131520	7,21	56,89	cis. duplo
6	CoCaPa B102	23,32	95,96	95,27	12,49	654	110000	111603	6,10	49,87	cis. duplo
7	CoCaPa A401	23,99	95,80	95,20	13,05	874	151000	155773	8,54	67,78	comp. (pc)
8	CoCaPa A402	23,93	96,11	95,83	13,47	810	127500	133105	7,23	57,87	comp. (pc)
9	CoPa B201	24,06	96,03	95,44	12,21	738	138500	139363	7,60	60,32	comp. (pc), cis. duplo
10	CoPa B202	24,38	95,78	95,20	12,07	654	120000	120256	6,59	51,50	cis. (pld), comp. (pc)
11	CoPa A501	22,45	95,25	96,10	13,13	895	143500	148345	8,10	69,37	cis. (ple)
12	CoPa A502	23,72	95,44	96,13	13,16	803	155500	160890	8,77	71,07	comp. (pc)
Média		23,84	95,70	95,55	12,78	757	129542	132687	7,26	58,24	
Desvio-padrão		0,51	0,28	0,45	0,65	88	17175	18587	1,02	8,66	
Coef. de variação (%)		2,16	0,29	0,47	5,08	11,66	13,26	14,01	14,09	14,87	

TABELA B.3 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 24 / 72 / 108 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B43	24,09	72,13	109,88	12,89	708	103000	105738	6,67	60,85	comp. (pc)
2	CoCa B44	24,41	72,84	109,27	12,87	708	121000	124176	7,80	69,84	comp. (pc)
3	CoCa A643	24,02	72,13	108,85	13,69	825	111000	116621	7,43	67,31	comp. (pc), cis. (pld)
4	CoCa A644	23,78	71,69	110,10	13,48	857	119000	124298	7,87	72,91	comp. (pc), cis. (pld)
5	Co B343	23,87	72,27	109,25	13,41	667	96500	100594	6,37	58,31	comp. (pc)
6	Co B344	24,35	72,07	109,02	13,56	675	103500	108332	6,89	61,73	cis. (ple), comp. (pld)
7	Co A743	24,10	72,15	109,25	13,53	816	113500	118702	7,53	68,27	comp. (pc)
8	Co A744	24,06	72,24	108,88	13,48	884	140000	146218	9,29	84,13	comp. (pc), cis. (ple)
9	CoPa B243	23,97	72,14	108,91	13,34	712	111500	115977	7,38	67,07	comp. (pc)
10	CoPa B244	24,32	72,10	108,54	13,37	705	103000	107219	6,85	61,15	comp. (pc)
11	CoPa A543	24,09	72,24	108,49	13,33	889	108500	112837	7,20	64,84	comp. (pc), cis. (pld)
12	CoPa A544	24,15	72,09	109,31	13	840	130500	134406	8,53	77,20	cis. duplo
Média		24,10	72,17	109,15	13,33	774	113417	117927	7,48	67,80	
Desvio-padrão		0,19	0,26	0,48	0,27	85	12513	12931	0,82	7,47	
Coef. de variação (%)		0,78	0,36	0,44	2,01	10,99	11,03	10,97	10,94	11,02	

TABELA B.4 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 24 / 120 / 120 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B13	23,34	119,75	121,81	11,84	616	157000	156233	5,36	55,90	comp. (pc), cis. duplo
2	CoCa B14	23,33	119,73	121,43	11,98	651	172000	171913	5,91	61,54	comp. (pc)
3	CoCa B Z1	23,78	120,95	124,84	11,18	633	168750	164608	5,45	57,23	comp. (pc)
4	CoCa B Z5	23,80	120,87	124,61	11,28	672	206050	201600	6,69	70,08	comp. (pc)
5	CoCa A613	22,86	119,14	120,56	13,64	876	119000	124849	4,35	45,84	cis. (ple)
6	CoCa A614	23,17	119,02	120,22	13,24	865	109000	113067	3,95	41,00	cis. duplo
7	CoCaPa B113	23,26	118,98	121,81	12,28	639	163000	164381	5,67	59,40	comp.(pc)
8	CoCaPa B114	23,12	119,14	121,61	12,45	658	153500	155553	5,37	56,47	comp. (pc)
9	CoCaPa BY1	23,63	120,79	123,53	11,55	693	209640	206832	6,93	72,46	comp. (pc)
10	CoCaPa BY5	23,78	120,37	125,06	11,58	625	159420	157405	5,23	54,99	comp. (pc)
11	CoCaPa A413	22,96	119,64	121,90	13,23	831	160000	165897	5,69	60,39	comp. (pc)
12	CoCaPa A414	22,64	119,31	121,51	12,93	876	187500	192734	6,65	71,35	comp. (pc), cis. duplo

TABELA B.4 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 24 / 120 / 120 (mm) (Continuação)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
13	CoPa B213	23,19	119,43	122,43	12,43	660	158500	160566	5,49	57,97	comp. (pc)
14	CoPa B214	23,17	119,48	122,74	12,16	630	160000	160770	5,48	58,07	comp. (pc)
15	CoPa BX1	23,69	121,00	124,80	11,55	693	182570	180124	5,96	62,84	comp. (pc)
16	CoPa BX3	23,63	120,96	124,26	12,00	700	179470	179470	5,97	62,79	comp. (pc)
17	CoPa BX5	24,01	120,78	123,96	11,58	625	168890	166756	5,57	57,50	comp. (pc)
18	CoPa A513	22,84	119,25	122,44	13,17	834	171000	176992	6,06	64,98	cis. (pld)
19	CoPa A514	22,42	119,13	121,77	13,56	765	173000	181098	6,24	67,80	cis. (duplo)
Média		23,30	119,88	122,70	12,30	713	166226	167413	5,69	59,93	
Desvio-padrão		0,43	0,78	1,51	0,79	95,31	24069	22622	0,73	7,92	
Coef. de variação (%)		1,86	0,65	1,23	6,42	13,37	14,48	13,51	12,79	13,21	

TABELA B.5 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 24 / 96 / 144 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B07	24,2	95,71	143,22	11,85	697	152000	151321	5,52	65,33	comp. (pc)
2	CoCa B08	23,95	95,61	144,98	12,15	712	155000	155685	5,62	67,99	comp. (pc)
3	CoCa A607	23,89	96,04	147,66	13,73	915	185000	194608	6,86	84,82	comp. (pc), cis. (ple)
4	CoCa A608	23,70	95,68	145,05	13,11	937	160000	165327	5,96	72,91	comp. (pc)
5	CoCaPa B107	24,21	94,66	144,23	12,10	715	148000	148463	5,44	64,78	comp. (pc)
6	CoCaPa B108	23,72	95,99	145,12	12,28	664	148500	149757	5,38	65,77	comp. (pc)
7	CoCaPa A407	23,79	95,89	149,55	13,08	915	172500	178093	6,21	78,07	comp. (pc), cis. (ple)
8	CoCaPa A408	23,96	95,91	149,73	12,99	891	171500	176576	6,15	76,84	comp. (pc), cis. (ple)
9	CoPa B207	24,05	96,05	145,19	12,35	724	136000	137423	4,93	59,49	cis. duplo
10	CoPa B208	24,13	95,71	144,76	11,82	668	144500	143741	5,19	62,24	comp. (pc)
11	CoPa A507	24,10	96,10	147,73	13,12	935	174000	179828	6,33	77,65	cis. (ple)
12	CoPa A508	24,12	96,00	141,89	13,31	930	175000	181893	6,68	78,55	comp. (pc)
Média		23,99	95,78	145,76	12,66	809	160167	163560	5,85	71,20	
Desvio-padrão		0,18	0,39	2,42	0,64	119	15123	18227	0,60	7,95	
Coef. de variação (%)		0,75	0,41	1,66	5,02	14,68	9,44	11,14	10,33	11,17	

TABELA B.6 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 24 / 144 / 144$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umíd.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B25	22,51	144,8	146,58	12,21	734	218000	219341	5,17	67,29	comp. (pc)
2	CoCa B26	22,47	141,78	145,28	12,29	739	225000	226965	5,51	71,24	comp. (pc)
3	CoCa A625	22,76	143,63	146,15	14,02	863	234000	248212	5,91	75,93	cis. (pld)
4	CoCa A626	22,91	143,13	145,51	13,67	795	171000	179571	4,31	54,76	comp. (pc), cis. (ple)
5	CoCaPa B125	22,29	144,05	146,55	12,38	716	178000	180018	4,26	56,07	comp. (pc)
6	CoCaPa B126	22,59	144,08	145,49	12,64	693	183000	186492	4,45	57,30	comp. (pc)
7	CoCaPa A425	22,98	143,96	144,95	13,14	877	226000	233761	5,60	70,66	cis. (pld)
8	CoCaPa A426	23,41	143,88	145,75	12,86	884	240000	246185	5,87	73,09	comp. (pc)
9	CoPa B225	22,23	141,07	147,17	12,71	692	212000	216519	5,21	69,04	comp. (pc)
10	CoPa B226	22,38	144,48	146,07	12,39	735	227000	229639	5,44	71,02	comp. (pc)
11	CoPa A525	22,96	144,12	144,00	14,08	816	252000	267758	6,45	80,92	cis. (duplo)
12	CoPa A526	22,86	143,98	145,77	13,25	871	263000	272832	6,50	82,89	cis. (duplo)
Média		22,70	143,58	145,77	12,97	785	219083	225608	5,39	69,18	
Desvio-padrão		0,35	1,10	0,83	0,66	75	28874	31443	0,76	9,15	
Coef. de variação (%)		1,52	0,76	0,57	5,12	9,56	13,18	13,94	14,06	13,23	

TABELA B.7 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 24 / 120 / 180$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umíd.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B19	22,98	119,94	180,35	11,62	700	180000	177960	4,11	64,57	comp. (pc)
2	CoCa B20	23,12	120,27	181,05	11,78	688	167000	165887	3,81	59,66	comp. (pc)
3	CoCa A619	23,11	120,47	179,00	13,2	789	185000	191657	4,44	68,84	comp. (pc)
4	CoCa A620	22,96	121,44	179,45	13,99	880	193000	204542	4,69	73,36	cis. (pld)
5	CoCaPa B119	23,12	120,76	182,34	12,05	668	186000	186296	4,23	66,73	comp. (pc)
6	CoCaPa B120	23,16	120,30	180,56	12,12	689	170000	170608	3,93	61,23	comp. (pc)
7	CoCaPa A419	22,85	120,52	180,10	13,03	863	192000	197955	4,56	71,88	comp. (pc)
8	CoCaPa A420	22,14	121,75	180,70	13,83	895	211000	222554	5,06	82,56	comp. (pc)
9	CoPa B219	23,27	119,90	180,65	11,75	671	157000	155827	3,60	55,85	comp. (pc)
10	CoPa B220	23,19	120,12	180,70	11,88	668	207000	206285	4,75	74,05	comp. (pc)
11	CoPa A519	23,18	118,52	180,72	13,26	861	194000	201324	4,70	73,28	comp. (pc)
12	CoPa A520	23,30	121,40	178,44	12,34	840	216000	218230	5,04	77,15	comp. (pc)
Média		23,03	120,45	180,34	12,57	768	188167	191594	4,41	69,10	
Desvio-padrão		0,31	0,86	1,01	0,85	95	17974	20848	0,48	7,79	
Coef. de variação (%)		1,34	0,71	0,56	6,74	12,34	9,55	10,88	10,79	11,27	

TABELA B.8 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 24 / 144 / 216$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umíd.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B31	22,54	144,18	217,50	12,25	713	202000	203510	3,24	62,62	comp. (pc)
2	CoCa B32	22,46	144,35	216,00	12,24	727	207000	208509	3,34	64,31	comp. (pc)
3	CoCa A631	23,17	143,48	217,00	13,57	881	245000	256557	4,12	77,17	comp. (pc)
4	CoCa A632	23,00	143,71	218,00	13,71	922	204000	214482	3,42	64,89	comp. (pc)
5	CoCaPa B131	22,85	144,29	217,00	12,12	719	232000	232842	3,72	70,62	comp. (pc)
6	CoCaPa B132	22,28	144,32	216,75	12,25	731	205000	206556	3,30	64,24	comp. (pc)
7	CoCaPa A431	22,98	143,99	217,50	12,71	863	234000	239004	3,82	72,23	comp. (pc)
8	CoCaPa A432	23,06	144,53	217,00	13,02	897	227000	233955	3,73	70,20	comp. (pc)
9	CoPa B231	22,29	144,58	217,00	12,5	719	186000	188773	3,01	58,58	comp. (pc)
10	CoPa B232	22,29	144,22	219,50	12,7	705	217000	221525	3,50	68,91	comp. (pc)
11	CoPa A531	22,31	143,86	217,75	12,66	916	273000	278387	4,44	86,74	comp. (pc), cis.(ple)
12	CoPa A532	23,11	143,68	216,00	12,09	789	245000	245691	3,96	73,99	comp. (pc)
Média		22,70	144,10	217,25	12,65	799	223083	227483	3,63	69,54	
Desvio-padrão		0,36	0,35	0,94	0,54	90	24258	25311	0,41	7,56	
Coef. de variação (%)		1,60	0,24	0,43	4,28	11,21	10,87	11,13	11,27	10,87	

B.3

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PEÇA CENTRAL DE 30 MM

Nas tabelas B.9 a B.16 apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de resistência das ligações coladas paralelas com espessura da peça central $t_c = 30$ mm.

TABELA B.9 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 72 / 72 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	Tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B39	29,60	72,50	70,55	12,86	707	76200	78159	7,64	36,42	cis. (ple)
2	CoCa B40	29,68	72,55	70,96	12,83	726	88500	90701	8,81	42,12	cis. (pld)
3	CoCa A639	30,54	71,99	71,67	14,15	833	42200	44923	4,35	20,43	cis. (ple)
4	CoCa A640	30,69	71,98	70,31	13,33	785	33400	34735	3,43	15,72	cis. duplo
5	Co B339	29,53	72,07	70,90	13,45	699	55000	57398	5,62	26,97	cis. duplo
6	Co B340	29,47	72,27	70,30	13,07	685	82000	84634	8,32	39,74	tração (pc), cis. (ple)
7	Co A739	30,75	71,31	71,30	12,96	772	42000	43205	4,25	19,70	cis. duplo
8	Co A740	30,75	72,07	70,40	13,09	818	42500	43894	4,32	19,81	cis. duplo
9	CoPa B239	29,66	72,25	69,81	13,13	716	76200	78772	7,81	36,76	cis. duplo
10	CoPa B240	29,66	72,50	70,52	13,07	706	88500	91346	8,93	42,48	cis. duplo
11	CoPa A539	30,80	72,20	70,68	13,01	774	44000	45330	4,44	20,38	cis. duplo
12	CoPa A540	31,16	72,31	70,33	13,13	839	44000	45498	4,47	20,19	cis. duplo
Média		30,19	72,17	70,65	13,17	755	59542	61550	6,03	28,39	
Desvio-padrão		0,64	0,33	0,50	0,35	55	20938	21373	2,09	10,25	
Coef. de variação (%)		2,10	0,46	0,71	2,69	7,31	35,17	34,72	34,60	36,11	

TABELA B.10 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 30 / 96 / 96$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B03	31,52	95,78	94,61	11,85	699	155000	154284	8,51	51,10	cis.duplo
2	CoCa B04	31,32	95,40	95,57	11,23	671	116000	113328	6,21	37,93	cis. duplo
3	CoCa A603	30,22	95,75	94,82	13,86	804	89500	94500	5,20	32,66	cis. duplo
4	CoCa A604	30,59	95,96	94,56	13,86	829	165500	174711	9,63	59,52	cis. duplo
5	CoCaPa B103	30,94	95,86	95,10	12,33	734	153000	154495	8,47	52,09	cis. (ple)
6	CoCaPa B104	31,20	95,87	94,20	12,52	742	140500	142707	7,90	47,71	cis. (pld)
7	CoCaPa A403	30,77	95,85	94,60	13,45	787	146000	152372	8,40	51,66	comp. (pc), cis. duplo
8	CoCaPa A404	30,72	96,50	93,10	13,25	820	143000	148361	8,26	50,05	comp. (pc), cis.(pld)
9	CoPa B203	30,83	95,70	94,24	12,27	666	100000	100796	5,59	34,16	cis. (pld), comp. (pc)
10	CoPa B204	30,88	95,68	94,68	12,03	649	167500	167641	9,25	56,74	comp. (pc), cis. (ple)
11	CoPa A503	30,53	95,86	97,11	13,57	845	171000	179061	9,62	61,18	cis. (duplo)
12	CoPa A504	30,27	95,60	94,61	12,97	796	148000	152312	8,42	52,63	cis. (ple), comp.(pc)
Média		30,82	95,82	94,77	12,77	754	141250	144547	7,96	48,95	
Desvio-padrão		0,39	0,26	0,94	0,85	69	26248	27570	1,49	9,37	
Coef. de variação (%)		1,28	0,27	0,99	6,69	9,20	18,58	19,07	18,77	19,14	

TABELA B.11 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 72 / 108 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B45	29,59	70,55	109,59	13,08	703	94500	97559	6,31	46,73	cis. (ple)
2	CoCa B46	29,49	72,50	109,27	12,93	692	109500	112559	7,10	52,65	comp. (pc), cis. (pld)
3	CoCa A645	30,89	72,00	109,26	13,64	844	151500	158956	10,10	71,47	cis. (pld)
4	CoCa A646	31,14	72,23	109,56	13,75	822	124000	130528	8,25	58,03	cis. (ple)
5	Co B345	29,49	72,43	109,2	13,35	711	133000	138369	8,75	64,78	comp. (pc)
6	Co B346	29,42	72,19	108,00	12,96	739	125500	129097	8,28	60,79	comp. (pc)
7	Co A745	30,86	72,25	109,50	13,22	855	118000	122315	7,73	54,86	cis. (ple)
8	Co A746	30,98	72,41	109,20	13,05	858	159000	164020	10,37	73,12	cis. (duplo)
9	CoPa B245	29,70	72,63	109,30	13,00	704	117000	120506	7,59	55,86	cis. (pld)
10	CoPa B246	29,18	72,07	108,96	13,13	666	131000	135453	8,62	64,41	comp. (pc), cis. duplo
11	CoPa A545	31,12	72,33	109,85	13,22	802	102500	106248	6,69	47,20	cis. (ple)
12	CoPa A546	30,83	72,08	108,92	13,13	856	154500	159739	10,17	71,88	comp. (pc), cis. (pld)
Média		30,22	72,14	109,22	13,21	771	126667	131279	8,33	60,15	
Desvio-padrão		0,79	0,53	0,47	0,26	75	20419	21387	1,35	9,19	
Coef. de variação (%)		2,62	0,74	0,43	1,96	9,72	16,12	16,29	16,26	15,28	

TABELA B.12 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 120 / 120 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B15	31,35	119,7	123,65	11,99	638	206000	205958	6,96	54,88	comp. (pc)
2	CoCa B16	29,70	119,69	122,12	11,78	641	221000	219534	7,51	61,76	comp. (pc, ple)
3	CoCa BZ6	29,45	120,66	123,50	11,63	751	209650	207306	6,96	58,34	comp. (pc)
4	CoCa BZ10	28,41	120,03	124,29	11,73	767	204480	202854	6,80	59,49	comp. (pc)
5	CoCa A615	31,17	119,05	120,79	13,27	801	127000	131840	4,58	35,53	cis. (pld)
6	CoCa A616	31,11	118,91	124,96	13,21	845	118000	122280	4,11	33,05	cis. (pld)
7	CoCaPa B115	29,62	119,35	120,50	12,41	608	162000	163992	5,70	46,39	comp. (pc)
8	CoCaPa B116	29,60	119,23	122,70	12,06	633	162000	162278	5,55	45,98	comp. (pc), cis. duplo
9	CoCaPa BY6	29,41	120,97	123,20	11,80	741	196590	195391	6,56	54,92	comp. (pc)
10	CoCaPa BY10	29,64	121,01	123,50	12,41	801	224430	227201	7,60	63,34	comp. (pc)
11	CoCaPa A415	29,37	118,74	123,30	13,27	785	153000	158852	5,43	45,55	cis. (ple)
12	CoCaPa A416	29,52	119,47	121,70	13,28	863	151000	156787	5,39	44,46	cis. (pld)

TABELA B.12 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 120 / 120 (mm) (Continuação)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
13	CoPa B215	29,65	119,18	121,74	11,70	747	201000	199163	6,86	56,36	comp. (pc)
14	CoPa B216	30,23	119,43	119,99	12,10	723	213500	214162	7,47	59,32	comp. (pc)
15	CoPa BX6	29,40	121,13	123,71	11,80	741	194790	193602	6,46	54,36	comp. (pc)
16	CoPa BX8	28,27	121,21	123,72	12,00	740	189420	189420	6,32	55,28	comp. (pc)
17	CoPa BX10	29,42	121,00	122,91	12,41	801	229300	232131	7,80	65,21	comp. (pc)
18	CoPa A515	29,21	118,99	123,26	13,28	862	172000	178610	6,09	51,39	cis. (pld)
19	CoPa A516	29,36	119,03	122,48	13,21	767	220000	228013	7,82	65,24	cis. (duplo)
Média		29,68	119,83	122,74	12,39	750,26	187114	188914	6,42	53,20	
Desvio-padrão		0,81	0,87	1,31	0,65	75,73	33299	32059	1,07	9,26	
Coef. de variação (%)		2,72	0,73	1,07	5,23	10,09	17,80	16,97	16,68	17,41	

TABELA B.13 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 96 / 144 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B09	30,84	95,94	144,64	12,05	616	166500	166747	6,01	56,36	comp. (pc), cis.
2	CoCa B10	30,95	95,85	144,39	11,72	685	167000	165614	5,98	55,83	comp. (pc), cis.
3	CoCa A609	30,57	95,75	147,25	13,85	836	193000	203689	7,22	69,59	comp.(pc, ple), cis.(pld)
4	CoCa A610	30,60	95,86	147,24	13,20	866	212000	219624	7,78	74,87	comp. (pc),cis. duplo
5	CoCaPa B109	30,75	95,49	144,50	12,24	713	149500	150579	5,46	51,28	cis. duplo
6	CoCaPa B110	30,71	95,40	143,80	12,31	701	153500	154948	5,65	52,89	cis. duplo
7	CoCaPa A409	30,57	95,57	149,50	13,31	853	179000	186037	6,51	63,68	comp. (pc)
8	CoCaPa A410	30,78	95,97	145,40	13,24	878	187500	194454	6,97	65,83	comp. (pc)
9	CoPa B209	31,19	95,58	143,11	11,88	710	190000	189314	6,92	63,50	comp.(pc,ple), cis.(pld)
10	CoPa B210	31,12	96,09	145,77	12,11	660	178500	179110	6,39	59,90	comp. (pc)
11	CoPa A509	30,90	96,22	145,20	13,29	860	205000	212914	7,62	71,61	comp. (pc)
12	CoPa A510	30,70	96,48	149,01	13,01	894	199000	205043	7,13	69,23	comp. (pc)
Média		30,81	95,85	145,82	12,68	773	181708	185673	6,64	62,88	
Desvio-padrão		0,20	0,32	2,02	0,70	100	19742	22692	0,76	7,69	
Coef. de variação (%)		0,66	0,33	1,39	5,55	12,95	10,86	12,22	11,42	12,23	

TABELA B.14 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 144 / 144 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B27	29,60	143,00	147,01	11,85	723	263000	261813	6,23	61,85	comp. (pc)
2	CoCa B28	29,55	144,2	145,36	12,08	749	269000	269666	6,43	63,29	comp. (pc)
3	CoCa A627	29,51	143,95	146,91	13,82	909	314000	331120	7,83	77,95	cis. duplo, comp. (pc)
4	CoCa A628	29,78	143,85	143,91	14,00	868	202000	214119	5,17	49,98	cis. (pld)
5	CoCaPa B127	29,49	144,19	145,3	12,46	684	218000	221026	5,27	51,98	comp. (pc)
6	CoCaPa B128	29,47	144,08	145,6	12,43	699	256000	259323	6,18	61,07	comp. (pc)
7	CoCaPa A427	29,50	144,04	143,3	12,94	884	271000	278673	6,75	65,58	cis. (duplo)
8	CoCaPa A428	29,53	143,98	146,2	13,15	888	298000	308291	7,32	72,51	comp. (pc), cis. (ple)
9	CoPa B227	29,47	144,03	145,88	13,29	712	277000	287681	6,85	67,78	comp. (pc)
10	CoPa B228	29,46	143,99	146,03	12,48	671	243500	246992	5,87	58,23	comp. (pc)
11	CoPa A527	29,44	143,73	145,42	12,80	836	269000	275431	6,59	65,09	cis. (ple), comp. (pld)
12	CoPa A528	29,98	149,36	145,48	13,71	845	238000	250220	5,76	55,88	cis. (pld)
Média		29,57	144,37	145,53	12,92	789	259875	267030	6,35	62,60	
Desvio-padrão		0,16	1,60	1,07	0,69	90	31393	33216	0,78	8,06	
Coef. de variação (%)		0,54	1,11	0,74	5,37	11,45	12,08	12,44	12,35	12,88	

TABELA B.15 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 30 / 120 / 180$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c\text{méd}}$	$U_{\text{méd}}$	$d_{\text{méd}}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{\text{cola}}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B21	29,69	119,97	180,20	11,56	659	211000	208203	4,82	58,45	comp. (pc)
2	CoCa B22	29,44	119,66	178,15	11,82	660	225000	223815	5,25	63,53	comp. (pc)
3	CoCa A621	29,40	121,33	179,25	13,90	835	235000	248391	5,71	69,63	comp. (pc)
4	CoCa A622	29,80	119,93	178,45	13,29	765	236000	245131	5,73	68,59	comp. (pc)
5	CoCaPa B121	29,71	120,51	179,50	11,93	661	209500	209044	4,83	58,39	comp. (pc)
6	CoCaPa B122	29,39	119,72	179,50	12,27	681	194000	195593	4,55	55,59	comp. (pc)
7	CoCaPa A421	29,39	120,58	179,90	13,55	856	207000	216621	4,99	61,13	comp. (pc)
8	CoCaPa A422	30,13	121,56	179,80	13,09	761	217000	224070	5,13	61,18	comp. (pc)
9	CoPa B221	29,73	119,57	181,10	12,00	661	213000	213009	4,92	59,92	comp. (pc)
10	CoPa B222	29,75	120,18	180,45	11,94	641	218000	217598	5,02	60,86	comp. (pc)
11	CoPa A521	29,58	119,20	180,30	12,87	789	234000	240102	5,59	68,10	comp. (pc)
12	CoPa A522	30,20	119,30	180,37	13,29	762	227500	236331	5,49	65,60	comp. (pc)
Média		29,68	120,13	179,75	12,63	728	218917	223159	5,17	62,58	
Desvio-padrão		0,27	0,75	0,84	0,79	76	12942	16351	0,38	4,51	
Coef. de variação (%)		0,91	0,62	0,47	6,27	10,43	5,91	7,33	7,44	7,21	

TABELA B.16 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 30 / 144 / 216 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B33	29,43	144,14	215,75	12,43	689	214000	216745	3,48	51,09	comp. (ple)
2	CoCa B34	29,32	144,01	216,75	12,32	693	214000	216047	3,46	51,17	comp. (pc)
3	CoCa A633	29,21	144,26	217,50	13,50	898	270000	282114	4,50	66,95	cis. (ple)
4	CoCa A634	29,21	144,31	217,00	13,72	856	266000	279739	4,47	66,36	cis. duplo
5	CoCaPa B133	29,22	144,38	216,30	11,99	699	202500	202466	3,24	47,99	comp. (pc)
6	CoCaPa B134	29,44	144,04	219,00	12,09	646	200000	200529	3,18	47,29	comp. (pc)
7	CoCaPa A433	29,20	144,45	216,80	12,84	901	281000	288079	4,60	68,30	comp. (pc), cis. duplo
8	CoCaPa A434	29,74	144,88	215,50	12,69	824	261000	266412	4,27	61,83	comp. (pc)
9	CoPa B233	29,51	143,59	219,75	12,74	701	211000	215694	3,42	50,90	comp. (pc)
10	CoPa B234	29,49	144,31	217,75	13,11	700	223500	230963	3,68	54,27	comp. (pc)
11	CoPa A533	29,24	144,67	217,00	12,93	831	260000	267228	4,26	63,17	cis. (duplo)
12	CoPa A534	29,10	144,28	220,00	13,40	867	258000	268844	4,23	64,03	cis. (duplo)
Média		29,34	144,28	217,43	12,81	775	238417	244572	3,90	57,78	
Desvio-padrão		0,18	0,33	1,47	0,55	95	29945	33627	0,53	8,02	
Coef. de variação (%)		0,62	0,23	0,67	4,31	12,25	12,56	13,75	13,71	13,87	

B.4

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PEÇA CENTRAL DE 48 MM

Nas tabelas B.17 a B.24 apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de resistência das ligações coladas paralelas com espessura da peça central $t_c = 48$ mm.

TABELA B.17 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 48 / 72 / 72$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c\text{méd}}$	$U_{\text{méd}}$	$d_{\text{méd}}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{\text{cola}}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B41	48,85	72,35	71,94	12,63	681	89000	90685	8,71	25,66	tração (pc), cis. duplo
2	CoCa B42	48,80	72,28	72,38	12,57	690	104000	105789	10,11	29,99	cis. duplo
3	CoCa A641	47,16	71,13	72,53	14,00	827	42500	45054	4,37	13,43	tração (pc), cis. duplo
4	CoCa A642	47,57	71,62	71,24	14,28	815	69000	73721	7,22	21,64	tração (pc), cis. duplo
5	Co B341	48,64	71,25	72,09	12,91	680	82500	84756	8,25	24,46	tração (pc), cis. (pld)
6	Co B342	48,73	70,96	71,75	13,09	672	95500	98636	9,69	28,53	cis. duplo
7	Co A741	47,49	71,96	71,56	13,22	821	59000	61167	5,94	17,90	tração (pc), cis. (ple)
8	Co A742	47,66	71,98	72,32	13,30	838	41500	43119	4,14	12,57	cis. (pld)
9	CoPa B241	48,78	72,07	70,88	13,30	673	89000	92474	9,05	26,30	cis. duplo
10	CoPa B242	48,49	71,20	72,14	13,34	680	104000	108192	10,53	31,34	cis. duplo
11	CoPa A541	47,61	71,88	69,93	12,96	752	72500	74598	7,42	21,80	cis. duplo
12	CoPa A542	47,30	72,19	71,46	13,10	789	96000	99182	9,61	29,05	cis. duplo
Média		48,09	71,74	71,68	13,23	743	78708	81448	7,92	23,55	
Desvio-padrão		0,67	0,49	0,74	0,50	70	21957	22253	2,52	7,38	
Coef. de variação (%)		1,40	0,68	1,03	3,76	9,44	27,90	27,32	32,51	32,00	

TABELA B.18 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 48 / 96 / 96$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B05	47,72	95,76	95,61	11,54	654	152000	149899	8,19	32,80	cis.
2	CoCa B06	48,09	96,03	94,82	11,32	631	173000	169473	9,31	36,70	tração normal (pc)
3	CoCa A605	46,97	95,84	95,94	13,46	881	187000	195214	10,62	43,37	tração (pc), cis. duplo
4	CoCa A606	47,05	95,89	95,01	13,77	828	126000	132697	7,28	29,41	tração (pc), cis. (ple)
5	CoCaPa B105	47,21	95,93	96,06	12,54	690	101000	102646	5,57	22,66	cis. (pld)
6	CoCaPa B106	46,92	96,04	96,82	12,48	696	150000	152160	8,18	33,77	cis. (ple)
7	CoCaPa A405	47,15	96,03	97,30	12,86	838	197000	202110	10,82	44,64	comp. (pc), cis.(pld)
8	CoCaPa A406	46,95	95,93	96,26	13,29	857	205000	212921	11,53	47,27	cis. duplo
9	CoPa B205	47,45	95,91	96,32	12,45	671	129000	130735	7,08	28,73	tração (pc), cis. (ple)
10	CoPa B206	46,87	96,06	97,27	12,67	736	79500	81093	4,34	18,01	cis. (pld)
11	CoPa A505	47,05	95,89	95,52	12,94	872	198000	203590	11,11	45,13	cis. (pld), tração (pc)
12	CoPa A506	47,43	98,43	93,98	13,45	852	177000	184704	9,98	39,56	tração (pc), cis (duplo)
Média		47,24	96,15	95,91	12,73	767	156208	159770	8,67	35,17	
Desvio-padrão		0,37	0,73	1,00	0,74	96	40558	42313	2,30	9,33	
Coef. de variação (%)		0,78	0,75	1,04	5,85	12,47	25,96	26,48	26,49	26,52	

TABELA B.19 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 48 / 72 / 108 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B47	48,54	72,32	110,04	12,74	673	137000	140026	8,80	39,89	tração (pc), cis. (ple)
2	CoCa B48	48,90	72,35	110,18	12,44	720	86000	87143	5,47	24,63	cis. duplo
3	CoCa A647	47,35	72,06	109,77	13,61	851	153500	160935	10,17	47,17	tração (pc), cis. duplo
4	CoCa A648	47,36	71,89	109,58	13,86	829	170000	179489	11,39	52,72	tração (pc), cis. (pld)
5	Co B347	48,68	71,85	109,06	13,28	691	101500	105402	6,73	30,13	cis. duplo
6	Co B348	48,59	71,78	109,21	13,54	649	105000	109856	7,01	31,50	cis. (pld)
7	Co A747	47,45	72,15	109,84	13,19	840	169500	175563	11,08	51,28	tração (pc), cis. (duplo)
8	Co A748	47,33	72,27	109,97	13,20	814	165000	170960	10,76	49,98	tração (pc), cis. (duplo)
9	CoPa B247	48,75	72,25	109,32	13,01	643	142000	146302	9,26	41,54	tração (pc), cis. (pld)
10	CoPa B248	48,78	72,78	109,18	12,48	666	126500	128339	8,08	36,15	cis. duplo
11	CoPa A547	47,43	72,33	108,91	13,48	862	127000	132639	8,42	38,66	cis. (pld)
12	CoPa A548	47,13	72,26	109,94	13,49	856	182500	190682	12,00	55,99	comp. (pc), cis. duplo
Média		48,02	72,19	109,58	13,20	758	138792	143945	9,10	41,64	
Desvio-padrão		0,72	0,27	0,43	0,45	91	30680	32658	2,05	9,95	
Coef. de variação (%)		1,50	0,38	0,39	3,41	11,97	22,10	22,69	22,56	23,89	

TABELA B.20 – Resistência de LCP: $t_c / b_c / h_c = 48 / 120 / 120$ (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	t_c	b_c	$h_{c,méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B17	45,87	119,20	122,83	12,12	690	167000	167584	5,72	30,65	tração (pc), comp. (ple, pld)
2	CoCa B18	45,72	119,53	121,69	12,10	643	200000	200576	6,89	36,70	cis. (pld)
3	CoCa B Z11	47,56	118,95	123,26	11,84	733	274420	273114	9,31	48,28	cis. (pld)
4	CoCa B Z15	47,50	119,24	123,96	11,57	705	177020	174732	5,91	30,85	cis. (pld)
5	CoCa A617	45,89	119,63	123,84	14,12	888	160000	170176	5,74	31,00	cis. (pld)
6	CoCa A618	45,20	119,86	121,51	13,45	847	137000	142941	4,91	26,38	cis. duplo
7	CoCa A618-B	46,05	119,30	122,27	13,49	854	161500	168709	5,78	30,71	cis. (pld)
8	CoCaPa B117	45,48	119,15	120,09	12,33	650	262000	264576	9,25	48,82	tração(pc), comp.(ple), cis.(pld)
9	CoCaPa B118	45,36	119,19	121,58	12,24	638	245000	246774	8,52	45,64	tração (pc), comp. (ple)
10	CoCaPa BY 11	47,55	119,46	122,22	12,09	811	259990	260702	8,93	45,90	comp. (pc)
11	CoCaPa BY 15	47,55	119,48	122,49	11,49	739	231110	227561	7,77	40,05	comp. (pc)
12	CoCaPa A417	46,34	119,35	121,32	13,28	848	254000	263750	9,11	47,69	tração (pc), comp. (pc)
13	CoCaPa A418	46,11	118,14	122,17	13,09	834	291000	300508	10,41	55,17	tração (pc), cis. (ple)

TABELA B.20 – Resistência de LCP: tc/bc/hc = 48 / 120 / 120 (mm) – Continuação

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	Tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
14	CoPa B217	45,66	119,35	121,90	12,13	660	199000	199806	6,87	36,66	cis duplo
15	CoPa B218	45,53	119,38	121,76	12,01	632	173500	173545	5,97	31,93	cis duplo
16	CoPa BX11	47,57	119,64	123,55	12,09	811	207520	208088	7,04	36,56	cis duplo
17	CoPa BX13	47,78	119,10	122,66	12,00	740	255980	255980	8,76	44,98	cis. duplo
18	CoPa BX15	47,70	119,12	123,62	11,49	739	284400	280033	9,51	49,28	cis. duplo
19	CoPa A517	46,01	119,03	120,88	13,39	880	254000	264605	9,20	48,32	tração (pc), cis. (ple)
20	CoPa A518	46,06	119,02	121,34	12,96	810	251000	258197	8,94	47,10	tração (pc), cis. (ple)
Média		46,42	119,26	122,25	12,46	758	222272	225098	7,73	44,11	
Desvio-padrão		0,93	0,35	1,04	0,77	87	47269	47237	1,65	6,55	
Coef. de variação (%)		2,00	0,30	0,85	6,14	11,52	21,27	20,98	21,38	14,85	

TABELA B.21 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 48 / 96 / 144 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B11	47,31	96,03	145,55	12,68	771	192000	195907	7,01	43,12	cis. duplo
2	CoCa B12	47,87	95,98	144,05	12,56	722	224500	228294	8,26	49,69	comp. (ple)
3	CoCa A611	46,85	95,97	145,47	14,22	869	227000	242121	8,67	53,85	tração (pc), cis. duplo
4	CoCa A612	47,22	97,92	146,69	13,07	879	239000	246657	8,59	53,35	tração (pc), cis. (pld)
5	CoCaPa B111	47,27	94,32	142,63	12,20	713	155000	155945	5,80	34,98	cis. duplo
6	CoCaPa B112	47,33	95,93	143,75	12,35	732	153500	155119	5,62	34,16	cis. duplo
7	CoCaPa A411	47,05	96,09	144,04	13,22	884	250000	259134	9,36	57,32	cis. (pld)
8	CoCaPa A412	47,01	95,98	146,74	13,50	863	228000	238292	8,46	52,81	comp. (pc), cis. (ple)
9	CoPa B211	47,22	96,01	143,67	12,32	714	193500	195339	7,08	43,09	tração (pc), cis (ple)
10	CoPa B212	47,20	95,78	144,83	12,51	710	231500	235072	8,47	52,00	tração (pc), cis duplo
11	CoPa A511	47,20	96,60	146,75	12,79	890	232000	237472	8,38	52,08	tração (pc), cis (ple)
12	CoPa A512	47,26	96,50	146,25	12,96	834	270000	277784	9,84	60,91	tração (pc), comp. (ple,pc)
Média		47,23	96,09	145,03	12,87	798	216333	222261	7,96	48,95	
Desvio-padrão		0,24	0,80	1,41	0,58	77	35857	38667	1,31	8,38	
Coef. de variação (%)		0,52	0,83	0,97	4,49	9,68	16,57	17,40	16,51	17,13	

TABELA B.22 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 48 / 144 / 144 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B29	46,24	144,31	146,49	11,99	710	292000	291953	6,91	43,75	tração (pc), cis.
2	CoCa B30	46,09	144,28	146,24	11,98	701	288000	287855	6,82	43,29	tração (pc) , comp(ple)
3	CoCa A629	44,68	140,38	145,81	14,24	824	208000	221986	5,42	35,39	cis. duplo
4	CoCa A630	44,21	142,80	146,27	14,28	838	234000	249982	5,98	39,60	cis. (ple)
5	CoCaPa B129	45,85	144,43	145,50	12,43	728	287000	290717	6,92	43,90	tração (pc), comp(ple)
6	CoCaPa B130	45,96	144,78	145,02	12,35	706	302000	305152	7,27	45,86	comp. (ple)
7	CoCaPa A429	44,57	141,04	145,71	13,82	867	292500	308460	7,50	49,07	cis. duplo
8	CoCaPa A430	44,48	143,08	146,48	13,09	836	371000	383111	9,14	60,20	cis. duplo
9	CoPa B229	44,84	144,10	145,21	13,55	717	307000	321286	7,68	49,72	tração (pc), cis duplo
10	CoPa B230	44,73	143,98	145,44	12,29	734	297000	299589	7,15	46,52	tração (pc), cis (ple)
11	CoPa A529	44,92	142,62	142,17	13,05	811	337500	348136	8,58	54,34	tração (pc), cis. (ple)
12	CoPa A530	44,88	141,40	146,75	13,24	850	305000	316315	7,62	49,84	cis. (duplo)
Média		45,12	143,10	145,59	13,03	777	293417	302045	7,25	46,79	
Desvio-padrão		0,71	1,48	1,21	0,83	65	41852	41427	1,00	6,55	
Coef. de variação (%)		1,57	1,03	0,83	6,34	8,42	14,26	13,72	13,86	14,00	

TABELA B.23 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 48 / 120 / 180 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B23	45,26	120,07	182,20	11,70	715	257000	254684	5,82	46,87	comp. (ple), comp. (pc)
2	CoCa B24	45,11	120,05	186,50	11,73	704	280000	277770	6,20	51,29	comp. (pc), (ple)
3	CoCa A623	46,17	121,19	181,50	13,40	856	302000	314673	7,15	56,24	cis. (ple)
4	CoCa A624	46,08	120,45	179,30	13,71	884	328000	344847	7,98	62,13	tração (pc), cis. (pld)
5	CoCaPa B123	45,08	120,11	182,94	11,83	666	283000	281530	6,41	51,99	tração (pc), cis. duplo
6	CoCaPa B124	45,82	120,11	182,55	11,88	694	284000	282942	6,45	51,41	tração (pc), comp. (pc,pld,ple)
7	CoCaPa A423	46,12	121,68	181,40	13,55	886	282000	295125	6,69	52,59	comp. (ple), cis. (pld)
8	CoCaPa A424	46,14	121,86	180,50	13,63	807	305500	320412	7,28	56,99	tração(pc), comp.(pld,ple)
9	CoPa B223	44,87	119,97	181,30	12,16	725	290000	291360	6,70	54,13	comp. (pc)
10	CoPa B224	45,33	120,04	181,35	12,04	681	271000	271339	6,23	49,87	comp. (ple), cis (pld)
11	CoPa A523	46,78	119,20	182,19	13,68	863	333000	349737	8,05	62,72	tração(pc), comp.(ple,pld)
12	CoPa A524	46,18	118,44	182,29	13,68	893	337500	354493	8,21	64,81	tração (pc), cis (duplo)
	Média	45,75	120,26	182,00	12,75	781	296083	303243	6,93	55,09	
	Desvio-padrão	0,59	0,96	1,72	0,91	91	25563	33111	0,80	5,62	
	Coef. de variação (%)	1,30	0,80	0,95	7,13	11,69	8,63	10,92	11,54	10,19	

TABELA B.24 – Resistência de LCP: tc / bc / hc = 48 / 144 / 216 (mm)

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força		Tensões médias		Tipo de ruptura
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	Fu - U	Fu (U=12%)	$\tau_{gv0} - A_{cola}$	$\sigma_{c0} - pc$	
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)	
1	CoCa B35	44,83	144,59	216,50	12,39	761	292000	295428	4,72	45,58	comp. (ple)
2	CoCa B36	44,96	144,43	218,50	12,04	689	286000	286367	4,54	44,10	comp.(ple,pc), cis. duplo
3	CoCa A635	48,19	143,98	217,75	14,05	924	465000	493660	7,87	71,15	cis. duplo
4	CoCa A636	45,21	142,51	219,50	13,89	891	423000	446952	7,14	69,37	cis. (ple)
5	CoCaPa B135	44,59	144,27	218,25	12,58	712	344000	350028	5,56	54,41	comp. (pc)
6	CoCaPa B136	44,63	144,31	220,00	13,01	740	334000	344114	5,42	53,43	comp. (ple, pld)
7	CoCaPa A435	45,44	143,80	219,00	12,91	923	394000	404724	6,43	61,94	cis. (pld)
8	CoCaPa A436	45,13	144,57	217,50	12,75	864	365000	373239	5,93	57,21	cis. (ple)
9	CoPa B235	44,77	144,39	218,00	11,85	733	358500	356857	5,67	55,20	cis. (ple), comp. (pld)
10	CoPa B236	45,84	144,35	217,50	12,29	695	361500	364642	5,81	55,11	comp. (ple, pld, pc)
11	CoPa A535	45,12	144,05	218,00	12,80	871	420000	430093	6,85	66,17	tração (pc), comp. (ple,pld), cis. duplo
12	CoPa A536	45,17	144,35	217,75	13,14	872	421000	435408	6,93	66,78	cis. (ple)
	Média	45,32	144,13	218,19	12,81	806	372000	381793	6,07	58,37	
	Desvio-padrão	0,97	0,56	0,95	0,67	92	54610	62141	1,00	8,83	
	Coef. de variação (%)	2,14	0,39	0,44	5,20	11,43	14,68	16,28	16,45	15,13	

B.5

RIGIDEZ DE LIGAÇÕES SOB FORÇA CENTRADA

Nas TAB. B.25 a B.27, apresentam-se os resultados das rigidezes de ligações coladas paralelas sob força centrada com madeira de menor densidade para, respectivamente, $t_c = 24$ mm, $t_c = 30$ mm e $t_c = 48$ mm.

Nas FIG. B.1, apresentam-se os gráficos força x deslocamento e as correspondentes retas de correlações obtidas nos ensaios para os seguintes corpos-de-prova: CoCa Z5 ($t_c = 24$ mm), CoCaPa Y10 ($t_c = 30$ mm) e CoPa X15 ($t_c = 24$ mm).

Nas FIG. B.2 a B.4, apresentam-se os gráficos força x deslocamento obtidos nos ensaios para, respectivamente, os seguintes tipos de ligação: colada e cavilhada (série CoCaZ), colada, cavilhada e parafusada (série CoCaPaY) e colada e parafusada (série CoPaX).

TABELA B.25 – Rigidez de LCP, $t_c = 24$ mm

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força	Rigidez - S_{lig} (N/mm)			
					(TI, 10%-50% $F_{m\acute{a}x}$)		(TI, 20%-50% $F_{m\acute{a}x}$)	
O	Ligação	(%)	(kg/m^3)	(N)	U	U=12%	U	U=12%
1	CoCa Z1	11,18	633	164608	285631	280957	310272	305196
2	CoCa Z5	11,28	672	201600	326258	321561	350406	345360
3	CoCaPa Y1	11,55	693	206832	325589	322681	347827	344721
4	CoCaPa Y5	11,58	625	157405	296786	294286	316561	313894
5	CoPa X1	11,55	693	180124	299159	296487	322501	319621
6	CoPa X3	12,00	700	179470	277328	277328	300734	300734
7	CoPa X5	11,58	625	166756	287544	285122	312025	309396
média		11,53	663	179542	299756	296917	322904	319846
Desvio-padrão		0,26	34,30	18745	19281	18510	19093	18231
Coef. de var. (%)		2,27	5,17	10,44	6,43	6,23	5,91	5,70

TABELA B.26 – Rigidez de LCP, $t_c = 30$ mm

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força	Rigidez - S_{lig} (N/mm)			
					(TI, 10%-50% $F_{m\acute{a}x}$)		(TI, 20%-50% $F_{m\acute{a}x}$)	
O	Ligação	(%)	(kg/m^3)	(N)	U	U=12%	U	U=12%
1	CoCa Z6	11,63	751	207306	355102	352455	382918	380064
2	CoCa Z10	11,73	767	202854	366122	364181	393319	391233
3	CoCaPa Y6	11,80	741	195391	326343	325017	348930	347512
4	CoCaPa Y10	12,41	801	227201	369890	372934	395515	398770
5	CoPa X6	11,80	741	193602	364226	362746	389102	387520
6	CoPa X8	12,00	760	189420	328028	328028	355349	355349
7	CoPa X10	12,41	801	232131	380680	383813	405783	409122
média		11,97	766	206843	355770	355596	381560	381367
Desvio-padrão		0,32	25,78	16733	20955	22085	21331	22484
Coef. de var. (%)		2,69	3,37	8,09	5,89	6,21	5,59	5,90

TABELA B.27 – Rigidez de LCP, $t_c = 48$ mm

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força	Rigidez - S_{lig} (N/mm)			
O	Ligação	(%)	(kg/m ³)	(N)	(TI, 10%-50% $F_{máx}$)		(TI, 20%-50% $F_{máx}$)	
					U	U=12%	U	U=12%
1	CoCa Z11	11,84	733	273114	428568	427208	456753	455304
2	CoCa Z15	11,57	705	174732	353018	349975	456753	452816
3	CoCaPa Y11	12,09	811	260702	399170	399898	423675	424448
4	CoCaPa Y15	11,49	739	227561	382591	378674	410778	406573
5	CoPa X11	12,09	811	208088	363864	364528	395451	396172
6	CoPa X13	12,00	740	255980	378922	378922	407033	407033
7	CoPa X15	11,49	739	280033	419912	415613	444528	439977
média		11,80	754	240030	389435	387831	427853	426046
Desvio-padrão		0,28	40,89	38332	27966	27711	24969	23813
Coef. de var. (%)		2,35	5,42	15,97	7,18	7,15	5,84	5,59

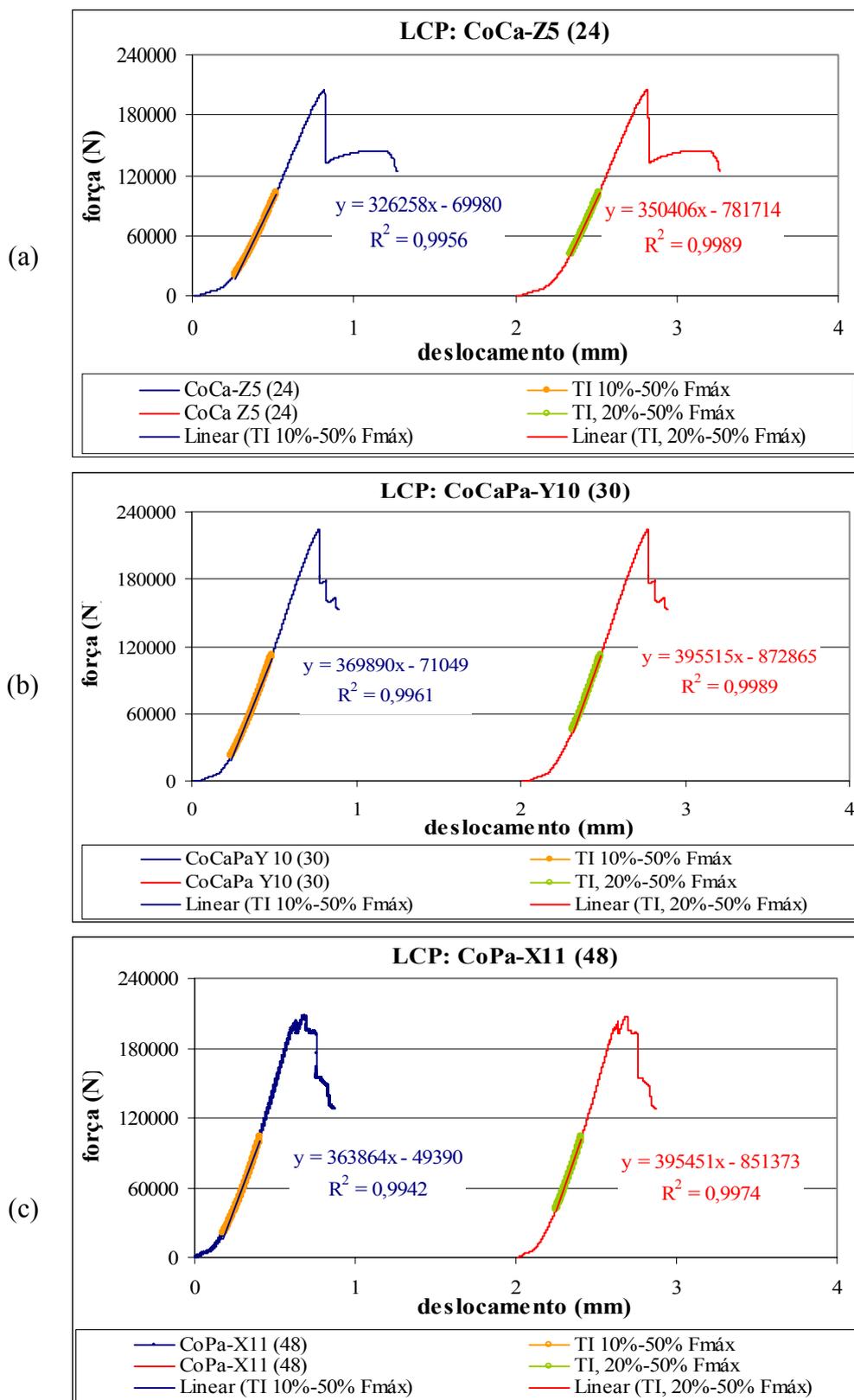
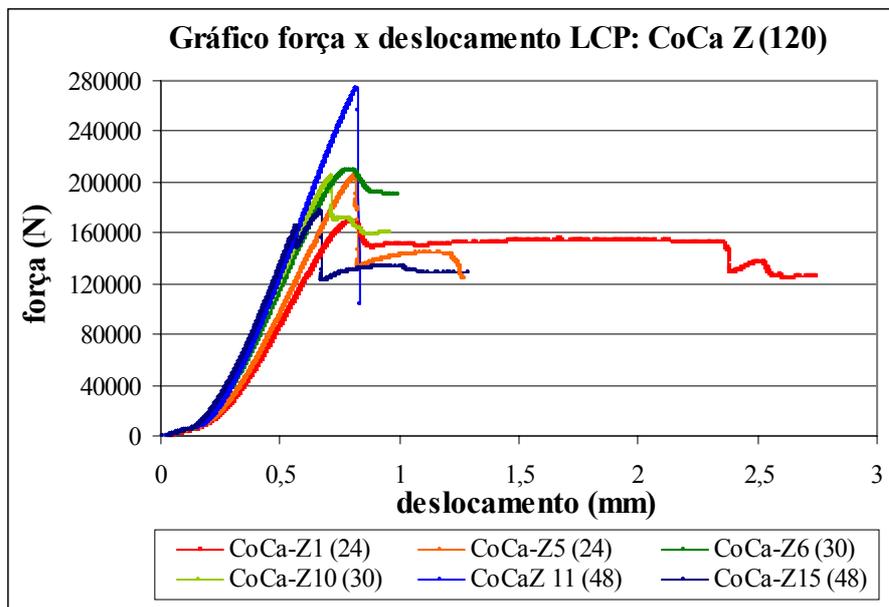
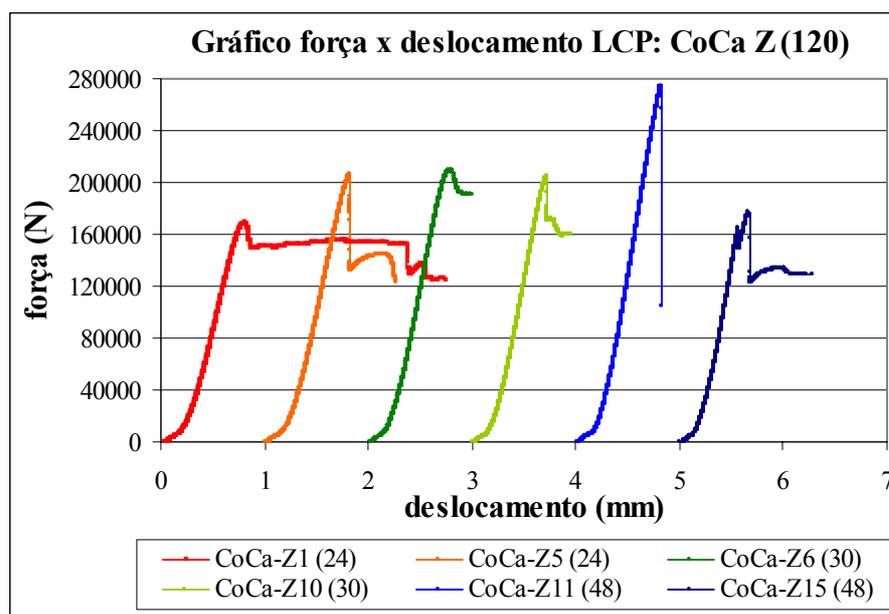


FIGURA B.1 - Gráficos Força x Deslocamento, LCP: a) CoCa Z5, $t_c = 24$ mm;
b) CoCaPa Y10, $t_c = 30$ mm; c) CoPa X11, $t_c = 48$ mm

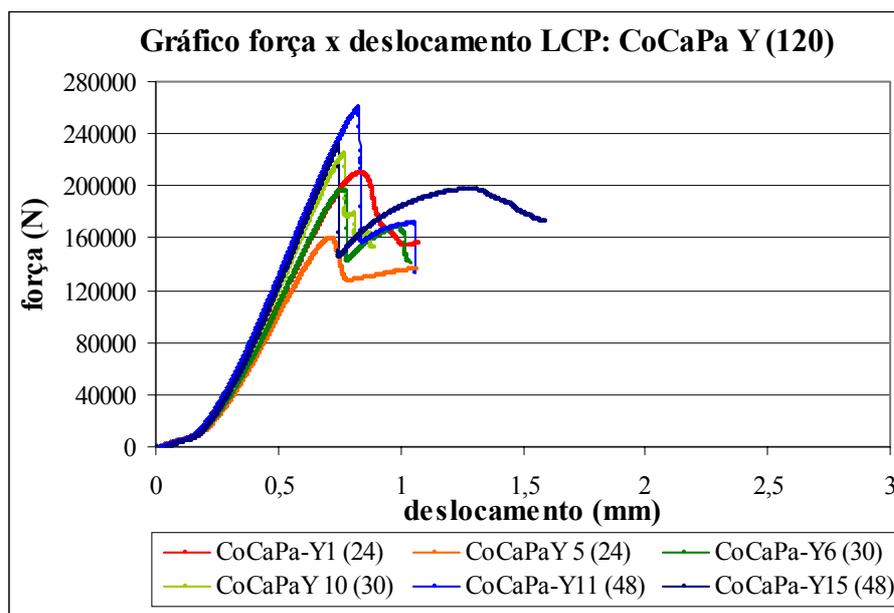


(a)

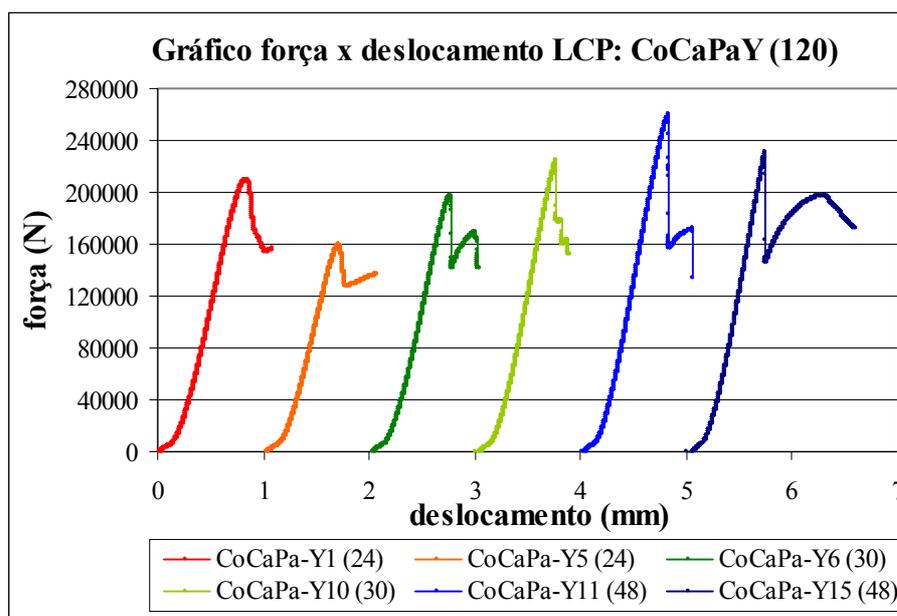


(b)

FIGURA B.2 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoCa, $bc = hc = 120$ mm,
 Madeira BD : a) Sobrepostos; b) Deslocados

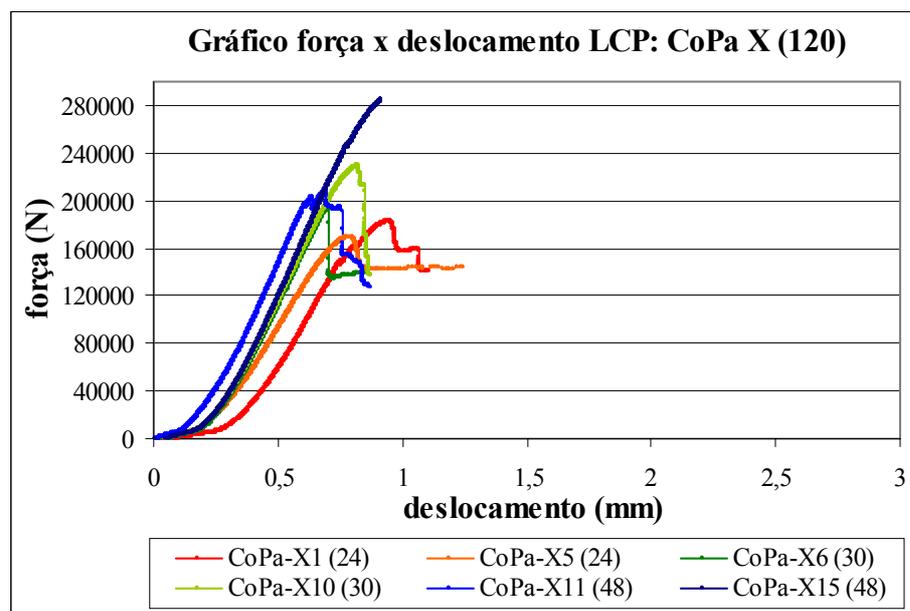


(a)

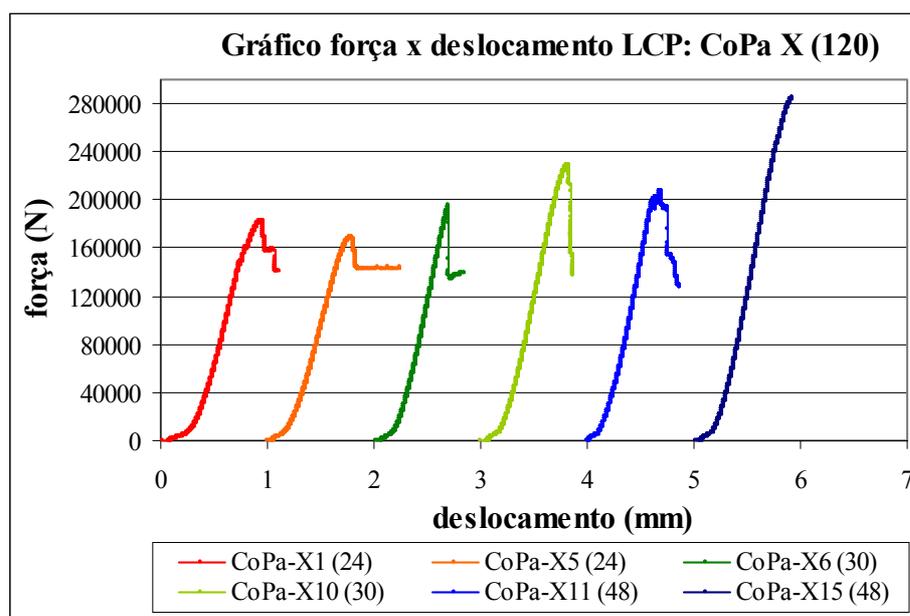


(b)

FIGURA B.3 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoCaPa, $bc = hc = 120$ mm,
Madeira BD: a) Sobrepostos; b) Deslocados



(a)



(b)

FIGURA B.4 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoPa, $bc = hc = 120$ mm,
Madeira BD: a) Sobrepostos; b) Deslocados

B.6

RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE LIGAÇÕES SOB FORÇA EXCÊNTRICA

Nas TAB. B.28 a B.30, apresentam-se os resultados das rigidezes de ligações coladas paralelas sob força excêntrica com madeira de menor densidade para, respectivamente, $t_c = 24$ mm, $t_c = 30$ mm e $t_c = 48$ mm.

Nas FIG. B.5 a B.7, apresentam-se os gráficos força x deslocamentos obtidos nos ensaios de ligações coladas normais sob força excêntrica. Nas FIG. B.8 a B.10, apresentam-se os gráficos força x deslocamentos sobrepostos obtidos nos ensaios de ligações coladas normais sob força centrada e sob força excêntrica.

TABELA B.28 – Resistência e Rigidez de LCP Sob Força Excêntrica, $t_c = 24$ mm

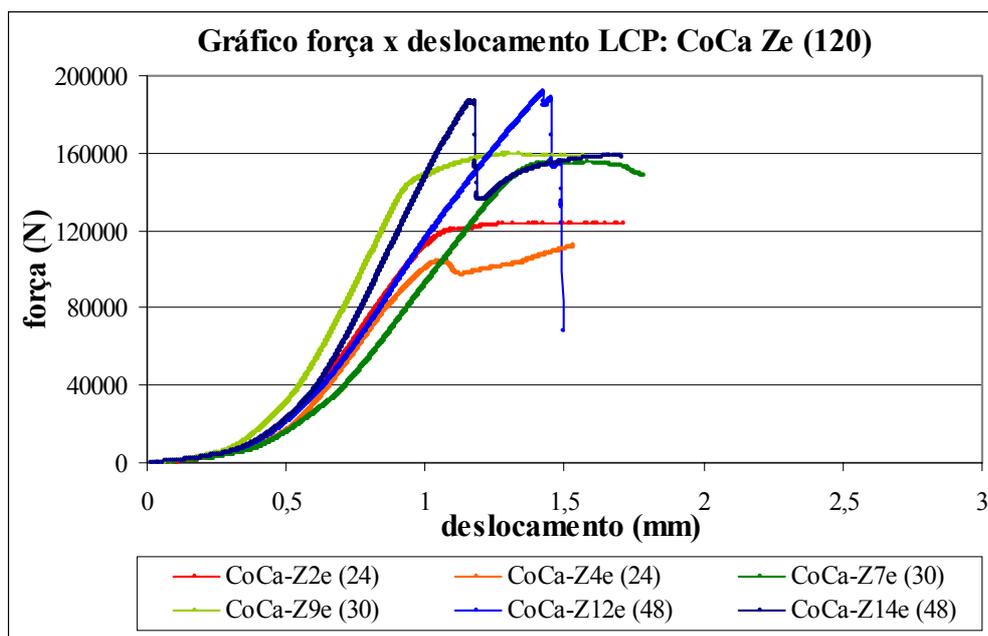
Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força			Rigidez		Tensões médias	
Num.	Ligação	t_c	bc	$hc_{méd}$	$U_{méd}$	$d_{méd}$	$F_{0,2\%}$	$F_{máx}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}	τ_{gv0}	σ_{c0}
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa Z2e	23,76	120,86	125,27	11,27	649	123500	124100	120795	155954	153677	3,99	42,1
2	CoCa Z4e	23,8	120,92	123,70	11,49	633	104000	112120	102409	158498	156881	3,42	35,6
3	CoCaPa Y2e	23,81	120,99	124,92	11,55	693	101770	117420	100396	171784	170238	3,32	34,9
4	CoCaPa Y4e	23,77	120,74	124,80	11,58	625	117500	127230	116020	165547	164156	3,85	40,4
5	CoPa X2e	23,82	120,80	124,62	11,51	669	121750	122370	119960	137883	136532	3,98	41,7
6	CoPa X4e	23,94	120,85	124,62	11,41	635	135750	140440	133347	167957	165975	4,43	46,1
Média		23,82	120,86	124,65	11,47	651	117378	123947	115488	159604	157910	3,83	40,12
Desvio-padrão		0,06	0,09	0,53	0,11	25,92	12781	9673	12379	12164	12100	0,408	4,250
Coef. de var. (%)		0,27	0,07	0,42	0,99	3,98	10,89	7,80	10,72	7,62	7,66	10,63	10,59

TABELA B.29 – Resistência e Rigidez de LCP Sob Força Excêntrica, $t_c = 30$ mm

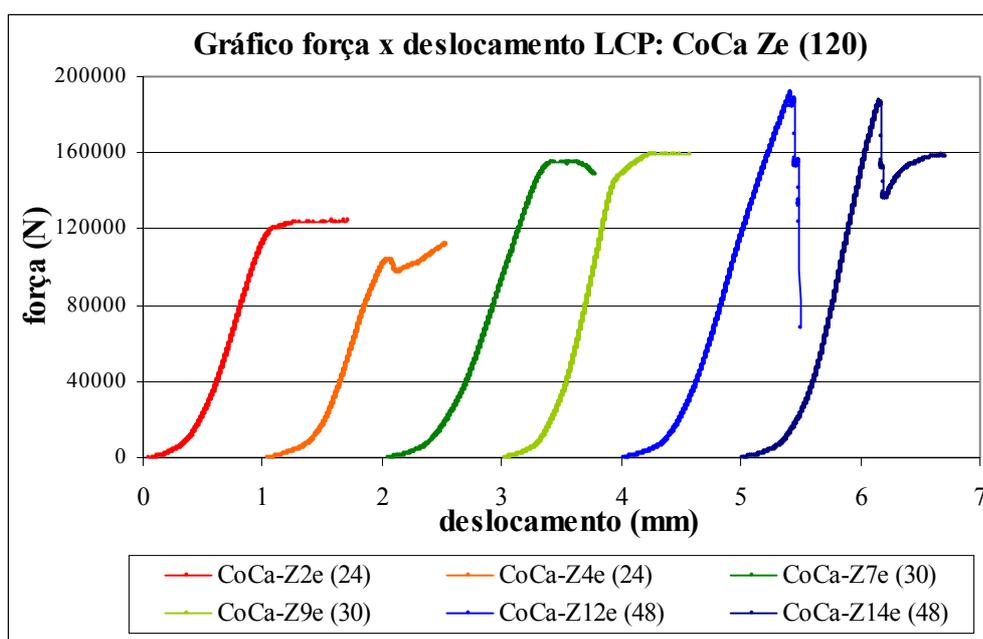
Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umid.	Dens.	Força			Rigidez		Tensões médias	
Num.	Ligação	Tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%}	F _{máx}	F _{0,2%}	S _{lig}	S _{lig}	τ_{gv0}	σ_{c0}
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(U=12%) (N)	(N/mm)	(N/mm)	(A _{cola}) (MPa)	(pc) (MPa)
1	CoCa Z7e	29,56	120,89	123,83	12,18	780	155240	155240	156078	150544	151086	5,21	43,7
2	CoCa Z9e	28,39	120,84	124,00	11,57	735	159250	159430	157196	208941	207144	5,25	45,8
3	CoCaPa Y7e	28,43	120,95	123,81	11,80	741	129000	140710	128226	177129	176420	4,28	37,3
4	CoCaPa Y9e	29,48	121,05	123,98	12,41	801	133250	148170	134889	190041	191599	4,49	37,8
5	CoPa X7e	28,33	120,97	123,77	11,90	768	147500	152050	147058	179033	178675	4,91	42,9
6	CoPa X9e	29,42	120,61	124,14	11,81	767	148250	155390	147405	179259	178578	4,92	41,5
	Média	28,94	120,89	123,92	11,94	765	145415	151832	145142	180825	180584	4,84	41,5
	Desvio-padrão	0,61	0,15	0,14	0,30	24,61	11981	6621	11532	19035	18558	0,387	3,37
	Coef. de var. (%)	2,10	0,13	0,12	2,53	3,22	8,24	4,36	7,95	10,53	10,28	7,98	8,12

TABELA B.30 – Resistência e Rigidez de LCP Sob Força Excêntrica, $t_c = 48$ mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas			Umíd.	Dens.	Força			Rigidez		Tensões médias	
Num.	Ligação	tc	bc	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%}	F _{máx}	F _{0,2%}	S _{lig}	S _{lig}	τ_{gv0}	σ_{c0}
		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa Z12e	47,5	119,32	123,08	11,71	706	191460	191460	189794	185152	184078	6,46	33,5
2	CoCa Z14e	47,56	119,47	122,58	11,54	713	187000	187000	184419	224942	222873	6,30	32,5
3	CoCaPa Y12e	47,63	119,3	123,46	12,09	811	176230	176230	176706	180113	180437	6,00	31,1
4	CoCaPa Y14e	47,54	119,54	123,40	11,49	739	233120	233120	229553	259578	256930	7,78	40,4
5	CoPa X12e	47,32	119,20	123,92	11,73	738	197550	197550	195950	204417	203313	6,63	34,7
6	CoPa X14e	47,63	119,38	122,78	11,52	722	200660	200660	197770	229933	227726	6,75	34,8
Média		47,53	119,37	123,20	11,68	738	197670	197670	195699	214023	212559	6,65	34,5
Desvio-padrão		0,11	0,12	0,49	0,22	37,98	19379	19379	18294	30078	29099	0,612	3,21
Coef. de var. (%)		0,24	0,10	0,40	1,92	5,14	9,80	9,80	9,35	14,05	13,69	9,20	9,32



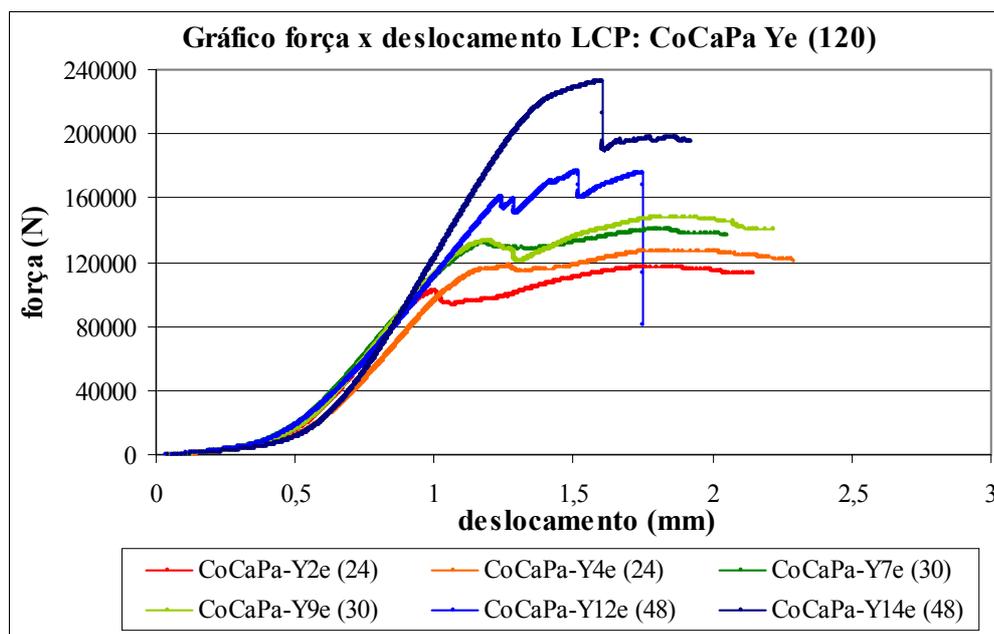
(a)



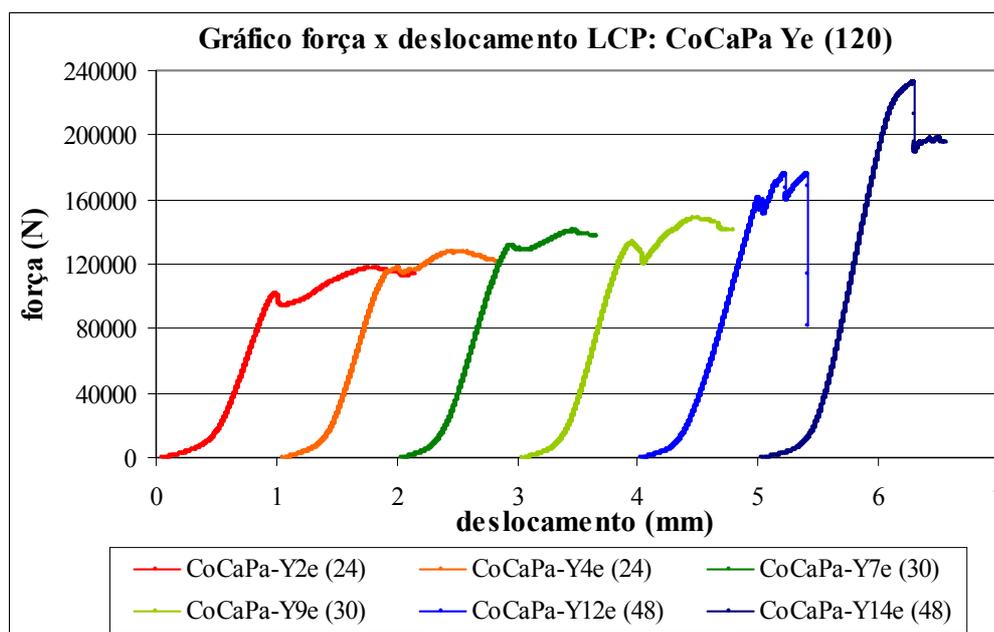
(b)

FIGURA B.5 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoCa, Força Excêntrica:

a) Sobrepostos; b) Deslocados



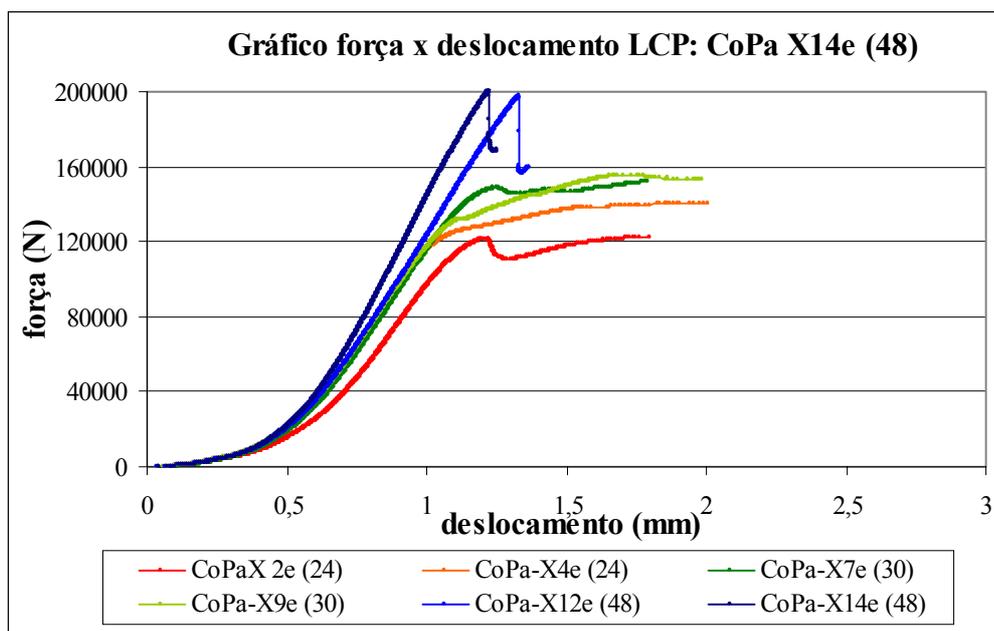
(a)



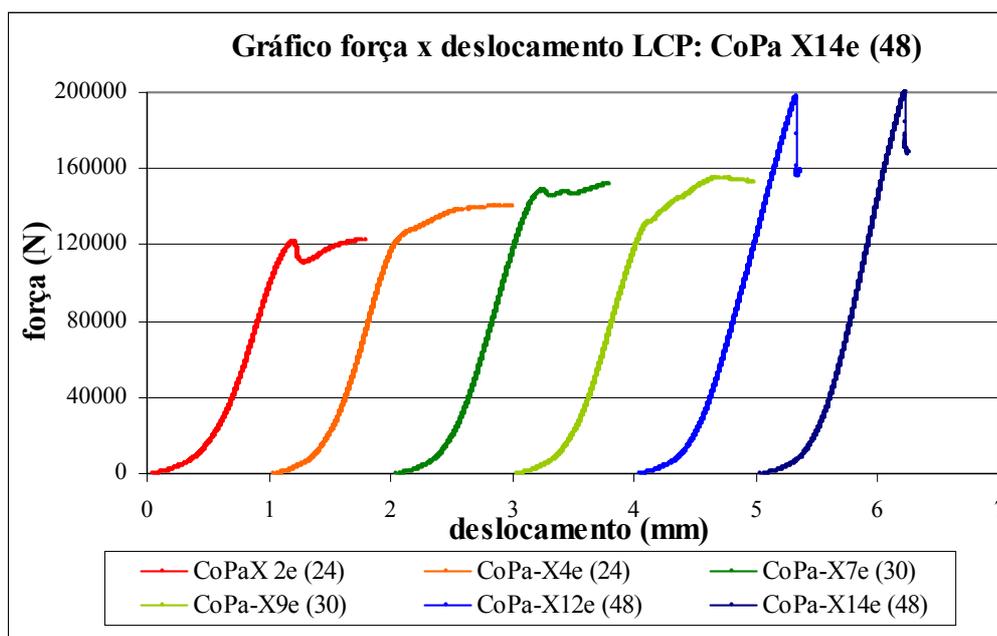
(b)

FIGURA B.6 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoCaPa, Sob Força Excêntrica:

a) Sobrepostos; b) Deslocados



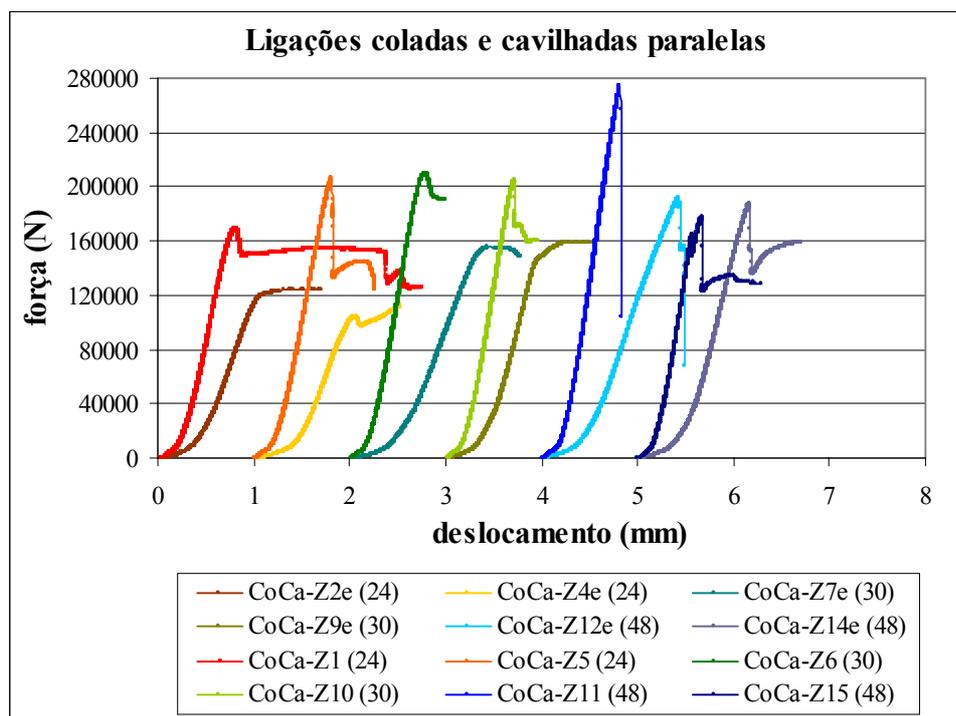
(a)



(b)

FIGURA B.7 – Gráficos Força x Deslocamento, LCP, CoPa, força excêntrica:

a) Sobrepostos; b) Deslocados



FIGURAB.8 – Gráfico Força x Deslocamento, LCP, Sob Força Centrada (CoCa Z) e Sob Força Excêntrica (CoCa Ze)

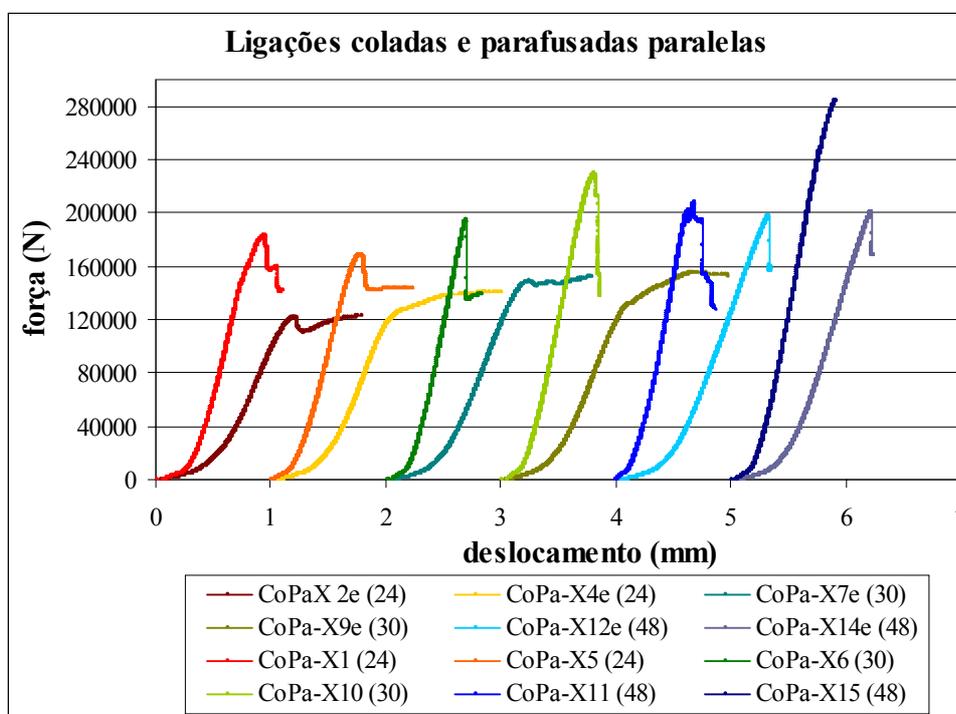


FIGURA B.9 – Gráfico Força x Deslocamento, LCP, Sob Força Centrada (CoPa X) e Sob Força Excêntrica (CoPa Xe)

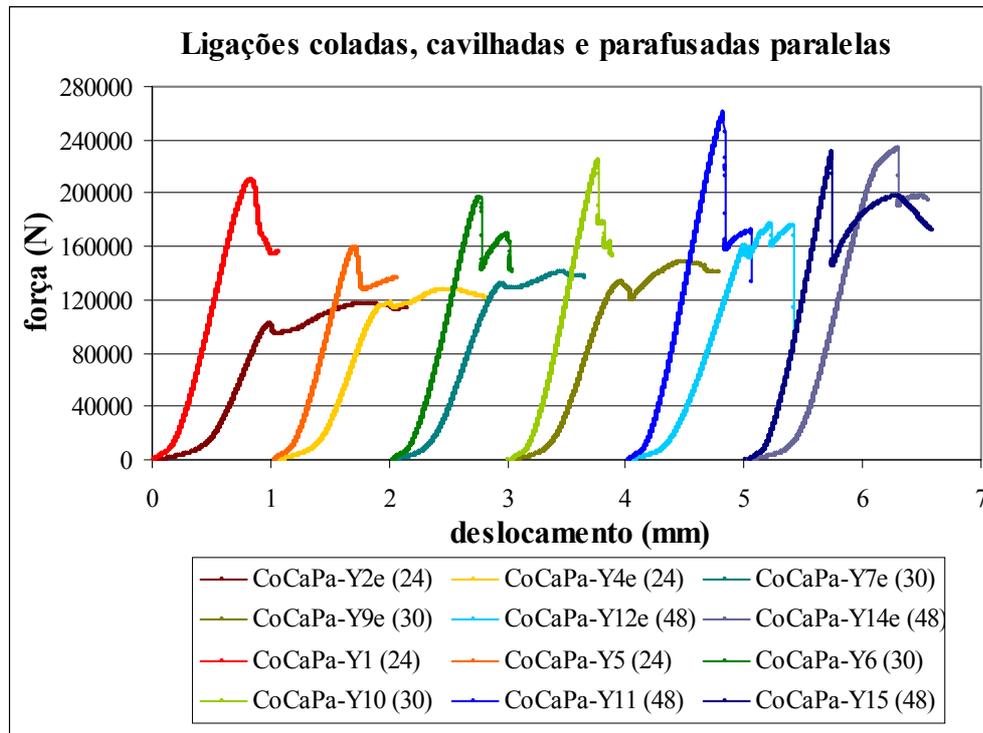


FIGURA B.10 – Gráfico Força x Deslocamento de LCP, Sob Força Centrada (CoCaPa Y) e Sob Força Excêntrica (CoCaPa Ye)

ANEXO C**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIGAÇÕES
COLADAS NORMAIS**

C.1

INTRODUÇÃO

Nas tabelas de resultados dos ensaios de ligações coladas normais são apresentadas as dimensões principais de cada corpo-de-prova e os resultados mais significativos obtidos, relacionados a seguir:

- t_c , espessura da peça central;
- b_c , largura da peça central e da lâmina de cola;
- b_l , comprimento das peças laterais;
- $h_{c\text{méd}}$, altura média das superfícies coladas;
- $U_{\text{méd}}$, teor de umidade médio das peças componentes do corpo-de-prova;
- $d_{\text{méd}}$, densidade aparente média;
- $F_{0,2\%}$, força ou resistência convencional;
- $F_{0,2\%}(U=12\%)$, força ou resistência convencional corrigida para o teor de umidade de referência de 12%;
- $F_{\text{máx}}$, força ou resistência máxima;
- τ_{gv90} , tensão média de cisalhamento na superfície colada, para $F_{0,2\%}(U=12\%)$;
- σ_{c90} , tensão média de compressão normal nas peças laterais, para $F_{0,2\%}(U=12\%)$;

C.2

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM MADEIRA BD

2.1 Ligações Coladas Normais com $b_l = 180$ mm

Nas TAB. C.1 a C.4, apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de avaliação da resistência das ligações coladas normais, com corpos-de-prova de madeira de menor densidade e comprimento das peças laterais $B_l = 180$ mm, agrupados por dimensões b_c/h_c iguais, respectivamente, a 72 mm, 96 mm, 120 mm e 144 mm.

TABELA C.1 – Resistência de LCN, BD, $bc = hc = 72 \text{ mm}$

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa B1	24,49	72,47	113,01	71,60	11,46	729	36000	35412	43620	6,48	3,41
2	CoCa 02	24,57	72,70	113,12	72,98	10,62	693	36750	35234	48254	6,34	3,32
3	CoCa 03	29,53	72,66	112,76	72,55	11,14	671	32750	31905	41409	5,82	3,03
4	CoCa 04	29,76	72,32	113,12	71,38	11,09	687	32500	31617	41789	5,75	3,06
5	CoCa 05	48,79	72,45	112,44	72,52	11,18	674	37250	36339	40044	6,62	3,46
6	CoCa 06	48,74	72,88	113,05	72,27	10,90	658	35000	33842	44240	6,11	3,21
7	Co 301	24,00	72,04	113,17	72,73	11,72	713	30500	30242	30597	5,53	2,89
8	Co 302	24,29	72,42	113,20	71,75	11,99	710	35750	35735	35748	5,38	3,44
9	Co 303	29,68	72,37	113,42	72,54	11,77	661	29250	29046	29292	5,30	2,77
10	Co 304	29,63	72,35	113,08	72,84	11,69	697	34750	34431	34730	6,27	3,27
11	Co 305	48,84	73,34	113,21	73,41	11,43	678	36750	36117	38190	6,58	3,35
12	Co 306	48,79	72,88	112,81	72,19	11,00	662	35750	34673	37491	6,32	3,30
13	CoPa 201	24,16	72,71	113,01	72,29	12,17	683	38500	38702	43705	7,07	3,68
14	CoPa 202	24,31	72,83	112,87	72,28	12,12	729	37250	37389	39557	6,82	3,55
15	CoPa 203	29,74	72,37	112,47	72,17	11,98	681	41500	41481	46474	7,56	3,97
16	CoPa 204	29,76	72,60	112,82	71,68	11,70	670	39500	39145	42554	7,14	3,76
17	CoPa 205	48,68	72,86	112,97	71,70	11,62	649	42000	41525	45221	7,56	3,97
18	CoPa 206	48,47	73,42	112,74	73,37	11,65	671	40750	40328	43381	7,34	3,74
	Média	34,24	72,65	112,96	72,34	11,51	684	36250	35731	40350	6,44	3,40

TABELA C.2 – Resistência de LCN, BD, bc = hc = 96 mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 07	23,54	96,88	149,57	95,23	10,88	646	44850	43343	52170	6,05	2,35
2	CoCa 08	23,98	96,74	149,29	94,62	10,61	613	49150	47104	57170	6,61	2,57
3	CoCa 09	30,97	96,56	149,67	95,71	11,31	651	52300	51217	60800	7,14	2,77
4	CoCa 10	30,97	96,69	149,18	94,70	11,83	637	53300	53028	62000	7,43	2,90
5	CoCa 11	47,52	94,24	149,46	96,55	11,79	661	49250	48939	57270	6,80	2,69
6	CoCa 12	48,24	94,25	149,48	96,91	11,72	741	54450	53990	63290	7,54	2,96
7	CoCaPa 101	23,91	96,58	149,64	95,07	12,49	725	54250	55044	78478	7,68	3,00
8	CoCaPa 102	23,70	96,88	149,23	95,55	12,13	648	51750	51949	76775	7,36	2,81
9	CoCaPa 103	30,76	96,49	149,17	95,54	11,59	584	52000	51361	72293	7,16	2,79
10	CoCaPa 104	31,40	96,04	149,84	95,37	12,06	700	62500	62608	84231	8,67	3,42
11	CoCaPa 105	47,90	94,07	149,57	95,28	11,87	665	61000	60764	85600	8,44	3,39
12	CoCaPa 106	48,14	94,16	149,55	95,42	11,82	680	61500	61165	82240	8,52	3,40
13	CoPa 207	23,75	96,74	149,47	95,57	11,79	666	56750	56386	65598	7,78	3,05
14	CoPa 208	23,94	96,59	149,73	94,76	12,10	694	67500	67712	70536	9,50	3,70
15	CoPa 209	30,74	96,41	149,57	95,18	11,80	657	52250	51935	58400	7,15	2,83
16	CoPa 210	31,19	96,57	149,49	95,22	11,51	628	41000	40397	51488	5,69	2,20
17	CoPa 211	47,96	93,79	149,46	96,51	11,65	727	50250	49725	60308	6,85	2,75
18	CoPa 212	47,90	93,98	149,47	96,05	12,02	687	56500	56527	67946	7,98	3,13
Média		34,25	95,76	149,49	95,51	11,72	667	53919	53511	67033	7,46	2,93

TABELA C.3 – Resistência de LCN, BD, bc = hc = 120 mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 13	23,12	120,36	179,30	121,40	11,15	637	55650	54235	64720	6,54	1,86
2	CoCa 14	23,17	120,24	179,10	120,64	11,01	722	65500	63559	76170	7,61	2,19
3	CoCa 15	29,45	120,07	179,70	121,60	11,04	607	52800	51276	61420	6,17	1,76
4	CoCa 16	30,19	120,62	179,40	121,72	10,51	632	55900	53395	64990	6,42	1,82
5	CoCa 17	45,51	120,24	179,50	121,05	11,10	599	47300	46029	55000	5,49	1,58
6	CoCa 18	45,53	120,03	179,90	121,02	11,08	691	49900	48525	58000	5,83	1,67
7	CoCaZ 1	23,86	122,15	180,00	121,20	11,04	632	46000	44669	49547	5,27	1,51
8	CoCaZ 6	22,93	120,84	180,00	120,59	11,87	736	66500	66234	67338	7,93	2,27
9	CoCaZ 7	29,67	122,69	180,00	120,84	11,49	696	57500	56618	57536	6,64	1,91
10	CoCaZ 10	29,63	122,5	180,00	122,53	11,67	700	68250	67574	68375	8,01	2,25
11	CoCaZ 12	29,54	122,42	180,00	122,21	10,81	688	69500	67017	75800	7,93	2,24
12	CoCaZ 13	47,62	120,31	180,00	120,88	11,09	706	62500	60799	62567	7,15	2,09
13	CoCaZ 18	47,78	120,51	180,00	120,96	11,17	681	61000	59485	65737	6,98	2,04
14	CoCaPa 107	23,17	120,12	178,00	121,18	11,43	672	71750	70523	84474	8,57	2,42
15	CoCaPa 108	23,22	120,22	179,90	121,87	11,62	680	63000	62276	81153	7,48	2,13
16	CoCaPa 109	31,22	120,12	179,70	121,68	11,32	631	53000	51926	65507	6,22	1,78

TABELA C.3 – Resistência de LCN, BD, bc = hc = 120 mm, Continuação

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
17	CoCaPa 110	30,18	120,43	179,80	121,93	11,21	652	61000	59547	74624	7,15	2,03
18	CoCaPa 111	45,58	120,48	180,10	120,96	10,83	649	58750	56688	70908	6,75	1,95
19	CoCaPa 112	44,93	120,23	180,00	121,50	11,45	672	59750	58765	72255	7,04	2,01
20	CoCaPaY 1	23,77	121,96	180,00	121,70	10,39	672	47500	45202	90904	5,35	1,52
21	CoCaPaY 6	23,75	122,03	180,00	121,52	10,05	631	51250	48246	90942	5,65	1,63
22	CoCaPaY 7	29,55	122,61	180,00	120,87	10,61	746	74000	70907	90964	8,31	2,39
23	CoCaPaY 10	29,6	122,45	180,00	120,88	11,43	715	72750	71506	76205	8,49	2,42
24	CoCaPaY 12	29,5	122,14	180,00	120,73	11,27	706	76500	74825	93153	8,87	2,54
25	CoCaPaY 13	48,64	120,15	180,00	120,71	11,94	694	65000	64883	90942	7,63	2,24
26	CoCaPaY 18	47,62	120,19	180,00	120,97	11,27	718	63000	61620	90919	7,21	2,12
27	CoPa 213	23,25	120,21	179,40	122,24	11,72	645	55750	55282	63079	6,65	1,88
28	CoPa 214	22,99	120,28	179,50	121,40	11,09	647	55000	53504	60219	6,43	1,83
29	CoPa 215	30,90	120,29	179,20	121,91	11,29	610	58250	57005	62496	6,81	1,94
30	CoPa 216	29,40	120,57	179,90	121,69	11,66	815	71750	71019	79177	8,57	2,42
31	CoPa 217	44,74	119,95	179,70	120,82	11,14	670	59250	57725	69688	6,95	1,99
32	CoPa 218	44,75	120,16	179,60	121,02	11,17	653	56500	55101	58448	6,62	1,89

TABELA C.3 – Resistência de LCN, BD, bc = hc = 120 = 120 mm, Continuação

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
33	CoPaX 1	23,87	121,88	180,00	122,02	11,15	651	45750	44582	68548	5,24	1,50
34	CoPaX 3	24,01	122,61	180,00	122,31	11,25	678	54250	53029	61910	6,26	1,77
35	CoPaX 6	23,84	122,01	180,00	121,55	11,36	643	58250	57135	66928	6,70	1,93
36	CoPaX 7	28,43	121,87	180,00	121,13	11,28	698	62250	60909	77201	7,13	2,06
37	CoPaX 9	29,47	122,09	180,00	120,94	11,19	713	50000	48785	50500	5,76	1,65
38	CoPaX 10	29,61	122,47	180,00	120,50	11,45	698	60250	59256	67999	7,01	2,01
39	CoPaX 12	29,49	122,16	180,00	120,56	10,73	675	77250	74309	89026	8,77	2,52
40	CoPaX 13	47,73	120,36	180,00	120,74	11,18	728	61750	60223	75308	7,17	2,07
41	CoPaX 16	47,55	120,55	180,00	121,40	11,39	732	58000	56939	74948	6,69	1,95
42	CoPaX 18	47,64	120,37	180,00	120,85	11,27	755	70000	68469	77657	8,01	2,35
Média		33,01	121,05	179,80	121,29	11,19	680	60233	58800	71507	6,99	2,00

TABELA C.4 – Resistência de LCN, BD, $bc = hc = 144 = 144 \text{ mm}$

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 19	22,24	145,27	212,70	141,80	11,03	705	75000	72809	94000	7,66	1,77
2	CoCa 20	22,20	144,21	212,60	141,53	12,18	749	76000	76404	85980	8,10	1,87
3	CoCa 21	29,53	144,37	213,00	142,76	11,97	760	78500	78436	102000	8,29	1,90
4	CoCa 22	29,48	144,18	213,00	142,25	11,22	664	77500	75696	93000	7,90	1,85
5	CoCa 23	45,73	144,43	213,70	141,32	11,20	699	70000	68327	82500	7,17	1,67
6	CoCa 24	45,84	144,43	213,30	142,37	11,61	722	88000	86966	101500	9,14	2,11
7	CoCaPa 113	22,23	144,08	213,30	142,03	11,17	719	69500	67761	90949	7,12	1,66
8	CoCaPa 114	22,34	144,45	212,70	142,40	10,91	705	74250	71818	93153	7,56	1,75
9	CoCaPa 115	29,37	144,59	212,70	142,34	10,66	656	66750	64071	80537	6,79	1,56
10	CoCaPa 116	29,56	144,42	213,00	142,51	10,52	690	75750	72377	90919	7,63	1,76
11	CoCaPa 117	45,64	144,62	213,00	141,83	11,00	732	89250	86559	90911	9,18	2,11
12	CoCaPa 118	44,43	144,48	213,30	142,09	10,59	718	83000	79489	90942	8,31	1,94
13	CoPa 219	22,43	144,31	213,00	142,27	11,90	758	64750	64562	71442	6,80	1,57
14	CoPa 220	22,39	144,39	213,10	142,30	11,54	704	65500	64589	77246	6,81	1,57
15	CoPa 221	29,39	144,54	213,00	141,81	11,91	713	71750	71552	87924	7,53	1,75
16	CoPa 222	29,64	144,53	213,20	142,26	11,49	691	72000	70905	86328	7,45	1,72
17	CoPa 223	45,98	144,36	212,60	142,56	11,64	725	95000	93960	109715	9,92	2,28
18	CoPa 224	44,81	144,58	212,70	141,05	11,67	715	70250	69561	79154	7,32	1,71
Média		32,40	144,46	212,99	142,08	11,34	712	75708	74213	89345	7,82	1,81

2.2 Ligações Coladas Normais com $b_l = 360$ mm

Na TAB. C.5, apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de avaliação da resistência das ligações coladas normais, com corpos-de-prova de madeira de menor densidade, dimensões b_c/h_c iguais a 120 mm e comprimento das peças laterais $b_l = 360$ mm.

TABELA C.5 – Resistência de LCN, BD, CoCa, bl = 360 mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa E1	27,66	121,30	359,00	121,46	11,59	657	88500	87411	90911	5,08	2,97
2	CoCa E2	27,57	121,60	359,00	120,55	11,73	662	94500	93735	99047	5,42	3,20
3	CoCaPa E1	27,49	121,59	359,00	121,00	12,04	672	93750	93863	135580	5,44	3,19
4	CoCaPa E2	27,46	121,61	359,00	121,27	11,73	649	100500	99686	142480	5,78	3,38
5	CoPa E1	27,54	121,60	359,00	121,51	11,82	639	89000	88519	108480	5,14	3,00
6	CoPa E2	27,56	121,46	359,00	121,58	11,84	649	97000	96534	115520	5,59	3,27
Média		27,55	121,53	359,00	121,23	11,79	655	93875	93291	115336	5,41	3,17

C.3

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM MADEIRA AD

Nas TAB. C.6 a C.9, apresentam-se os resultados individuais dos ensaios de avaliação da resistência das ligações coladas normais, com corpos-de-prova de madeira de maior densidade e agrupados por dimensões $b_c=h_c$ iguais, respectivamente, a 72 mm, 96 mm, 120 mm e 144 mm.

TABELA C.6 - Resistência de LCN, AD, $bc = hc = 72 \text{ mm}$

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 601	23,63	72,37	112,66	72,44	11,34	823	24750	24263	25656	4,53	2,31
2	CoCa 602	23,82	72,44	112,18	73,10	11,34	798	30500	29898	30631	5,62	2,82
3	CoCa 603	30,98	72,29	112,04	72,12	11,43	789	30250	29733	30378	5,58	2,85
4	CoCa 604	31,04	72,26	112,19	73,36	11,23	753	36250	35411	39208	6,67	3,34
5	CoCa 605	47,38	72,47	112,26	73,48	11,30	785	31250	30594	32280	5,72	2,87
6	CoCa 606	47,46	72,42	111,99	72,79	11,30	771	31250	30595	33258	5,71	2,90
7	Co 701	23,84	72,56	112,31	72,61	11,76	752	15317	15207	15317	2,84	1,44
8	Co 702	23,84	72,36	112,08	72,90	11,33	767	14734	14438	14734	2,71	1,37
9	Co 703	30,97	72,32	112,07	72,61	11,59	779	9537	9421	9537	1,77	0,90
10	Co 704	31,04	72,21	111,93	72,49	10,91	784	11900	11511	11900	2,16	1,10
11	Co 705	47,48	75,71	112,46	73,04	11,18	789	33733	32901	33733	6,13	2,97
12	Co 706	47,36	75,40	112,23	73,52	11,50	794	19209	18921	19209	3,51	1,71
13	CoPa 501	23,84	72,38	112,11	72,31	11,22	764	39250	38328	41045	7,20	3,66
14	CoPa 502	23,88	72,54	112,20	73,17	10,85	764	35750	34514	40411	6,52	3,25
15	CoPa 503	31,09	72,37	112,24	73,32	11,36	785	35500	34820	39461	6,52	3,28
16	CoPa 504	30,99	72,63	112,64	73,35	11,05	764	35500	34488	38702	6,44	3,24
17	CoPa 505	47,63	75,67	112,07	73,77	10,85	771	42250	40793	42190	7,61	3,65
18	CoPa 506	47,41	75,58	112,23	73,80	10,85	765	39000	37651	46042	7,02	3,38
19	CoPa 506B	47,51	75,75	112,39	73,14	11,20	796	38250	37336	38298	6,97	3,37
	Média	34,80	73,25	112,23	73,01	11,24	779	29167	28464	30631	5,33	2,65

TABELA C.7 – Resistência de LCN, BD, $bc = hc = 96 \text{ mm}$

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 607	23,66	96,25	149,31	95,49	11,70	884	48500	48063	48493	6,75	2,61
2	CoCa 608	23,20	96,03	149,16	92,96	11,51	880	54250	53459	54229	7,51	2,99
3	CoCa 609	30,55	96,26	149,52	94,18	11,57	847	62250	61442	62885	8,62	3,39
4	CoCa 610	30,04	95,56	149,38	94,75	11,68	875	57000	56445	57138	7,95	3,12
5	CoCa 611	47,13	96,69	149,33	95,90	11,54	878	89000	87775	88935	12,33	4,73
6	CoCa 612	47,22	96,98	149,22	96,39	11,91	875	78000	77782	78098	10,91	4,16
7	CoCaPa 401	23,98	96,20	149,43	95,47	12,19	902	79500	79956	133238	11,19	4,35
8	CoCaPa 402	23,65	96,16	149,24	96,93	12,07	921	84000	84189	87734	11,81	4,52
9	CoCaPa 403	30,38	96,14	149,05	93,80	12,14	882	82000	82344	127422	11,57	4,57
10	CoCaPa 404	30,56	96,04	149,70	94,38	12,47	874	85000	86194	140224	12,10	4,75
11	CoCaPa 405	47,15	96,44	149,54	94,74	11,95	878	90000	89857	149082	12,53	4,92
12	CoCaPa 406	47,64	96,49	149,18	97,46	12,43	896	95000	96232	134318	13,46	5,12
13	CoPa 507	23,66	96,09	149,27	93,05	12,41	918	72750	73646	74376	10,37	4,12
14	CoPa 508	23,84	95,98	149,49	95,45	12,19	909	77000	77447	77125	10,93	4,23
15	CoPa 509	30,72	96,04	149,46	94,88	11,94	855	86250	86093	86290	12,07	4,72
16	CoPa 510	30,71	95,98	149,13	94,21	12,25	883	83000	83613	83205	11,80	4,62
17	CoPa 511	47,12	96,76	149,44	94,41	12,12	853	74250	74507	79800	10,57	4,08
18	CoPa 512	47,38	96,83	149,26	94,47	12,08	844	74000	74184	79564	10,53	4,06
Média		33,81	96,27	149,34	94,94	12,01	881	76208	76290	91231	10,72	4,17

TABELA C.8 – Resistência de LCN, AD, bc = hc = 120 mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}			U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 613	22,86	120,42	179,10	121,13	11,68	885	68500	67841	68455	8,41	2,33
2	CoCa 614	22,85	120,29	179,10	122,15	11,61	917	52750	52141	52697	6,46	1,77
3	CoCa 615	31,19	120,35	179,40	122,13	11,67	912	64250	63604	64219	7,60	2,16
4	CoCa 616	29,45	120,42	178,80	122,00	11,45	848	77500	76228	77657	9,23	2,59
5	CoCa 617	45,86	119,95	179,70	120,15	11,40	842	74750	73411	74868	8,90	2,55
6	CoCa 618	46,18	119,73	179,30	120,43	11,96	873	83750	83653	83805	10,17	2,90
7	CoCa 618B	45,66	119,48	179,30	120,59	12,21	878	78000	78489	78128	9,73	2,72
8	CoCaPa 407	23,11	120,57	179,80	121,81	11,94	882	86500	86351	126451	10,47	2,94
9	CoCaPa 408	22,91	120,46	179,50	121,79	12,24	916	82500	83099	118574	10,19	2,83
10	CoCaPa 409	29,48	120,63	179,40	122,34	12,29	852	87500	88274	149083	10,95	2,99
11	CoCaPa 410	29,42	120,38	179,70	122,04	11,93	867	87750	87555	135309	10,59	2,98
12	CoCaPa 411	46,17	119,78	179,00	120,32	12,42	885	100000	101267	129394	12,28	3,51
13	CoCaPa 412	46,62	119,86	179,60	120,31	11,89	906	83750	83466	125460	10,07	2,89
14	CoPa 513	23,40	120,64	172,52	121,74	12,57	937	78000	79323	85143	10,11	2,70
15	CoPa 514	23,50	120,94	180,20	123,16	12,34	908	78000	78793	80818	9,35	2,64
16	CoPa 515	30,20	121,20	179,36	123,16	11,59	871	79000	78019	88441	9,27	2,61
17	CoPa 516	30,52	120,94	180,34	121,77	12,26	850	87500	88178	94941	10,65	2,99
18	CoPa 517	46,68	119,62	179,84	120,83	13,12	949	83000	85799	90934	10,67	2,97
19	CoPa 518	46,68	120,10	179,78	122,10	12,12	730	59250	59463	69768	7,08	2,03
	Média	33,83	120,30	179,14	121,57	12,04	879	78539	78682	94429	9,59	2,69

TABELA C.9 - Resistência de LCN, AD, bc = hc = 144 mm

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}			U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa 619	23,04	148,85	212,40	137,84	11,82	780	74250	73842	95932	7,80	1,80
2	CoCa 620	22,94	148,75	213,00	141,99	11,81	812	95000	94454	106762	9,87	2,24
3	CoCa 621	29,25	148,83	213,10	142,06	11,44	852	80000	78654	106733	8,25	1,86
4	CoCa 622	29,52	149,08	213,30	140,65	11,23	827	95000	92817	94975	9,84	2,21
5	CoCa 623	45,15	144,24	213,10	140,69	11,54	816	86500	85298	86782	8,99	2,10
6	CoCa 624	44,75	144,40	213,00	140,25	11,90	827	74000	73778	74283	7,78	1,82
7	CoCaPa 413	22,72	148,96	213,30	137,07	11,82	812	77250	76827	127930	8,07	1,88
8	CoCaPa 414	23,09	149,18	213,00	142,55	11,64	850	101500	100400	171840	10,58	2,36
9	CoCaPa 415	29,70	149,38	213,10	141,95	11,40	850	78500	77090	158390	8,06	1,82
10	CoCaPa 416	29,57	146,98	212,80	141,61	12,01	879	90250	90284	162530	9,38	2,17
11	CoCaPa 417	45,28	144,78	213,00	137,92	11,72	856	85500	84777	144890	8,96	2,12
12	CoCaPa 418	44,46	142,73	213,00	140,00	11,81	806	87500	87003	145630	9,15	2,18
13	CoPa 519	22,97	147,64	213,10	138,40	11,82	797	100000	99454	110280	10,46	2,43
14	CoPa 520	22,87	148,55	213,00	137,66	11,64	804	69000	68252	112150	7,19	1,67
15	CoPa 521	29,60	149,46	212,80	142,74	11,26	842	79000	77247	113190	8,21	1,81
16	CoPa 522	29,53	149,13	213,00	141,92	11,62	814	83750	82789	105500	8,62	1,96
17	CoPa 523	44,40	142,64	213,00	138,21	11,61	790	94000	92914	113030	9,98	2,36
	Média	31,70	147,27	213,00	140,20	11,65	824	85353	84464	119460	8,89	2,05

C.4

RIGIDEZ DE LIGAÇÕES SOB FORÇA CENTRADA

4.1 Ligações Coladas Normais com $b_l = 180$ mm

Nas TAB C.10 a C.12, apresentam-se as rigidezes obtidas nos ensaios de ligações coladas normais com comprimento das peças laterais $b_l = 180$ mm para, respectivamente, as seguintes ligações: coladas e cavilhadas; coladas, cavilhadas e parafusadas e coladas e parafusadas.

Nas FIG. C.1 a C.3, apresentam-se os gráficos força x deslocamento de ensaios de ligações coladas normais, respectivamente, Colada e Cavilhada (CoCa), Colada, Cavilhada e Parafusada (CoCaPa) e Colada e Parafusada (CoPa).

TABELA C.10 – Rigidezes de LCN, CoCa

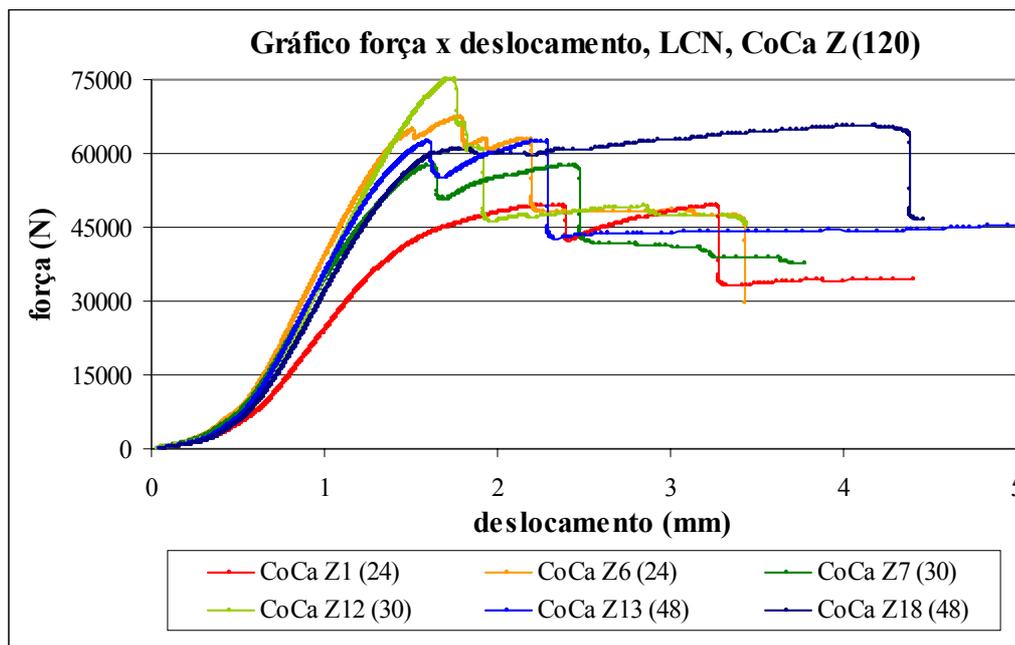
N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2%} (U=12%) (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig} (U=12%) (N/mm)
BD							
1	CoCa Z1	24	11,04	632	44669	41007	40216
2	CoCa Z6	24	11,87	736	66234	62682	62515
3	CoCa Z7	30	11,49	696	56618	54030	53478
4	CoCa Z10	30	11,67	700	67574	53393	53041
5	CoCa Z12	30	10,81	688	67017	66992	65397
6	CoCa Z13	48	11,09	706	60799	60163	59071
7	CoCa Z18	48	11,17	681	59485	56713	55774
Média			11,31	691,25	60342	56426	55642
AD							
8	CoCa 613	24	11,68	885	67841	68383	67944
9	CoCa 614	24	11,61	917	52141	53966	53550
10	CoCa 615	30	11,67	912	63604	66950	66502
11	CoCa 616	30	11,45	848	76228	74563	73747
12	CoCa 617	48	11,40	842	73411	71042	70193
13	CoCa 618	48	11,96	873	83653	75272	75214
14	CoCa 618B	48	12,21	878	78489	71608	71907
Média			11,71	879,29	70767	68826	68437

TABELA C.11 – Rigidezes de LCN, CoCaPa

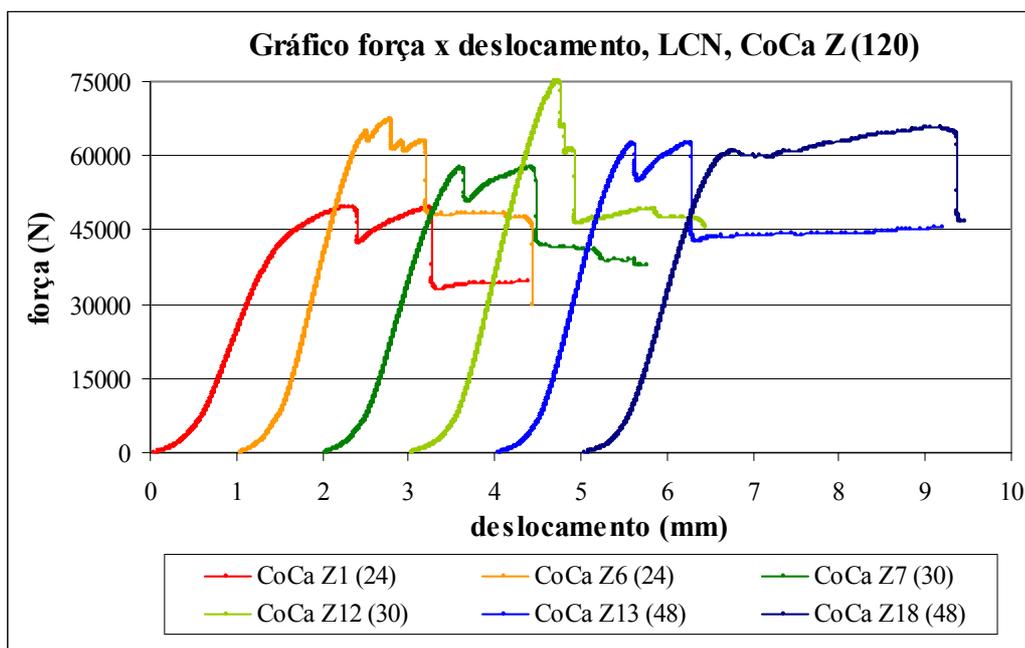
N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2%} (U=12%) (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig} (U=12%) (N/mm)
BD							
1	CoCaPa 107	24	11,43	672	70523	63461	62738
2	CoCaPa 108	24	11,62	680	62276	55944	55516
3	CoCaPa 109	30	11,32	631	51926	55585	54834
4	CoCaPa 110	30	11,21	652	59547	64841	63811
5	CoCaPa 111	48	10,83	649	56688	56950	55618
6	CoCaPa 112	48	11,45	672	58765	59810	59153
7	CoCaPa Y1	24	10,39	672	45202	37854	36633
8	CoCaPa Y6	24	10,05	631	48246	47870	46000
9	CoCaPa Y7	30	10,61	746	70907	65607	63779
10	CoCaPa Y10	30	11,43	715	71506	52593	51993
11	CoCaPa Y12	30	11,27	706	74825	66502	65531
12	CoCaPa Y13	48	11,94	694	64883	62647	62572
13	CoCaPa Y18	48	11,27	718	61620	63161	62239
Média			11,14	680	61301	57910	56955
AD							
1	CoCaPa 407	24	11,94	882	86351	76120	76032
2	CoCaPa 408	24	12,24	916	83099	73435	73790
2	CoCaPa 408	24	12,29	852	88274	81261	81740
4	CoCaPa 410	30	11,93	867	87555	78507	78391
5	CoCaPa 411	48	12,42	885	101267	76764	77412
6	CoCaPa 412	48	11,89	906	83466	73521	73355
Média			11,70	797	77921	69002	68649

TABELA C.12 – Rigidezes de LCN, CoPa

N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2%} (U=12%) (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig} (U=12%) (N/mm)
BD							
1	CoPa 213	24	11,72	645	55282	59716	59382
2	CoPa 214	24	11,09	647	53504	60693	59593
3	CoPa 215	30	11,29	610	57005	54313	53539
4	CoPa 216	30	11,66	815	71019	72581	72088
5	CoPa 217	48	11,14	670	57725	59110	58096
6	CoPa 218	48	11,17	653	55101	53907	53017
7	CoPa X1	24	11,15	651	44582	48869	48037
8	CoPa X3	24	11,25	678	53029	40481	39874
9	CoPa X6	24	11,36	643	57135	57696	56959
10	CoPa X7	30	11,28	698	60909	61479	60596
11	CoPa X9	30	11,19	713	48785	32669	32140
12	CoPa X10	30	11,45	698	59256	45574	45073
13	CoPa X12	30	10,73	675	74309	66700	65007
14	CoPa X13	48	11,18	728	60223	60610	59611
15	CoPa X16	48	11,39	732	56939	46964	46391
16	CoPa X18	48	11,27	755	68469	63466	62541
Média			11,27	688	58330	55302	54496
AD							
1	CoPa 513	24	12,57	937	79323	77378	78253
2	CoPa 514	24	12,34	908	78793	84681	85255
2	CoPa 514	30	11,59	871	78019	83780	83086
2	CoPa 514	30	12,26	850	88178	83076	83505
5	CoPa 517	48	13,12	949	85799	80265	82069
6	CoPa 518	48	12,12	730	59463	60107	60251
Média			12,33	874	78262	78215	78737

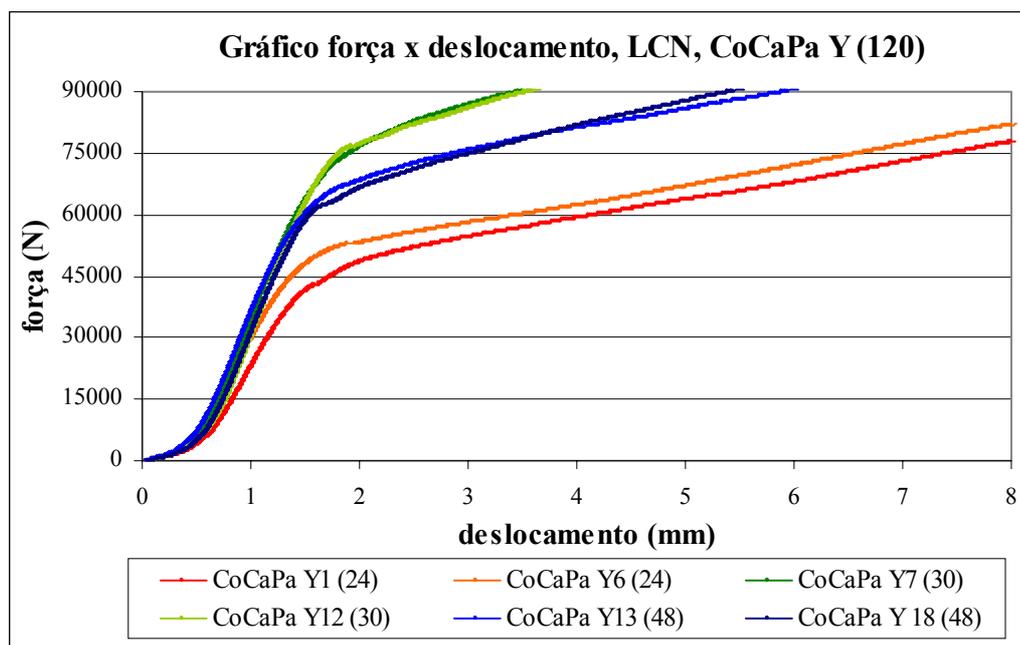


(a)

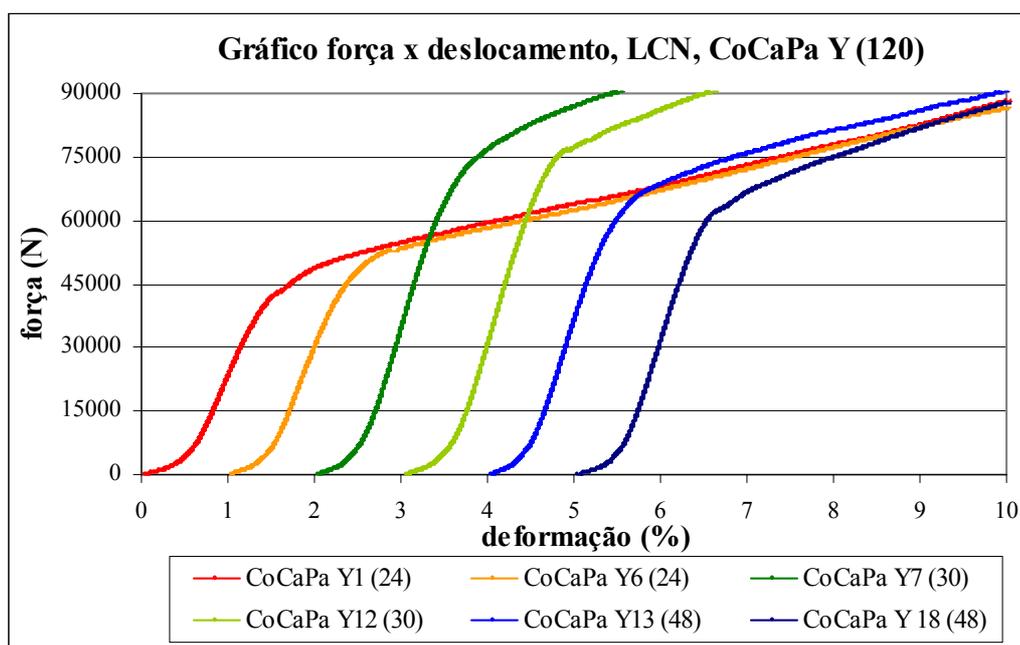


(b)

FIGURA C.1 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN, CoCa, BD, $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm: a) Sobrepostos; b) Deslocados

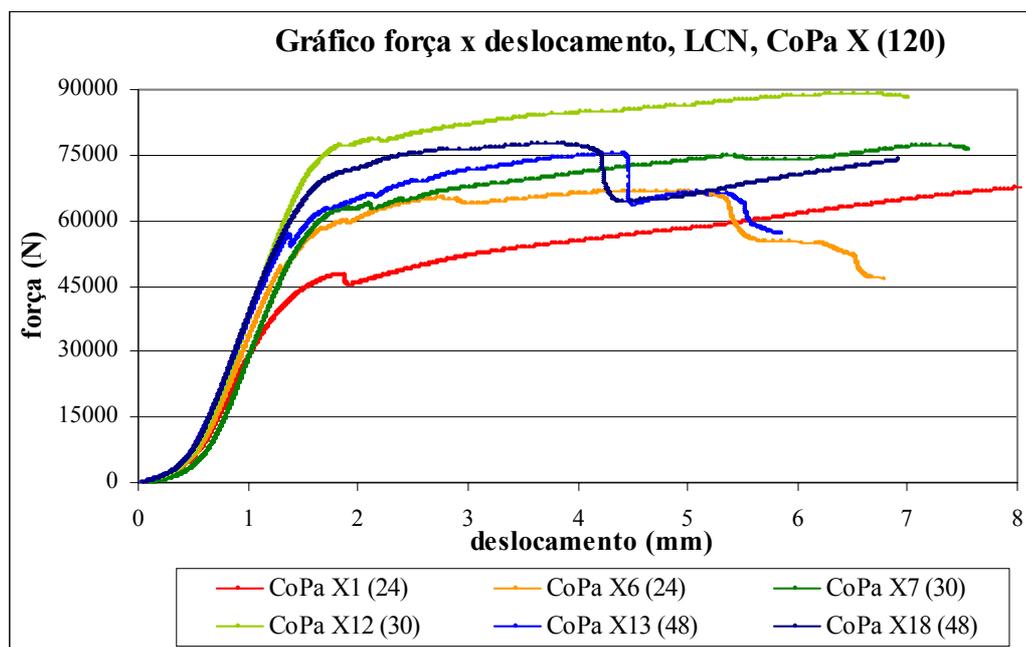


(a)

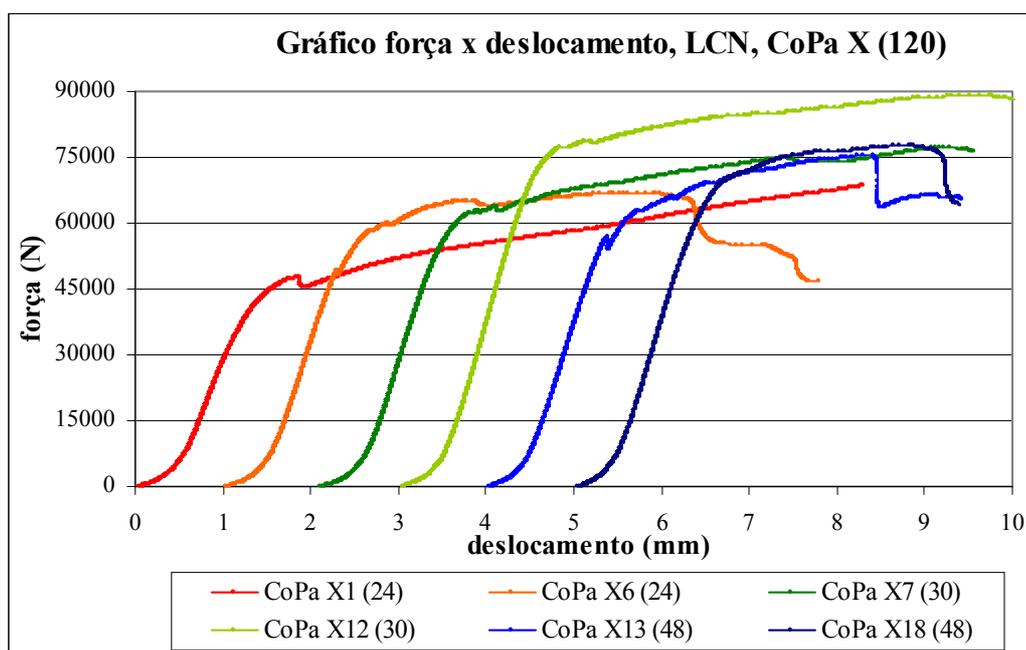


(b)

FIGURA C.2 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN, BD, CoCaPa,
 $b_c = h_c = 120$ mm, $b_l = 180$ mm: a) Sobrepostos; b) Deslocados



(a)



(b)

FIGURA C.3 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN, BD, CoPa, $b_c = h_c = 120$ mm, $b_l = 180$ mm: a) Sobrepostos; b) Deslocalados

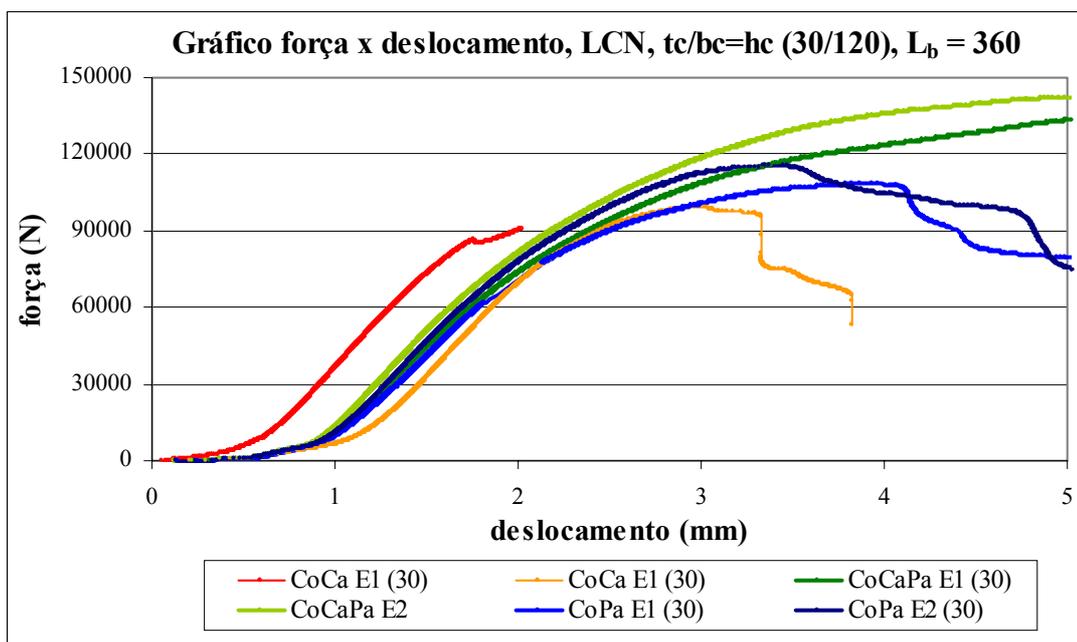
4.2 Corpos-de-Prova com $bl = 360$ mm

Na TAB. C.13, apresentam-se os resultados individuais das rigidezes de ligações coladas normais, série de corpos-de-prova com $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm e $bl = 360$ mm.

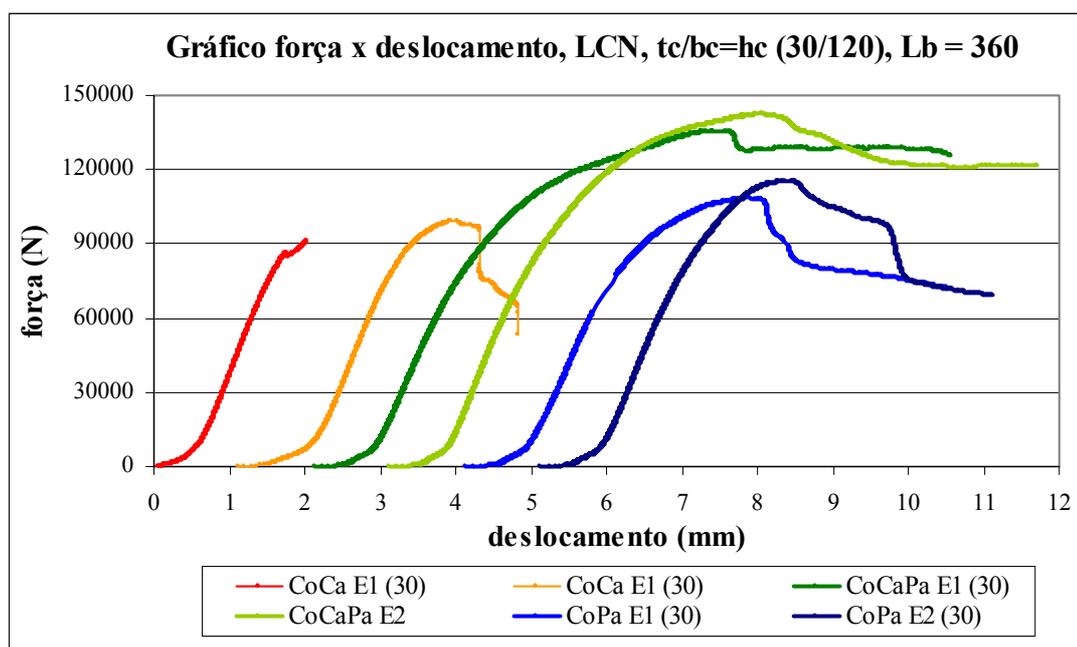
TABELA C.13 – Rigidezes de LCN, CoCa, $t_c = 30$ mm, $bl = 360$ mm

	Umid.	Dens.	$F_{0,2\%}$	Rigidez S_{lig}	
	(%)	(kg/m^3)	U=12% (N)	U (N/mm)	U=12% (N/mm)
CoCa E1	11,59	657	87411	74573	73962
CoCa E2	11,73	662	93735	70151	69772
CoCaPa E1	12,04	672	93863	66735	66788
CoCaPa E2	11,73	649	99686	72909	72515
CoPa E1	11,82	639	88519	66540	66300
CoPa E2	11,84	649	96534	73619	73383
Média	11,79	655	93291	70755	70454
Desvio padrão	0,15	11,57	4675	3513	3355
Coefficiente de variação (%)	1,28	1,77	5,01	4,97	4,76

Na FIG. C.4, apresentam-se os gráficos força x deslocamentos das ligações coladas normais com $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm e $bl = 360$ mm



(a)



(b)

FIGURA C.4 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN, BD, CoCa, $t_c = 30$ mm, $bc = hc = 120$ mm, $l_b = 360$ mm: a) Sobrepostos; b) Deslocados

C.5

RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE LIGAÇÕES SOB FORÇA EXCÊNTRICA

Nas TAB. C.14 a C.16, apresentam-se os resultados dos ensaios de ligações coladas normais sob carregamento excêntrico, com $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm e madeira BD, respectivamente, para as seguintes ligações: colada e cavilhada (CoCa Ze); colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa Ye) e colada e parafusada (CoPa Xe).

TABELA C.14 – Resistência de LCN Sob Força Excêntrica, BD, CoCa

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCa Z2 e	23,86	122,45	180,00	121,34	11,45	634	34000	33443	48902	3,95	1,13
2	CoCa Z5 e	23,92	122,33	180,00	121,18	11,57	643	38500	38009	47913	4,48	1,28
3	CoCa Z8 e	28,45	120,37	180,00	120,60	11,87	681	42500	42330	48001	4,97	1,46
4	CoCa Z11 e	28,45	122,43	180,00	121,60	11,30	692	52750	51635	52807	6,14	1,73
5	CoCa Z14 e	47,46	120,32	180,00	120,76	11,55	706	48750	48088	49293	5,65	1,65
6	CoCa Z17 e	47,58	120,07	180,00	120,96	11,92	704	52750	52625	54471	6,16	1,81
Média		33,29	121,33	180,00	121,07	11,61	677	44875	44355	50231	5,23	1,51

TABELA C.15 – Resistência de LCN Sob Força Excêntrica, BD, CoCaPa

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} - U	F _{0,2%} (U=12%)	F _{máx} - U	σ_{c90} - pl	τ_{gv90} - A _{cola}
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoCaPa Y2e	23,74	122,41	180,00	121,84	11,44	663	51250	50384	72374	5,95	1,69
2	CoCaPa Y5e	23,82	122,46	180,00	120,92	11,68	645	62250	61645	82622	7,22	2,08
3	CoCaPa Y8e	28,39	122,15	180,00	120,72	11,64	707	60500	59854	80292	7,00	2,03
4	CoCaPa Y11e	28,43	121,22	180,00	122,59	11,36	684	67250	65955	83395	7,80	2,22
5	CoCaPa Y14e	47,38	120,47	180,00	120,94	11,59	694	61250	60503	81653	7,11	2,08
6	CoCaPa Y17e	46,64	120,17	180,00	121,55	11,78	712	69000	68538	86508	8,03	2,35
	Média	33,07	121,48	180,00	121,42	11,58	684	61917	61146	81141	7,19	2,07

TABELA C.16 – Resistência de LCN Sob Força Excêntrica, BD, CoPa

Corpo-de-prova		Dimensões medidas				Umid.	Dens.	Força			Tensões médias	
		tc	bc	bl	hc _{méd}	U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2% - U}	F _{0,2% (U=12%)}	F _{máx - U}	$\sigma_{e90} - pl$	$\tau_{gv90} - A_{cola}$
N	Nome	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	CoPa X2e	23,7	122,36	180,00	121,81	11,33	677	48250	47279	56214	5,56	1,59
2	CoPa X5e	23,8	122,44	181,00	121,92	11,25	608	54000	52784	60139	6,11	1,77
3	CoPa X8e	29,57	122,66	182,00	121,10	11,99	747	59500	59479	66344	6,88	2,00
4	CoPa X11e	28,44	120,73	183,00	120,94	11,73	649	64500	63985	70172	7,43	2,19
5	CoPa X14e	47,58	120,44	184,00	120,67	12,01	686	55250	55262	69897	6,34	1,90
6	CoPa X17e	47,88	120,33	185,00	120,95	12,63	776	65250	66481	71689	7,53	2,28
	Média	33,50	121,49	182,50	121,23	11,82	690	57792	57545	65743	6,64	1,96

5.2 Rigidez de Ligações Coladas Normais Sob Força Excêntrica

Nas TAB. C.17 a C.19, apresentam-se os resultados dos ensaios de rigidez das ligações coladas normais sob carregamento excêntrico, com $bc = hc = 120$ mm, $bl = 180$ mm, Madeira BD e excentricidade $e = 20$ mm, para, respectivamente, as seguintes ligações: colada e cavilhada (CoCa Ze); colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa Ye) e colada e parafusada (CoPa Xe).

TABELA C.17 – Rigidezes de LCN sob Força Excêntrica, CoPa

N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2%} (U=12%) (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig} (U=12%) (N/mm)
1	CoCa Z2e	24	11,45	634	33443	20661	20435
2	CoCa Z5e	24	11,57	643	38009	23953	23749
3	CoCa Z8e	30	11,87	681	42330	26213	26143
4	CoCa Z11e	30	11,30	692	51635	24450	24106
5	CoCa Z14e	48	11,55	706	48088	21637	21441
6	CoCa Z17e	48	11,92	704	52625	28279	28234
Média			11,61	677	44355	24199	24018

TABELA C.18 – Rigidezes de LCN Sob Força Excêntrica, CoCaPa

N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2% (U=12%)} (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig (U=12%)} (N/mm)
1	CoCaPa Y2e	24	11,44	663	50384	30743	30397
2	CoCaPa Y5e	24	11,68	645	61645	33230	33015
3	CoCaPa Y8e	30	11,64	707	59854	34790	34542
4	CoCaPa Y11e	30	11,36	684	65955	33397	32968
5	CoCaPa Y14e	48	11,59	694	60503	40537	40208
6	CoCaPa Y17e	48	11,78	712	68538	41990	41803
Média			11,58	684	61146	35781	35489

TABELA C.19 – Rigidezes de LCN sob Força Excêntrica, CoPa

N	Nome	tc (mm)	Umid. (%)	Dens. (kg/m ³)	F _{0,2% (U=12%)} (N)	S _{lig} (N/mm)	S _{lig (U=12%)} (N/mm)
1	CoPa X2e	24	11,33	677	47279	22890	22583
2	CoPa X5e	24	11,25	608	52784	27935	27516
3	CoPa X8e	30	11,99	747	59479	31805	31797
4	CoPa X11e	30	11,73	649	63985	35666	35476
5	CoPa X14e	48	12,01	686	55262	33510	33515
6	CoPa X17e	48	12,63	776	66481	35880	36331
Média			11,82	690	57545	31281	31203

Nas FIG. C.5 a C.7, apresentam-se os gráficos força x deslocamento de ligações coladas normais com excentricidade para, respectivamente, as seguintes ligações: colada e cavilhada (CoCa Ze); colada, cavilhada e parafusada (CoCaPa Ye) e colada e parafusada (CoPa Xe).

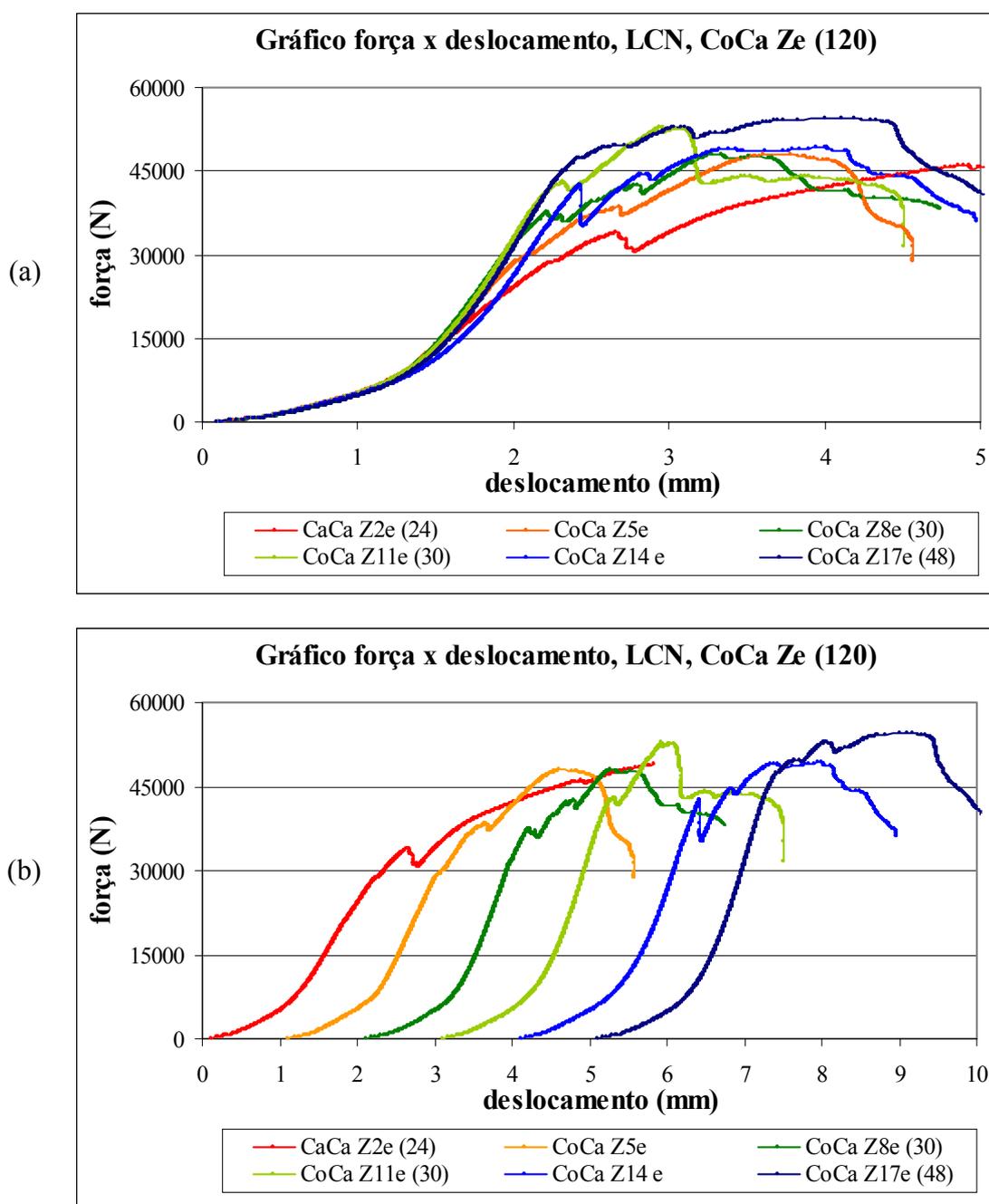


FIGURA C.5 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN Sob Força Excêntrica, CoCa:
a) Sobrepostos; b) Defasados

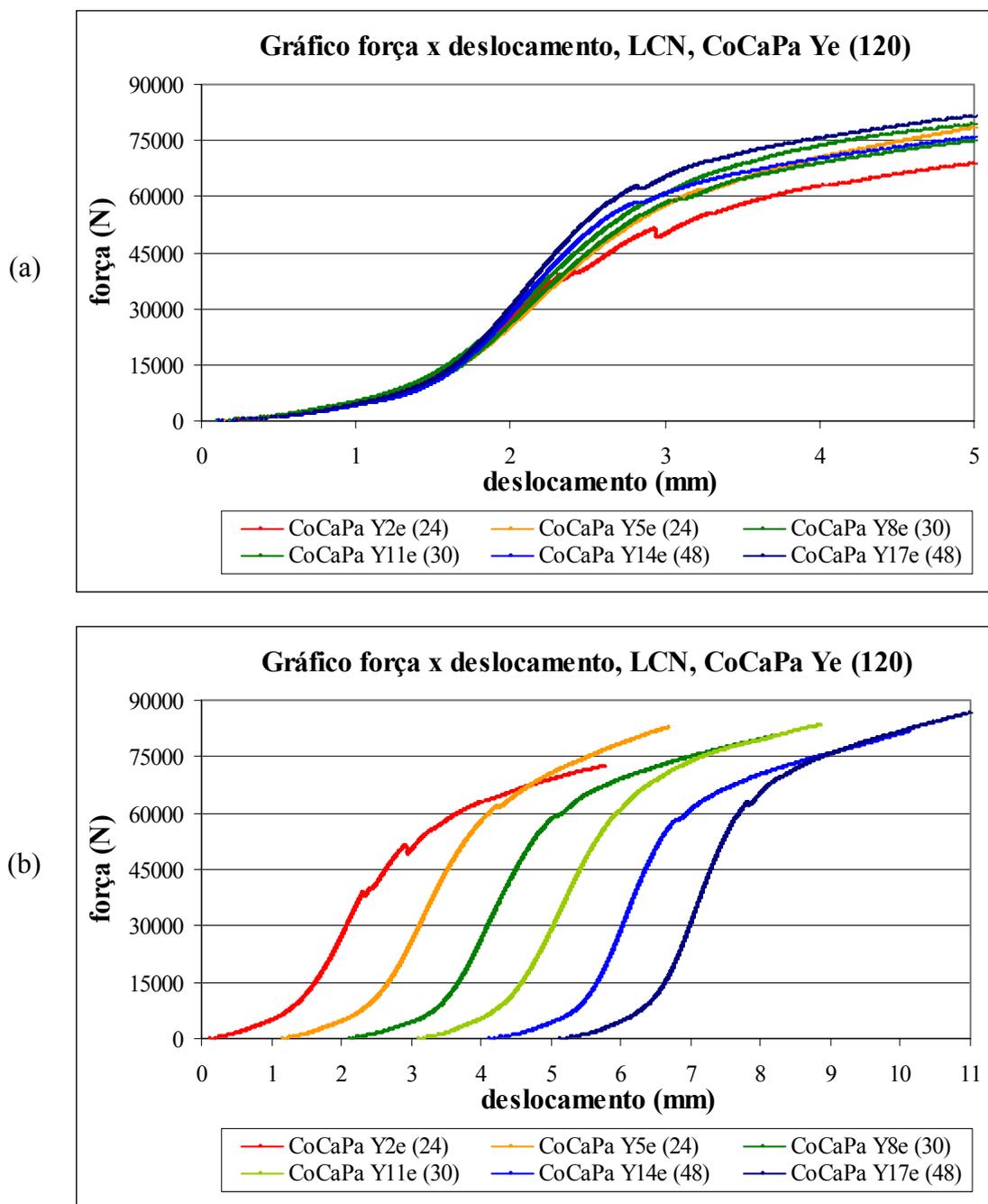


FIGURA C.6 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN Sob Força Excêntrica, CoCaPa:

a) Sobrepostos; b) Defasados

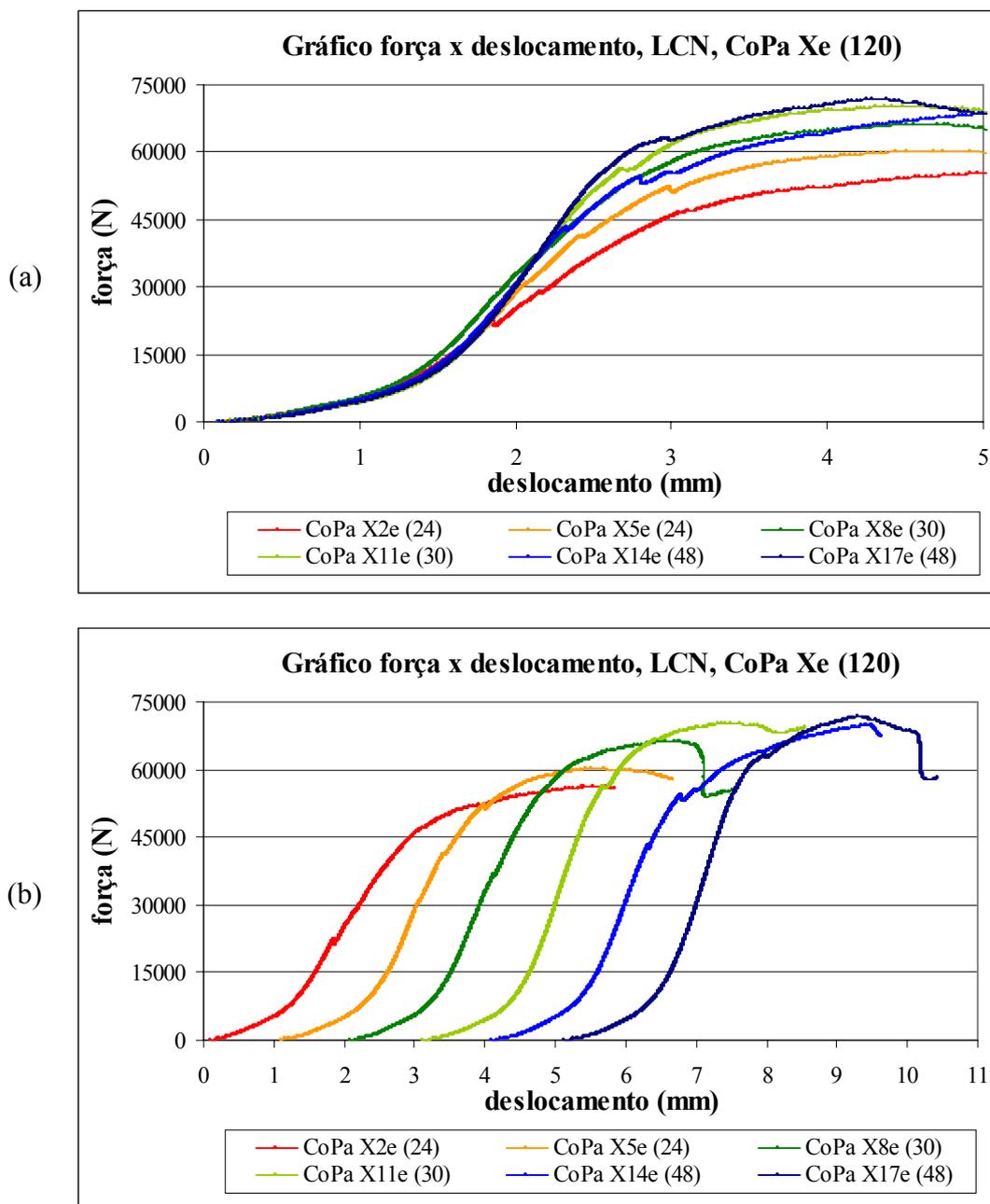


FIGURA C.7 – Gráficos Força x Deslocamento, LCN Sob Força Excêntrica, CoPa:
a) Sobrepostos; b) Defasados

Nas FIG. C.8 a C.10, apresentam-se os gráficos sobrepostos de ligações coladas normais sob força centrada e sob força excêntrica para, respectivamente, as ligações coladas e cavilhadas (CoCa), coladas, cavilhadas e parafusadas (CoCaPa) e coladas e parafusadas (CoPa).

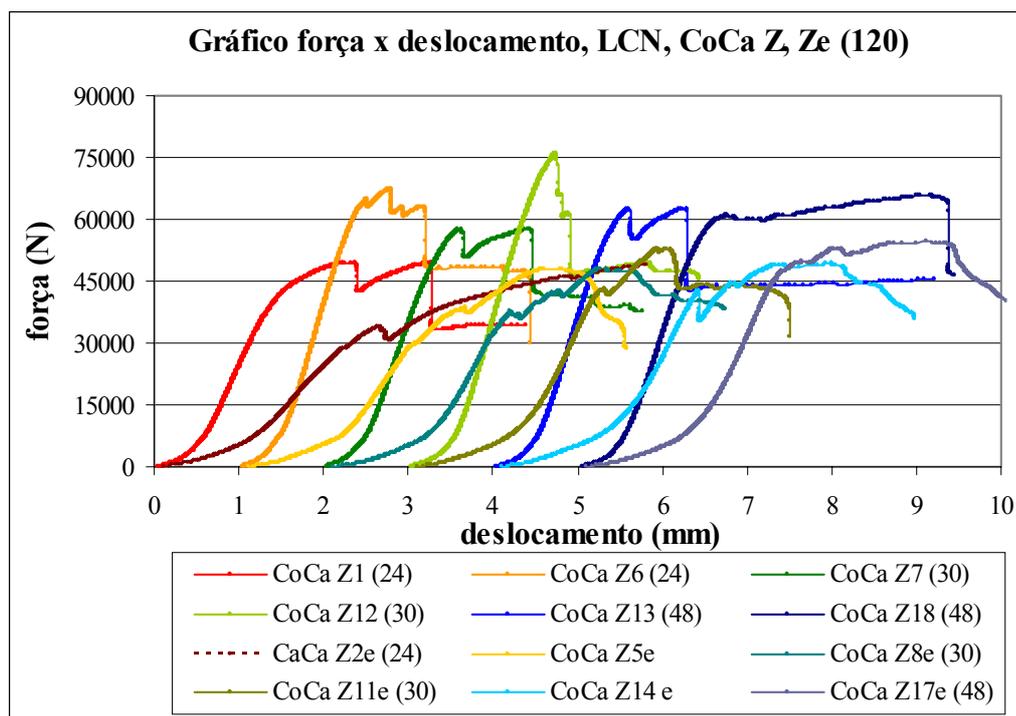


FIGURA C.8 – Gráfico Força x Deslocamento, LCN, CoCa, Sob Força Centrada e Sob Força Excêntrica

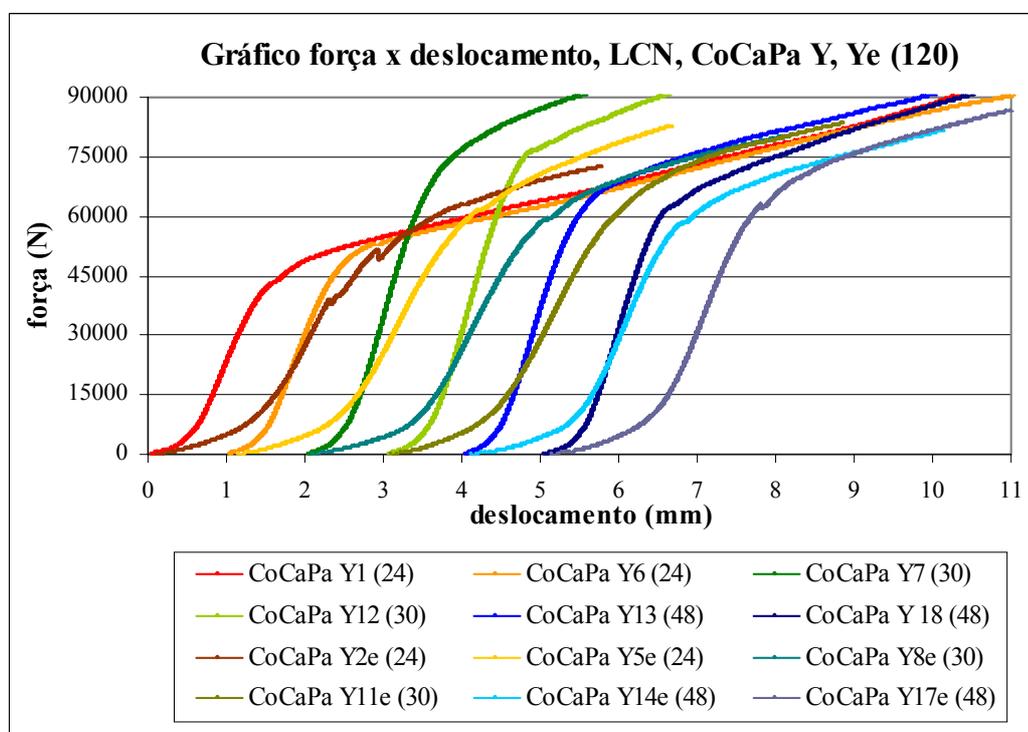


FIGURA C.9 - Gráfico Força x Deslocamento, LCN, CoCaPa, Sob Força Centrada e Sob Força Excêntrica

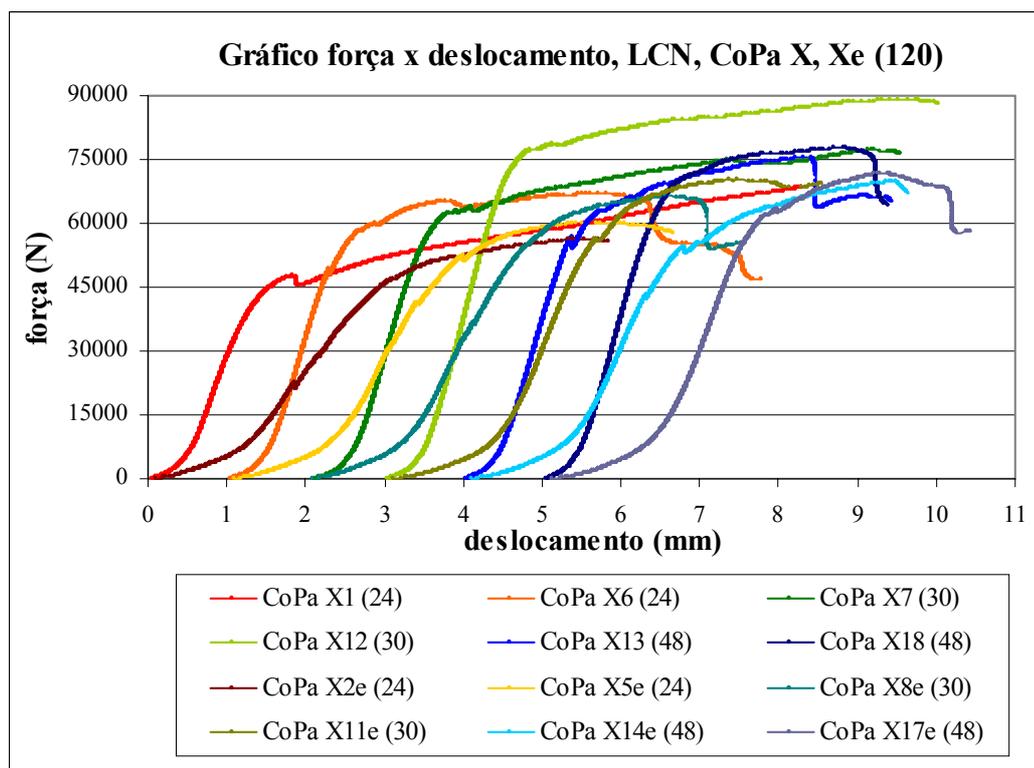


FIGURA C.10 - Gráfico Força x Deslocamento, LCN, CoPa, Sob Força Centrada e Sob Força Excêntrica

ANEXO D**RESULTADOS DE ENSAIOS DE LIGAÇÕES
MECÂNICAS**

D.1

LIGAÇÕES MECÂNICAS PARALELAS

Nas TAB. D.1 a D.3, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência e rigidez para, respectivamente, as seguintes ligações mecânicas paralelas (LMP): cavilhadas (Ca), cavilhadas e parafusadas (CaPa) e parafusadas (Pa).

TABELA D.1 – Resistência e Rigidez de LMP, Cavilhadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
		U _{méd}	d _{méd}	F _{0,2%} U	F _{máx} U	F _{0,2%} (U=12%)	S _{lig} U	S _{lig} (U=12%)
N	Nome (tc)	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	Ca 1 (24)	12,45	709	21000	21739	21284	18085	18248
2	Ca 2 (24)	12,34	713	21250	27663	21467	18496	18622
3	Ca 3 (30)	12,52	707	21000	24096	21328	17062	17239
4	Ca 4 (30)	12,10	726	24000	29750	24072	23314	23361
5	Ca 5 (48)	12,23	709	23250	29179	23412	21614	21714
6	Ca 6 (48)	12,03	751	24250	32729	24273	24910	24926

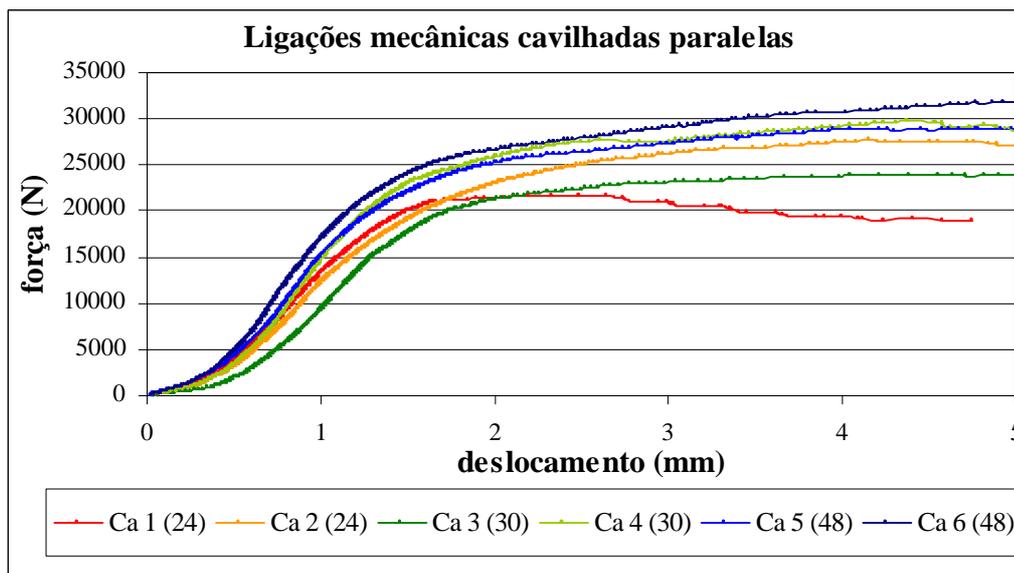
TABELA D.2 – Resistência e Rigidez de LMP, Cavilhadas e Parafusadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
		$U_{méd}$	$d_{méd}$	$F_{0,2\%}$	$F_{máx}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
		(%)	(kg/m^3)	U	U	(U=12%)	U	(U=12%)
N	Nome-tc	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	CaPa 1 (24)	12,11	704	61250	86876	61452	20630	20675
2	CaPa 2 (24)	11,66	707	51500	81236	50975	23089	22932
3	CaPa 3 (30)	11,79	672	52000	85850	51672	22533	22438
4	CaPa 4 (30)	11,90	835	67500	90957	67298	23143	23097
5	CaPa 5 (48)	12,07	702	53250	90942	53362	28655	28695
6	CaPa 6 (48)	12,01	713	70250	90957	70271	22124	22128

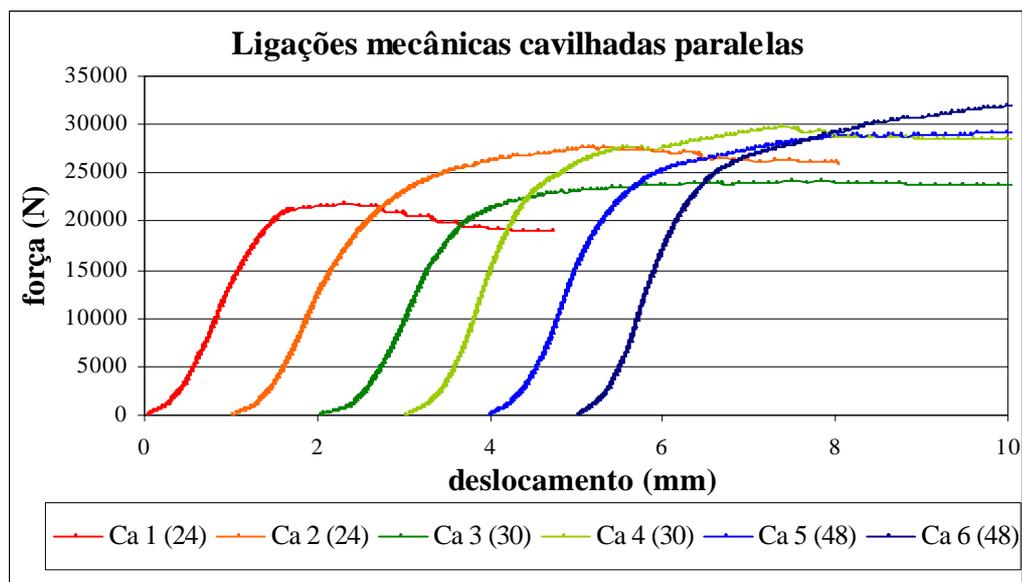
TABELA D.3 – Resistência e Rigidez de LMP, Parafusadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
		$U_{méd}$	$d_{méd}$	$F_{0,2\%}$	$F_{máx}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
		(%)	(kg/m^3)	U	U	(U=12%)	U	(U=12%)
N	Nome-tc	(%)	(kg/m^3)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	Pa 1 (24)	11,36	663	21500	36260	21089	18251	18017
2	Pa 2 (24)	12,04	719	21500	35452	21524	29308	29331
3	Pa 3 (30)	11,36	669	20000	34677	19617	22794	22502
4	Pa 4 (30)	10,96	664	23000	41826	22285	29473	28860
5	Pa 5 (48)	11,46	728	36500	64085	33204	24523	24258
6	Pa 6 (48)	11,40	771	34000	64472	26026	11788	11647

Nas FIG. D.1 a D.3, apresentam-se os gráficos força x deslocamentos de ligações paralelas com elementos mecânicos. Nas FIG. D.4 a D.6, apresentam-se os gráficos sobrepostos força x deslocamentos de ligações com elementos mecânicos e os de ligações coladas com os correspondentes elementos mecânicos.

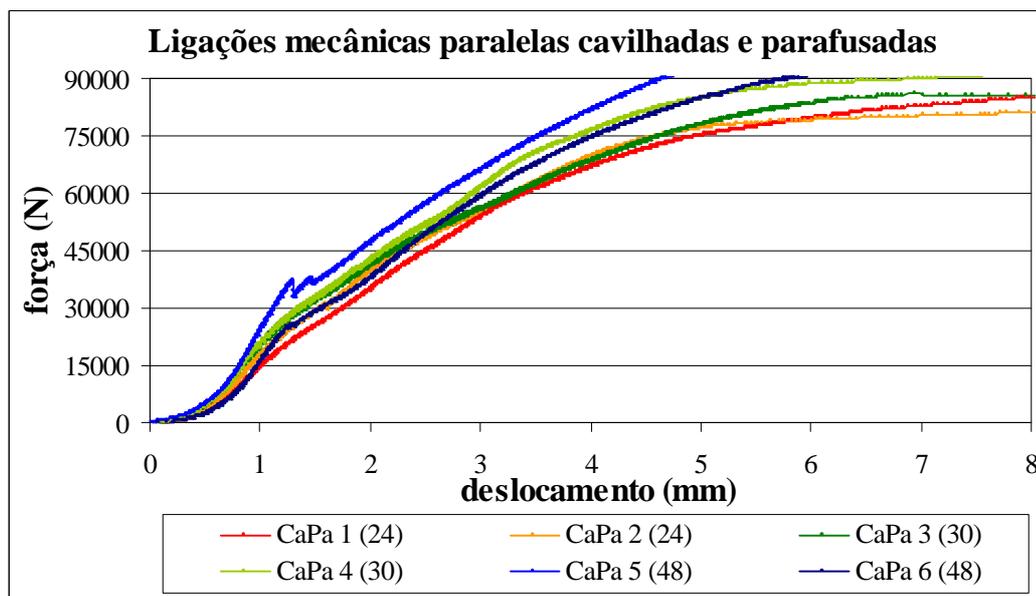


(a)

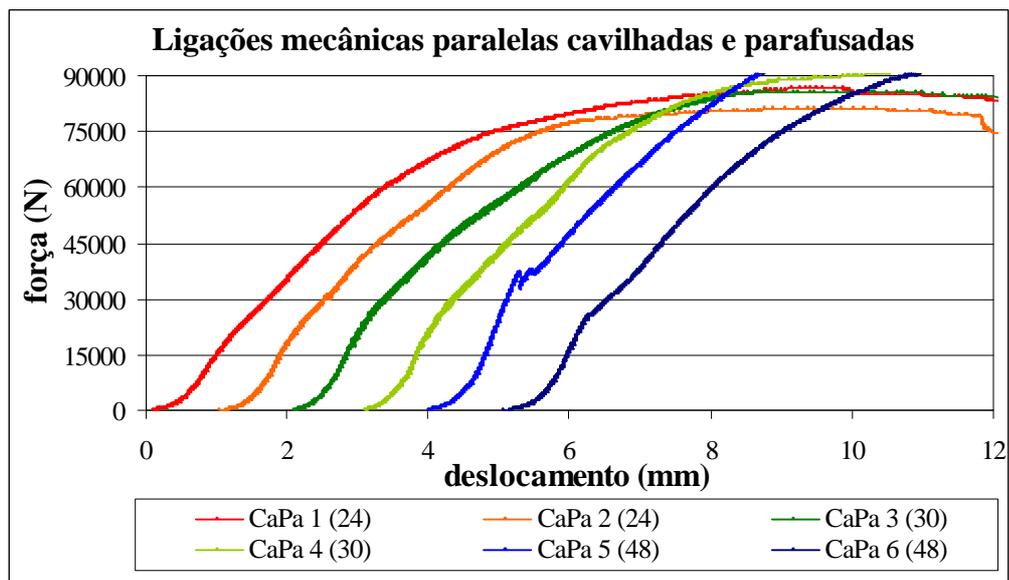


(b)

FIGURA D.1 – Gráficos Força x Deslocamento de Ligações Mecânicas Paralelas (LMP) Ca: a) Sobrepostos; b) Deslocados

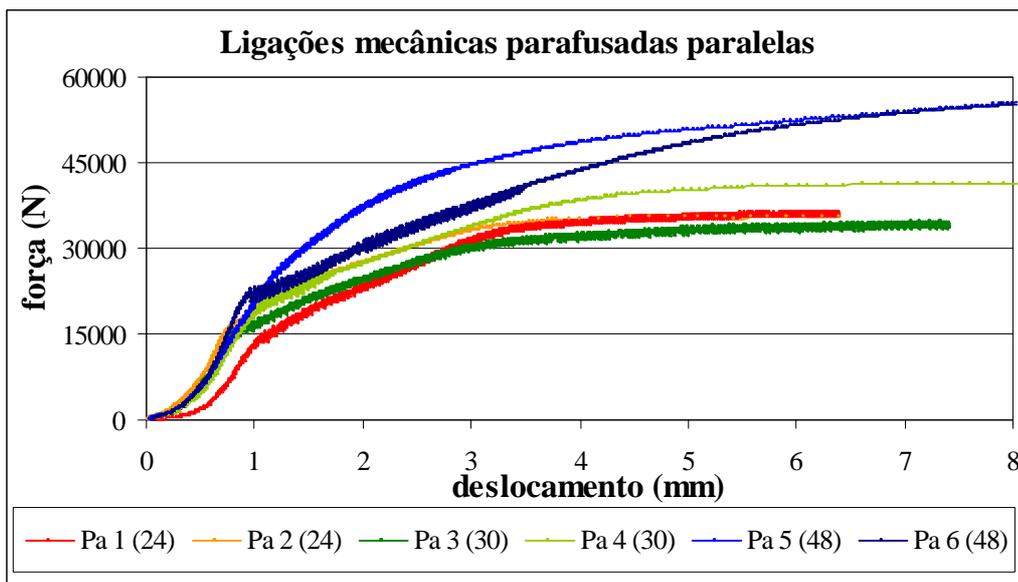


(a)

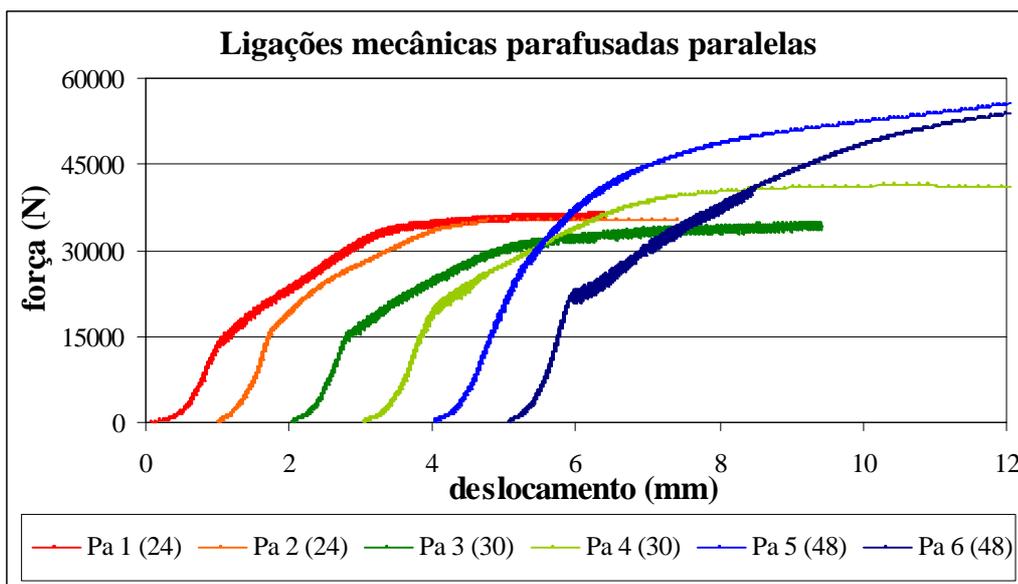


(b)

FIGURA D.2 – Gráficos Força x Deslocamento, LMP, CaPa: a) Sobrepostos;
b) Deslocados



(a)



(b)

FIGURA D.3 – Gráficos Força x Deslocamento, LMP, Pa: a) Sobrepostos; b) Deslocados

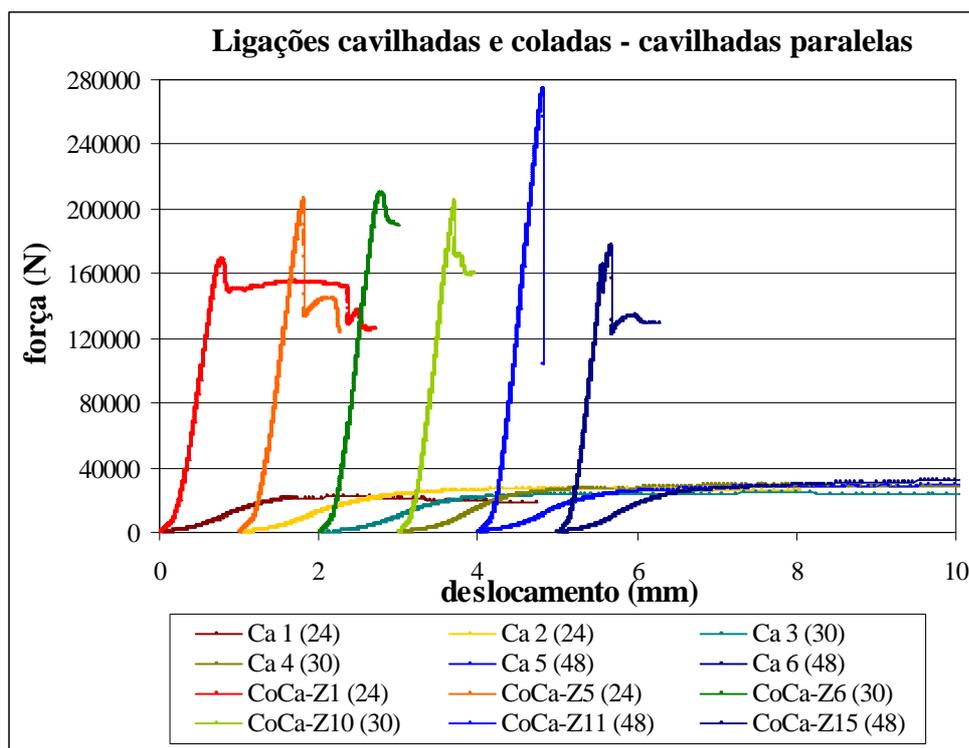


FIGURA D.4 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Paralelas: CoCa e Ca

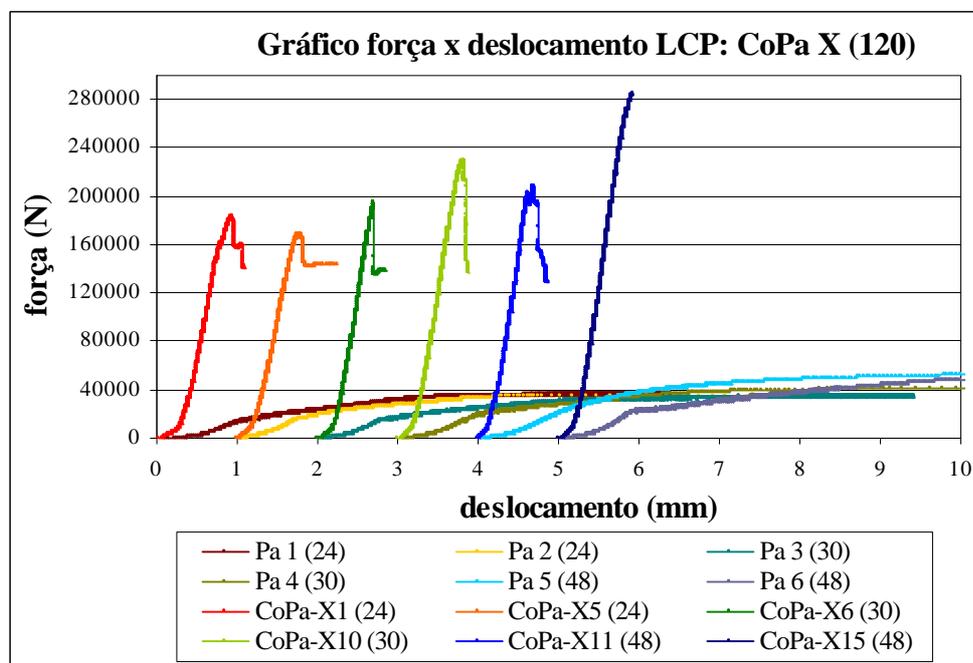


FIGURA D.5 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Paralelas: CoPa e Pa

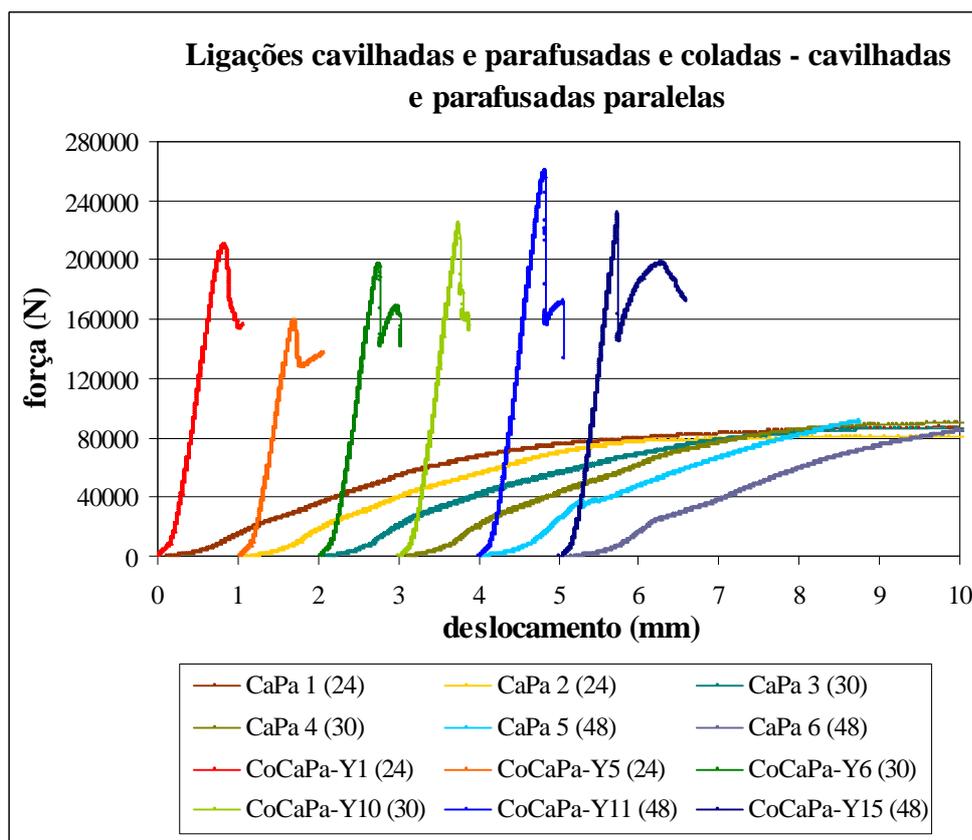


FIGURA D.6 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Paralelas: CoCaPa e CaPa

D.2

LIGAÇÕES MECÂNICAS NORMAIS

Nas TAB. D.4 a D.6, apresentam-se os resultados dos ensaios de ligações normais com emprego de elementos mecânicos.

TABELA D.4 – Resistência e Rigidez de LMN, Cavilhadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
				$F_{0,2\%}$	$F_{m\acute{a}x}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
N	Nome-tc	$U_{m\acute{e}d}$	$d_{m\acute{e}d}$	(U)	(U)	(U=12%)	S_{lig}	(U=12%)
		(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	Ca 1 (24)	11,46	730	22000	22799	21644	12474	12339
2	Ca 2 (24)	11,54	720	21000	21486	20710	13005	12885
3	Ca 3 (30)	11,6	693	21500	21674	21242	12710	12608
4	Ca 4 (30)	11,85	694	20750	25310	20657	13213	13173
5	Ca 5 (48)	12,03	715	23500	24491	23521	14103	14111
6	Ca 6 (48)	11,78	728	18500	21085	18378	13724	13664

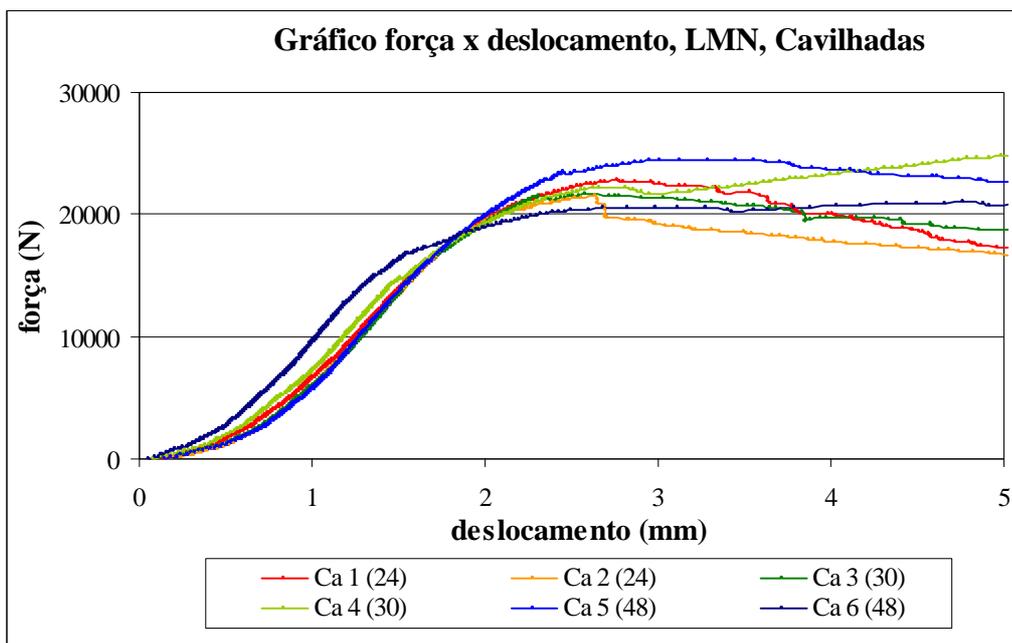
TABELA D.5 – Resistência e Rigidez de LMN, Cavilhadas e Parafusadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
				$F_{0,2\%}$	$F_{m\acute{a}x}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
		$U_{m\acute{e}d}$	$d_{m\acute{e}d}$	(U)	(U)	(U=12%)	S_{lig}	(U=12%)
N	Nome-tc	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	CaPa 1 (24)	10,84	734	55000	85409	53086	29066	28392
2	CaPa 2 (24)	11,58	754	58500	90919	57763	31401	31137
3	CaPa 3 (30)	11,29	697	47500	83516	46488	18395	18134
4	CaPa 4 (30)	11,13	687	46000	78675	44799	17003	16707
5	CaPa 5 (48)	11,32	747	52750	90949	51674	16988	16757
6	CaPa 6 (48)	11,52	732	43000	77148	42381	16727	16566

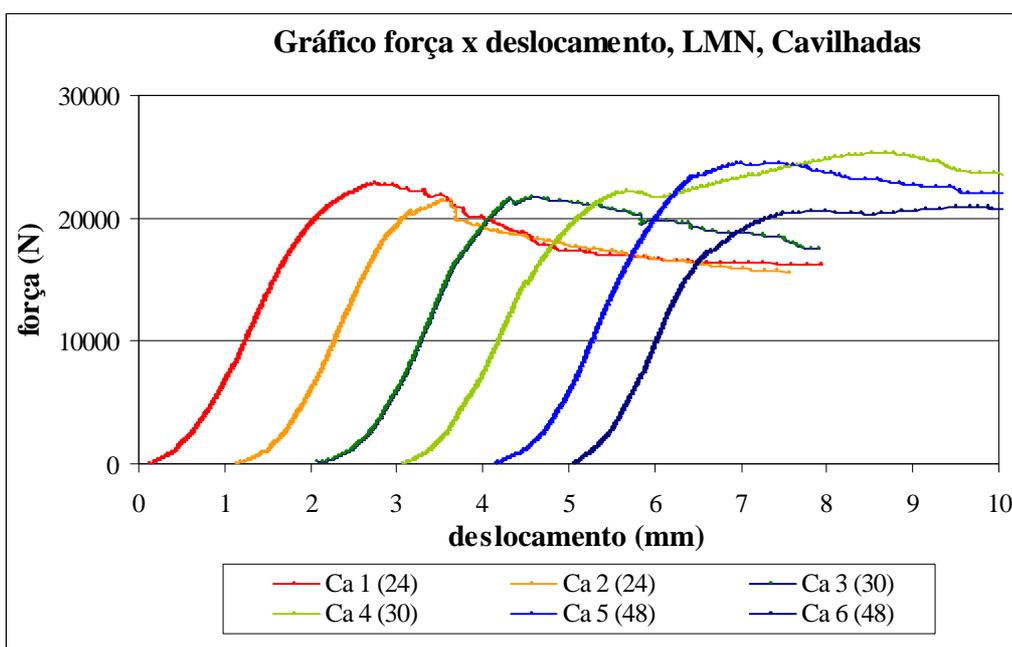
TABELA D.6 – Resistência e Rigidez de LMN, Parafusadas

Corpo-de-prova		Umid.	Dens.	Força			Rigidez	
				$F_{0,2\%}$	$F_{m\acute{a}x}$	$F_{0,2\%}$	S_{lig}	S_{lig}
		$U_{m\acute{e}d}$	$d_{m\acute{e}d}$	(U)	(U)	(U=12%)	S_{lig}	(U=12%)
N	Nome-tc	(%)	(kg/m ³)	(N)	(N)	(N)	(N/mm)	(N/mm)
1	Pa 1 (24)	11,47	733	28500	41920	28047	28298	27998
2	Pa 2 (24)	11,58	717	22500	38242	22217	25405	25192
3	Pa 3 (30)	12,2	713	20000	34884	20120	20137	20218
4	Pa 4 (30)	11,73	738	32500	47222	32237	29996	29834
5	Pa 5 (48)	11,98	736	27500	63673	27484	24095	24085
6	Pa 6 (48)	11,77	735	26500	67244	26317	25533	25416

Nas Figuras D.7 a D.9, apresentam-se os gráficos força x deslocamentos de ligações normais com elementos mecânicos. Nas Figuras D.10 a D.12, apresentam-se os gráficos sobrepostos força x deslocamentos de ligações com elementos mecânicos, com os de ligações coladas com os correspondentes elementos mecânicos.

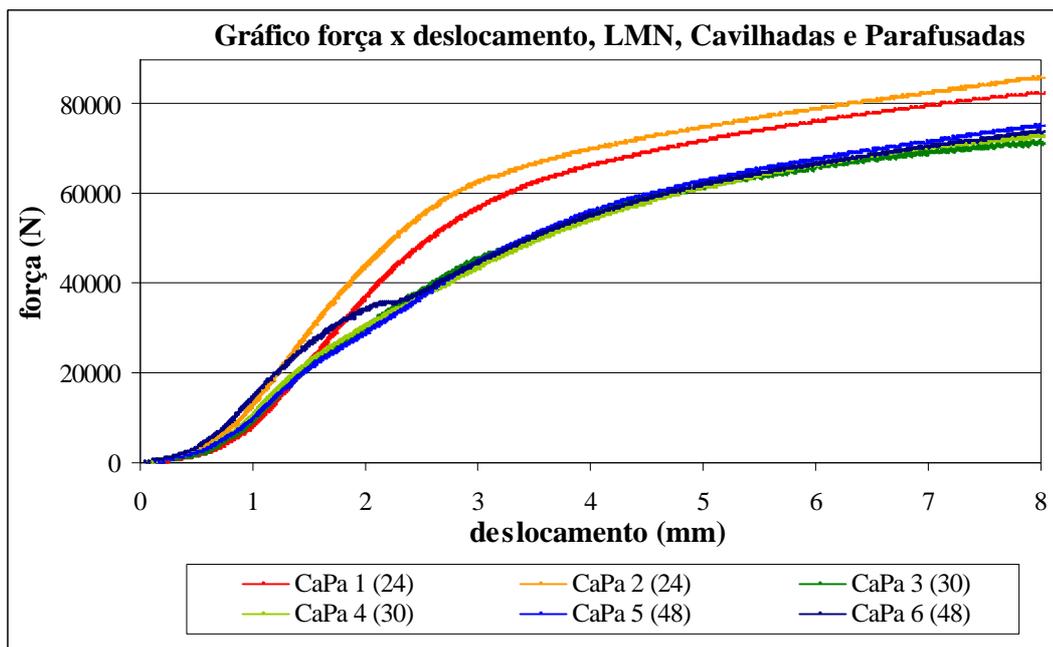


(a)



(b)

FIGURA D.7 – Gráficos Força x Deslocamento de Ligações Mecânicas Normais (LMN), Ca: a) Sobrepostos; b) Deslocados



(a)

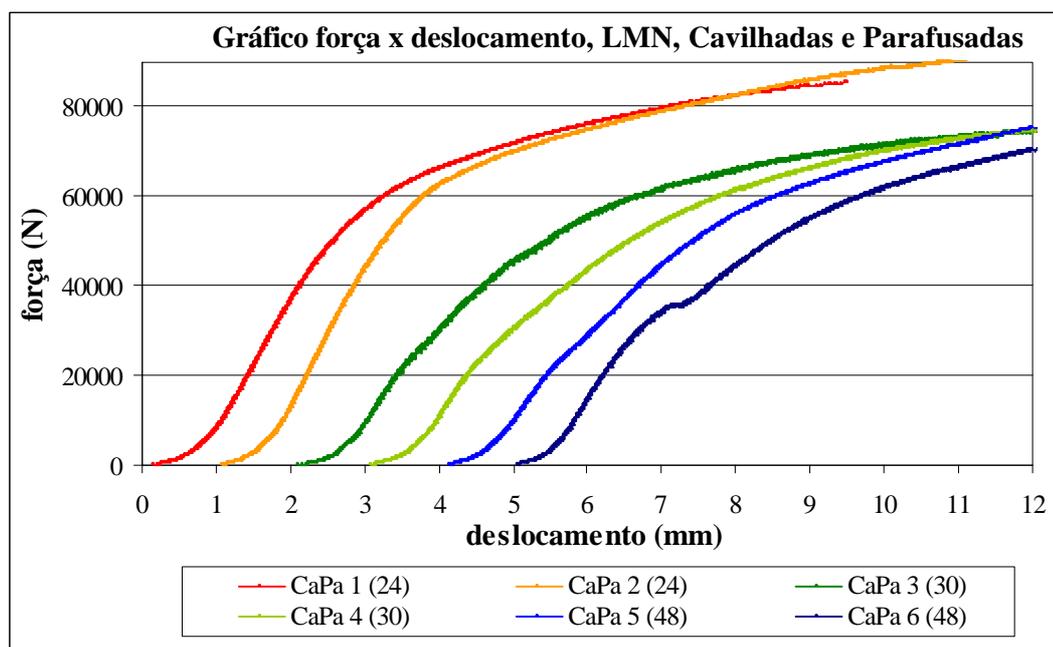
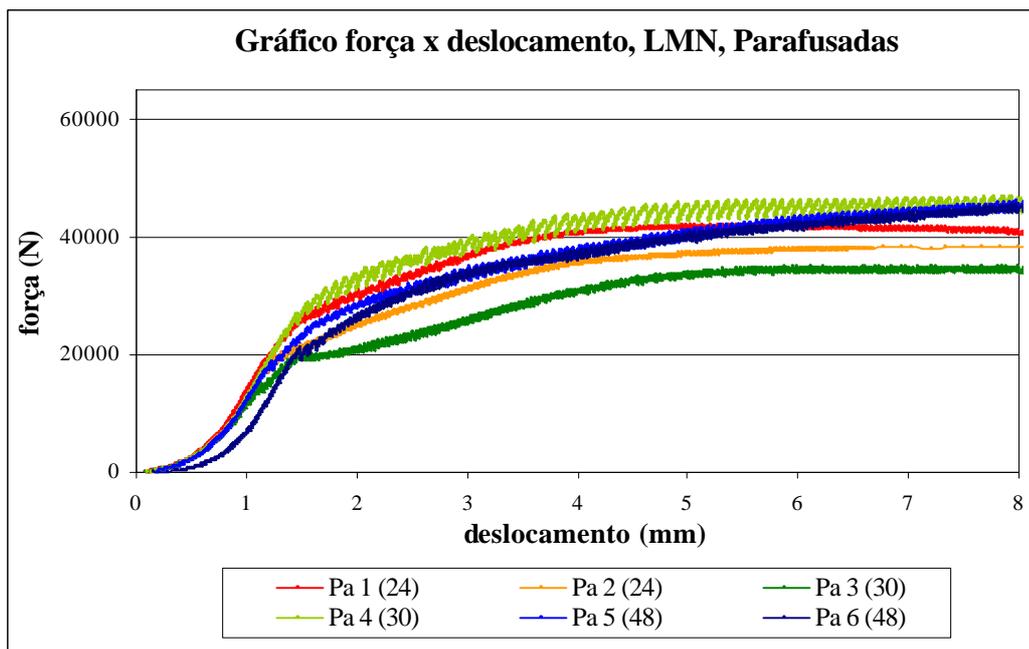
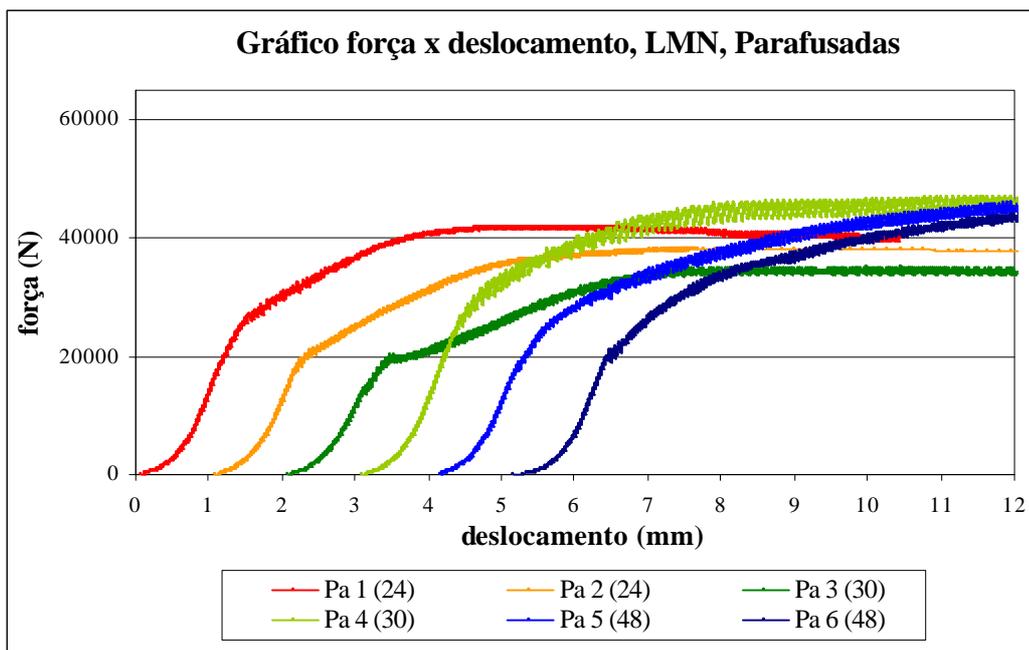


FIGURA D.8 – Gráficos Força x Deslocamento, LMN, CaPa: a) Sobrepostos; b) Deslocados



(a)



(a)

FIGURA D.9 – Gráficos Força x Deslocamento, LMN, Pa: a) Sobrepostos;
b) Deslocados

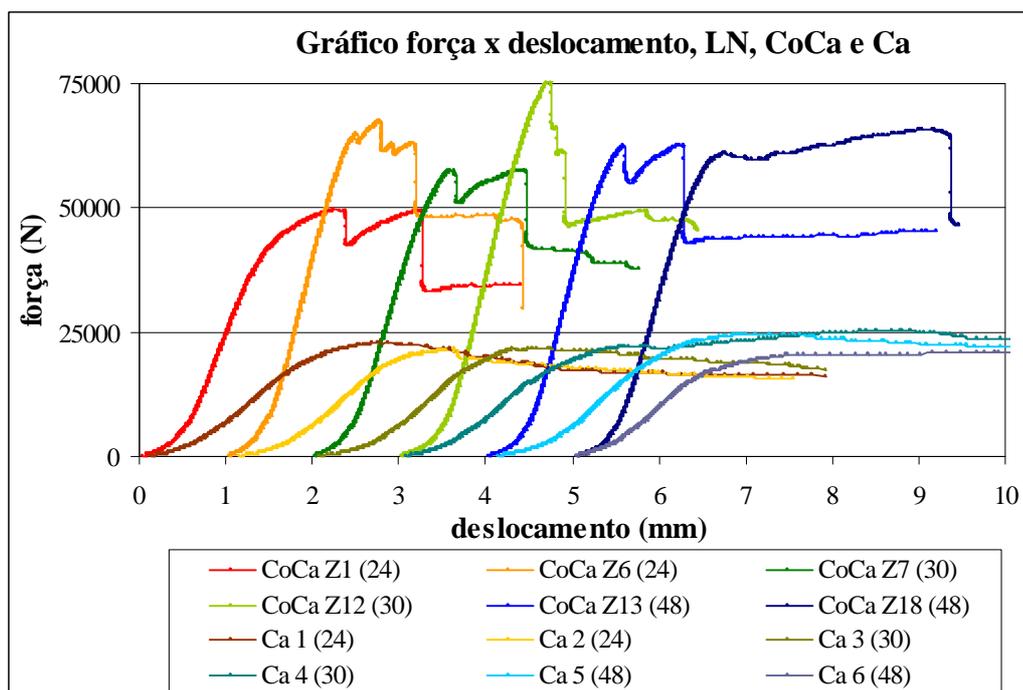


FIGURA D.10 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Normais: CoCa e Ca

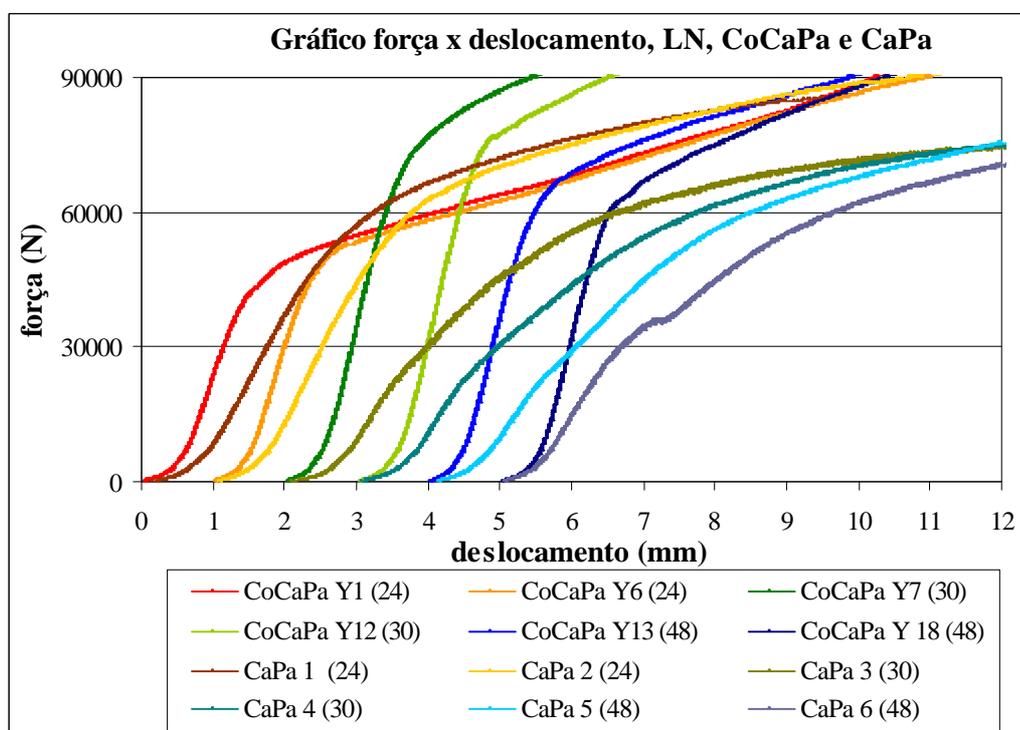


FIGURA D.11 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Normais: CoCaPa e CaPa

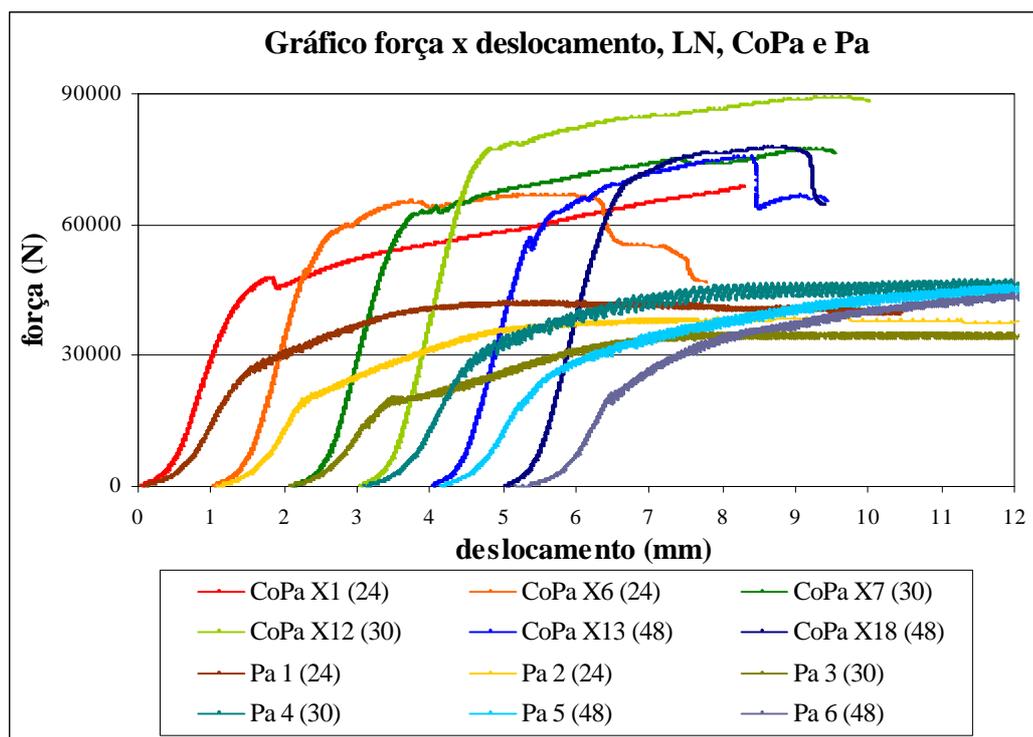


FIGURA D.12 – Gráfico Força x Deslocamento de Ligações Normais: CoPa e Pa

ANEXO E**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS
EXPERIMENTAIS**

E.1

ESTIMADORES AMOSTRAIS, INTERVALO DE CONFIANÇA E RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA

1.1 Amostra e Estimadores Amostrais

Seja X uma variável populacional em estudo, com média (μ) e variância (σ^2) populacional. Uma amostra aleatória de X é o conjunto de n variáveis aleatórias independentes (X_1, X_2, \dots, X_n), tal que cada X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) tem a mesma distribuição da variável X (μ, σ^2).

Para uma amostra aleatória, estimador é qualquer variável aleatória função dos elementos amostrais, com importância destacada para a média e variância amostrais.

A média amostral (\bar{x}) é o estimador para a média populacional (μ), na forma:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{E.1})$$

A variância amostral (S^2) é o estimador para a variância populacional (σ^2):

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} F_i \quad (\text{E.2})$$

Onde F_i é o número de repetições ou a frequência de ocorrência do valor x_i .

Prova-se, ver FONSECA e MARTINS (1995) e CROW et al. (1960), que para populações infinitas a média amostral (\bar{x}) tem distribuição normal com média igual a média da população ($\hat{\mu}$) e variância dada por $\frac{\sigma^2}{n}$.

1.2 Intervalo de Confiança e Tamanho de Uma amostra

1.2.1 Intervalo de Confiança para a Média Populacional ($\hat{\mu}$)

a) Quando a Variância (S^2) é Conhecida:

Para o caso de populações infinitas, a variável padronizada de \bar{x} é definida por:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (\text{E.3})$$

Para um nível de significância ($1-\alpha$), o intervalo de confiança da média populacional é:

$$\bar{x} - z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{E.4})$$

Onde $z\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ é a abscissa da curva de distribuição normal padrão, definida pela Eq. (E.05), associada à área acumulada $F(z) = 1 - \alpha/2$, como representado na FIG. E.1.

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz \quad (\text{E.5})$$

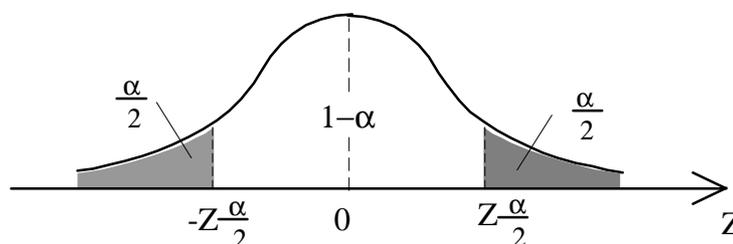


FIGURA E.1 – Curva de Distribuição Normal Padrão, com Intervalo Central de Confiança de $1-\alpha$

b) Quando a Variância (s^2) é desconhecida:

Quando não se conhece σ é preciso substituí-lo pelo desvio padrão amostral S , que contrariamente a σ é uma variável aleatória, resultando no quociente entre duas variáveis aleatórias, \bar{x} e S :

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (\text{E.6})$$

Prova-se que t tem distribuição “ t ” de Student com $(n-1)$ graus de liberdade, ver FONSECA e MARTINS (1995) e CROW et al. (1960). Para um nível de significância de $(1-\alpha)$, o intervalo de confiança da média populacional é:

$$\bar{x} - t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{E.7})$$

Onde $-t(\frac{\alpha}{2})$ e $t(\frac{\alpha}{2})$ são as abscissas da curva de distribuição de Student, definida pela Eq. (E.08) e representada na FIG. E.2, associadas às correspondentes áreas acumuladas superiores, dadas, respectivamente, por $P(t) = (1-\alpha/2)$ e $P(t) = \alpha/2$ e, para $\varphi = n-1$ graus de liberdade:

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{(\varphi-1/2)!}{(\varphi-2/2)! \sqrt{\pi \cdot \varphi}} \left(1 + t^2/\varphi\right)^{-(\varphi+1)/2} dt \quad (\text{E.8})$$

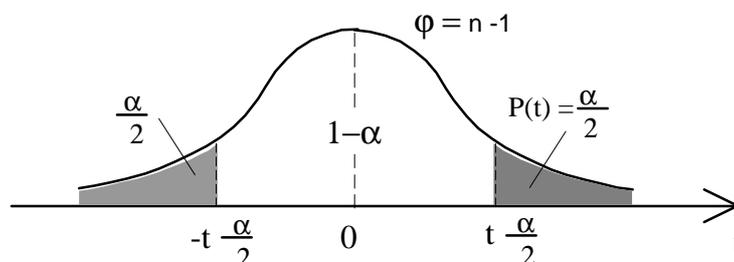


FIGURA E.2 – Curva de Distribuição de Student, com Intervalo Central de Confiança de $1-\alpha$

1.2.2 Intervalo de Confiança para a Variância (s^2)

Demonstra-se, ver FONSECA e MARTINS (1995) e CROW et al. (1960), que $\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}$ tem distribuição qui-quadrado com $(n-1)$ graus de liberdade. Para um nível de significância de $(1-\alpha)$, o intervalo de confiança para a variância (σ^2) vale:

$$\frac{(n-1)S^2}{\chi_{\text{sup}}^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2}{\chi_{\text{inf}}^2} \quad (\text{E.9})$$

Onde χ_{inf}^2 e χ_{sup}^2 são as abscissas da curva de distribuição qui-quadrado, definida pela Eq. (E.10) e representada na FIG. E.3, associadas às correspondentes áreas acumuladas superiores, dadas, respectivamente, por $P(\chi^2) = 1-\alpha/2$ e $P(\chi^2) = \alpha/2$, para $\varphi = n-1$ graus de liberdade:

$$P(\chi^2) = \int_{\chi^2}^{\infty} \frac{1}{\chi^2 (\varphi-2/2)! 2^{\varphi/2}} (\chi^2)^{\frac{(\varphi-2)}{2}} e^{-\chi^2/2} d(\chi^2) \quad (\text{E.10})$$

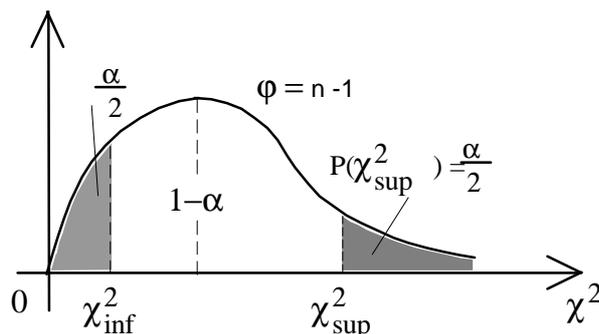


FIGURA E.3 – Curva de Distribuição Qui-Quadrado, com Intervalo Central de Confiança de $1-\alpha$

1.2.3 Intervalo de Confiança para o Desvio Padrão (s)

Como o desvio padrão vale a raiz quadrada da variância, resulta que $\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}}$ tem também uma distribuição qui-quadrado com $(n-1)$ graus de liberdade. Para um nível de significância de $(1-\alpha)$, o intervalo de confiança para o desvio padrão (σ) vale:

$$S \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_{sup}^2}} \leq \sigma \leq S \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_{inf}^2}} \quad (E.11)$$

Onde χ_{inf}^2 e χ_{sup}^2 são as abscissas da curva de distribuição qui-quadrado, associadas, respectivamente, às correspondentes áreas acumuladas superiores $P(\chi^2) = 1-\alpha/2$ e $P(\chi^2) = \alpha/2$, para $\phi = n-1$ graus de liberdade.

1.2.4 Tamanho de Uma Amostra

Pode-se determinar o tamanho necessário de uma amostra a partir da fixação de um determinado intervalo de confiança $(1-\alpha)$ para a média amostral (\bar{x}). Pela Eq. (E.04), o intervalo de diferença máxima para o valor da média da população ($\hat{\mu}$) vale:

$$2 \cdot Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq 2 \cdot d_{\mu} \Rightarrow n \geq \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{d_{\mu}} \right)^2 \quad (E.12)$$

Onde $Z_{\alpha/2}$ é a abscissa da curva normal padrão associada ao intervalo de confiança $(1-\alpha)$, σ é o desvio padrão da população e d_i é o erro amostral da média, definido pela máxima diferença que se admite entre $\hat{\mu}$ e \bar{x} . Para um intervalo de confiança de $1-\alpha = 95\%$ ($\alpha/2 = 2,5\%$), $Z = 1,96$. Para $1-\alpha = 90\%$ ($\alpha/2 = 5\%$), $Z = 1,645$.

No caso de estimativa de resistência de materiais é suficiente garantir que a média amostral não esteja acima da média da população com um certo nível de significância α' , em geral, com $\alpha'=5\%$. A Eq. (E.12) pode ser utilizada para determinar o tamanho adequado da amostra com teste de um único lado, de modo que não se possa rejeitar a hipótese de $\bar{x} = \hat{\mu}$, fazendo-se $\alpha/2 = \alpha'$, resultando $\alpha=10\%$ para $\alpha'=5\%$.

A partir da Eq. (E.11), pode-se também determinar o tamanho necessário para uma amostra, com a fixação de um intervalo de confiança para que o desvio padrão amostral seja assumido como uma determinada porcentagem desvio padrão populacional.

1.3 Resistência Característica

1.3.1 Definição

Admite em geral que as resistências dos materiais tenham distribuições normais, com a resistência característica definida pelo valor correspondendo ao quantil de 5% inferior da distribuição, ver NBR 7190 ABNT (1997), resultando na conhecida expressão:

$$f_k = f_m - 1,645.\sigma \quad (\text{E.13})$$

Onde f_k , f_m e σ representam, respectivamente, o valor característico inferior associado ao quantil de 5%, o valor médio e o desvio padrão da distribuição da propriedade considerada. Como o coeficiente de variação (δ) é dado pela relação entre o desvio padrão (σ) e a média da população ($\hat{\mu}$), a Eq. (E.13) pode ser escrita como:

$$f_k = f_m - 1,645.\sigma = f_m - 1,645.\delta.f_m = f_m (1 - 1,645.\delta) \quad (\text{E.14})$$

1.3.2 Tamanho da Amostra

A NBR 7190 da ABNT (1997) considera também que a experiência em investigação experimental em materiais estruturais mostra que em lotes de material homogêneo o coeficiente de variação dificilmente atinge 15%. A aplicação da Eq. (E.12) para o intervalo de confiança de $(1-\alpha)$, admitindo-se que a máxima diferença entre a média amostral (\bar{x}) e a média da população (μ) seja igual a $d = |\bar{x} - \mu| \leq 5\% \mu$ e que o coeficiente de variação seja de 15% ($\delta = \frac{\sigma}{\mu} = 15\%$), conduz aos seguintes tamanhos de amostras para avaliação do valor médio da resistência considerada de um lote homogêneo de madeira:

$$\text{Para } \frac{\alpha}{2} = 2,5\% : Z_{\alpha/2} = 1,960 \Rightarrow n \geq \left(\frac{1,960 \cdot 0,15\mu}{0,05\mu} \right)^2 = 34,57 \quad (\text{E.15a})$$

$$\text{Para } \frac{\alpha}{2} = 5,0\% : Z_{\alpha/2} = 1,645 \Rightarrow n \geq \left(\frac{1,645 \cdot 0,15\mu}{0,05\mu} \right)^2 = 24,35 \quad (\text{E.15b})$$

Um intervalo de confiança para o desvio padrão da população (σ) pode ser estimado a partir do desvio padrão amostral (S), pela aplicação da Eq. (E.11). Assim, na avaliação da resistência característica de um material, pode-se estimar o valor do desvio padrão (σ_{est}) a partir da distribuição do desvio padrão amostral (S), com determinada probabilidade de que ocorram valores de σ mais desfavoráveis ($\sigma_{\text{est}} < \sigma$), na forma:

$$\sigma_{\text{est}} = S \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2}} = K_{\sigma, \text{est}} \cdot S \quad (\text{E.16})$$

Onde $K_{\sigma, \text{est}} = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2}}$ é o coeficiente da relação entre o desvio padrão estimado da população (σ_{est}) o desvio padrão amostral (S), χ^2 refere-se à abscissa associada à área acumulada superior da curva de distribuição qui-quadrado, com $P(\chi^2) = 1-\beta$, sendo β a probabilidade de insucesso ($\sigma < \sigma_{\text{est}}$), para $\phi = n-1$ graus de liberdade, sendo n o número de ensaios da amostra.

1.3.3 Estimativa para o Valor Característico de Resistência de Um Material

Considerando-se a igualdade entre a média amostral e a média da população ($\bar{x} = \mu$), o coeficiente de variação estimado da população (δ_{est}) pode ser obtido a partir do coeficiente de variação amostral (δ_{am}) com emprego da Eq. (E.16), como:

$$\delta_{est} = \frac{\sigma_{est}}{\mu} = \frac{K_{\sigma,est} \cdot S}{\mu} \cong K_{\sigma,est} \cdot \frac{S}{\bar{x}} = K_{\sigma,est} \cdot \delta_{am} \quad (E.17)$$

O valor característico estimado da resistência do material pode ser obtido com emprego das Eq. (E.14) e (E.17), como:

$$f_{k,est} = \bar{x} - 1,645 \cdot \sigma_{est} = \bar{x} \cdot (1 - 1,645 \cdot K_{\sigma,est} \cdot \frac{S}{\bar{x}}) = \bar{x} \cdot (1 - 1,645 \cdot \delta_{est}) = \bar{x} \cdot K_E \quad (E.18)$$

Onde $K_E = 1 - 1,645 \cdot \delta_{est} = 1 - 1,645 \cdot K_{\sigma,est} \cdot \frac{S}{\bar{x}}$ é o coeficiente da relação entre a resistência característica estimada ($f_{k,est}$) da população e a média amostral, obtido a partir dos resultados de ensaios de n amostras aleatórias de média (\bar{x}) e desvio padrão (S), com as seguintes considerações:

- i) Ocorrência de distribuição normal para as resistências;
- ii) Intervalo de confiança de $(1-\alpha)$ para a média amostral em relação à média da população e relação entre α e n definida pela Eq. (E.12); e
- iii) Obtenção do desvio padrão estimado da população (σ_{est}) pela Eq. (E.16).

Nas TAB. E.1 apresentam-se os valores dos coeficientes $K_{\sigma,est} = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2}}$ e

$K_E = (1 - 1,645 \cdot K_{\sigma,est} \cdot \frac{S}{\bar{x}})$, para diferentes valores de n e $\frac{S}{\bar{x}}$, com probabilidade de 50% de $\sigma > \sigma_{est}$.

TABELA E.1- $K_{\sigma,est}$, σ_{esp} e K_E , para Diferentes Valores de n e S/\bar{x} , com $P(\chi^2) = 50\%$

Valores			Relação S/\bar{x}									
$\varphi = n-1$	χ^2	$K_{\sigma,est}$	0,1		0,12		0,15		0,2		0,25	
			σ_{esp}	K_E	σ_{esp}	K_E	σ_{esp}	K_E	σ_{esp}	K_E	σ_{esp}	K_E
5	4,531	1,050	0,105	0,827	0,126	0,793	0,158	0,741	0,210	0,654	0,263	0,568
10	9,342	1,035	0,103	0,830	0,124	0,796	0,155	0,745	0,207	0,660	0,259	0,575
11	10,34	1,031	0,103	0,830	0,124	0,796	0,155	0,745	0,206	0,661	0,258	0,576
12	11,34	1,029	0,103	0,831	0,123	0,797	0,154	0,746	0,206	0,662	0,257	0,577
13	12,34	1,026	0,103	0,831	0,123	0,797	0,154	0,747	0,205	0,662	0,257	0,578
14	13,34	1,024	0,102	0,831	0,123	0,798	0,154	0,747	0,205	0,663	0,256	0,579
15	14,34	1,023	0,102	0,832	0,123	0,798	0,153	0,748	0,205	0,664	0,256	0,579
16	15,34	1,021	0,102	0,832	0,123	0,798	0,153	0,748	0,204	0,664	0,255	0,580
17	16,34	1,020	0,102	0,832	0,122	0,799	0,153	0,748	0,204	0,664	0,255	0,581
18	17,34	1,019	0,102	0,832	0,122	0,799	0,153	0,749	0,204	0,665	0,255	0,581
19	18,34	1,018	0,102	0,833	0,122	0,799	0,153	0,749	0,204	0,665	0,254	0,581
20	19,34	1,017	0,102	0,833	0,122	0,799	0,153	0,749	0,203	0,665	0,254	0,582
21	20,34	1,016	0,102	0,833	0,122	0,799	0,152	0,749	0,203	0,666	0,254	0,582
22	21,34	1,015	0,102	0,833	0,122	0,800	0,152	0,749	0,203	0,666	0,254	0,582
23	22,34	1,015	0,101	0,833	0,122	0,800	0,152	0,750	0,203	0,666	0,254	0,583
25	24,34	1,013	0,101	0,833	0,122	0,800	0,152	0,750	0,203	0,667	0,253	0,583
30	29,34	1,011	0,101	0,834	0,121	0,800	0,152	0,750	0,202	0,667	0,253	0,584
40	39,34	1,008	0,101	0,834	0,121	0,801	0,151	0,751	0,202	0,668	0,252	0,585
50	49,33	1,007	0,101	0,834	0,121	0,801	0,151	0,752	0,201	0,669	0,252	0,586
100	99,33	1,003	0,100	0,835	0,120	0,802	0,151	0,752	0,201	0,670	0,251	0,587

1.3.3 Determinação do Valor Característico da Resistência - Critério do Eurocódigo 5 (1995)

O Eurocódigo 5 (1995), em sua Parte 1-1: “*Proyecto de estructuras de madera: Reglas generales y reglas para edificación*”, estabelece em seu Anexo A: “*Determinación de los valores característicos del 5^o percentil a partir de los resultados de ensaios y criterios de aceptación de una muestra*”, os requisitos e o método para determinação do valor característico a partir dos resultados de ensaios.

Como requisitos estabelece que:

- (1) O 5^o percentil deverá estimar o valor inferior com um intervalo de confiança de 84,1% admitindo uma distribuição estatística log-normal. O valor do coeficiente de variação não deverá tomar-se inferior a 0,10.
- (2) O tamanho da amostra, n, não deverá ser inferior a 30.

Como método, estabelece que se tomará uma amostra de n provetas da população, que serão ensaiadas de acordo com a norma adequada para cada propriedade denominada x, obtendo-se o valor médio $m(x)$ e o coeficiente de variação $v(x)$. O valor característico x_k será determinado pela seguinte expressão:

$$x_k = k_1 \cdot m(x) \quad (E.19)$$

Onde o valor de $v(x)$ não deverá ser tomado inferior a 0,10.

$$k_1 = \exp[-(2,645 + 1/\sqrt{n}) \cdot v(x) + 0,15] \quad (E.20)$$

Na TAB. E.2 são relacionados os valores de K_1 .

TABELA E.2 – Coeficiente k_1

Coeficiente de variação $v(x)$	Tamanho da amostra				
	30	40	50	100	∞
0,10	0,876	0,878	0,879	0,883	0,892
0,12	0,828	0,830	0,832	0,836	0,846
0,14	0,782	0,785	0,787	0,791	0,802
0,16	0,739	0,742	0,744	0,749	0,761
0,18	0,698	0,701	0,704	0,709	0,722
0,20	0,660	0,663	0,665	0,671	0,685
0,22	0,624	0,627	0,629	0,635	0,649
0,24	0,589	0,593	0,595	0,601	0,616
0,26	0,557	0,561	0,563	0,569	0,584
0,28	0,526	0,530	0,532	0,539	0,554

E.2

ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE MÉDIAS DE LIGAÇÕES COLADAS

2.1 Introdução

Um experimento é realizado, em geral, para avaliar a inferência de possíveis causas ou fatores sobre determinados efeitos ou resultados, isto é, se existem sobre os efeitos de interesse influências das possíveis causas e, se existirem, qual é sua dimensão. Quando os efeitos podem ser influenciados por mais de um fator, os experimentos tornam-se mais complexos e podem ser conduzidos de vários modos. Uma abordagem clássica consiste em restringir a atenção para um fator ou variável a cada vez, mantendo-se fixos os demais fatores. Tal procedimento restringe as conclusões ao não avaliar as influências cruzadas ou das interações entre os fatores independentes sobre os resultados.

A análise de variância é um método estatístico, desenvolvido por Fisher, que verifica, por meio de testes de igualdade de médias, se os fatores considerados produzem influências significativas nos resultados, ver FONSECA e MARTINS (1995). A base da análise de variância está nas comparações (teste F) que podem ser efetuadas com os estimadores da variância, considerada comum para todos os tratamentos.

2.2 Análise de Variância - Conceituação

2.2.1 Hipóteses Básicas da Análise de Variância

- 1) As amostras devem ser aleatórias e independentes, conduzindo a erros independentes;
- 2) Normalidade dos erros: os erros experimentais devem ter distribuição normal;
- 3) Homogeneidade dos erros: os erros experimentais devem ter a mesma variância;
- 4) Os efeitos das variações são aditivos.

2.2.2 Análise de Variância com um Fator

Para análises com um único fator ou variável independente (β), em m diferentes níveis ou tratamentos ($i = 1, 2, \dots, l$), a variável de interesse ou dependente é medida em amostras ($k = 1, 2, \dots, n_i$) com n_i repetições de cada tratamento. Com base na hipótese 4 é possível escrever a seguinte expressão:

$$x_{ik} = \mu + \beta_i + e_{ik} \quad (\text{E.21})$$

Onde x_{ik} representa a k -ésima observação ou valor da variável dependente do i -ésimo nível do fator ou tratamento, β , μ é a média da população, β_i é o efeito do fator β no nível i e e_{ik} é o erro aleatório correspondente (ao resultado x_{ik}), admitido com uma distribuição normal independente com média zero e variância comum.

A hipótese nula é que todos os tratamentos tenham médias iguais:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_l \quad (\text{E.22})$$

Onde $\mu_i = \mu(\beta_i)$ representa a média do tratamento ou nível i do fator β .

A hipótese nula implica que as variáveis x_{ik} , para os m tratamentos, podem ser consideradas iguais, isto é: $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_l = 0$.

A hipótese alternativa é de que ao menos um par de média seja diferente:

$$H_1 : \mu_p = \mu_q \text{ para } p \neq q \quad (\text{E.23})$$

Para um nível de significância α , a aceitação de H_0 implica considerar que não há influências significativas na variável dependente em estudo para os diferentes fatores. A rejeição de H_0 indica, com risco α , que o fator ou variável independente considerado exerce influência nos resultados da variável dependente em análise.

Os resultados da análise de variância podem ser resumidos na TAB. E.3.

TABELA E.3 - Quadro de Resultados da Análise de Variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios
Entre tratamentos	$Q_e = \sum_{i=1}^l \frac{1}{n_i} \left(\sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} \right)^2$	$(l-1)$	$S_e^2 = \frac{Q_e}{(l-1)}$
Dentro das amostras (residual)	$Q_r = Q_t - Q_e$	$(n-l)$	$S_r^2 = \frac{Q_r}{(n-l)}$
Total	$Q_t = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} \right)^2$	$(n-1)$	

O teste F consiste em obter, inicialmente, o fator F calculado (F_{calc}) pela relação:

$$F_{\text{calc}} = \frac{S_e^2}{S_r^2} \quad (\text{E.24})$$

A seguir, procede-se à comparação de F_{cal} com o valor crítico tabelado, $F_{\alpha}(l-1, n-l)$, com nível de significância α , como representado na FIG. E.4. Se $F_{\text{cal}} > F_{\alpha}(l-1, n-l)$, deve-se rejeitar H_0 , com risco α de que a hipótese nula seja verdadeira. Se $F_{\text{cal}} \leq F_{\alpha}(l-1, n-l)$, aceita-se a hipótese nula H_0 , com risco α de que o haja influência dos tratamentos na variável analisada.

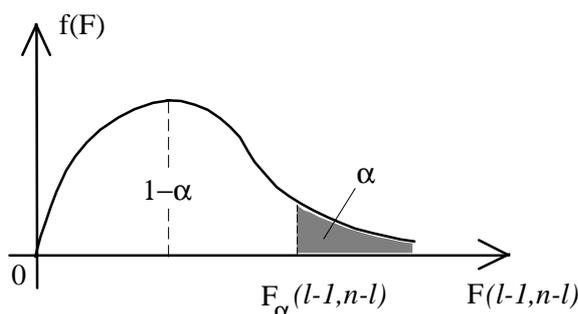


FIGURA E.4 – Curva de distribuição de F , com zona crítica de rejeição achurada

2.2.3 Análise de Variância de Dois Fatores com Repetições

Na análise de variância de dois fatores independentes, β_i (com l diferentes níveis) e ζ_j (com c diferentes níveis) e r repetições para cada nível ij , é possível estimar a interação entre os diferentes fatores, podendo-se escrever a variável dependente na forma:

$$x_{ijk} = \mu + \beta_i + \eta_j + \delta_{ij} + e_{ijk} \quad (\text{E.25})$$

Onde x_{ijk} representa a k -ésima observação ou valor da variável dependente, do i -ésimo nível do fator β e j -ésimo nível do fator ζ , μ é a média da população, β_i é o efeito do fator β no nível i ou efeito das linhas, ζ_j é o efeito do fator ζ no nível j ou efeito das colunas, δ_{ij} representa o efeito da interação do nível i do fator β e do nível j do fator ζ , sendo e_{ijk} é o erro aleatório correspondente.

Na análise de variância com dois fatores e repetições pode-se montar o quadro representado na TAB. E.4.

TABELA E.4 – Quadro de Resultados da Análise de Variância de Dois Fatores com Repetições

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios
Entre linhas	$Q_{el} = \frac{1}{n} \left[l \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 \right]$	$(l-1)$	$S_1^2 = \frac{Q_{el}}{(l-1)}$
Entre colunas	$Q_{ec} = \frac{1}{n} \left[c \sum_{j=1}^c \left(\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 \right]$	$(c-1)$	$S_c^2 = \frac{Q_{ec}}{(c-1)}$
Interação	$Q_i = Q_t - Q_{el} - Q_{ec} - Q_r$	$(l-1)(c-1)$	$S_i^2 = \frac{Q_i}{(l-1)(c-1)}$
Residual	$Q_r = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk}^2 - \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \frac{1}{r} \left(\sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2$	$lc(r-1)$	$S_r^2 = \frac{Q_r}{lc(r-1)}$
Total	$Q_t = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2$	$(n-1)=lcr-1$	$S_t^2 = \frac{Q_t}{(lcr-1)}$

A seguir podem ser calculados os seguintes valores:

$$F_{l,calc} = \frac{S_l^2}{S_r^2}, F_{c,calc} = \frac{S_c^2}{S_r^2} \text{ e } F_{i,calc} = \frac{S_i^2}{S_r^2} \quad (E.26)$$

A comparação dos valores calculados, com os respectivos valores críticos tabelados, para o correspondente nível de significância α adotado:

$$F_{\alpha}(1-l, lcr-1), F_{\alpha}(c-1, lcr-1) \text{ e } F_{\alpha}((l-1)(c-1), lcr-1) \quad (E.27)$$

permite avaliar a existência de influência significativa dos fatores e de sua interação sobre a variável dependente em estudo.

2.3 Análise de Variância e Testes de Comparação de Médias - Ligações Coladas Paralelas

2.3.1 Introdução

Foram efetuadas análises de variância das resistências das ligações em função dos seguintes fatores: tipo de ligação ou tratamento (trat) , espessura da peça central (tc) e faixa de densidade. Inicialmente, apresenta-se uma avaliação para cada um desses fatores isoladamente sobre todo o conjunto de resultados. A seguir, apresentam-se as análises da resistência da ligação para cada um dos agrupamentos de mesmas dimensões das áreas coladas (bc, hc), em função do tipo de ligação, da espessura da peça central e da interação desses fatores, seguida do teste de comparação das médias (Tukey), para explicitar a diferenciação entre as mesmas, efetuado quando um dos fatores ou a interação apresentar influência sobre os resultados, para o nível de significância de 5%.

As tabelas apresentadas a seguir foram obtidas com emprego do programa computacional Sistema para Análise Estatística - SAEG (2004), com os valores de resistência e rigidez referidos ao teor de umidade de 12%. O parâmetro p indica a probabilidade ou o nível de significância a partir do qual a hipótese nula, de igualdade entre as médias, deve ser rejeitada. O valor de p indicado por (*****) indica que a hipótese nula não pode ser rejeitada para nenhum nível de significância.

2.3.2 Análise de Variância da Resistência da Ligação (F_u)

a) Análise do conjunto de resultados para cada fator isoladamente

Os resultados da análise de variância (ANOVA) do conjunto de resultados de resistência das ligações em função do tipo de ligação, da espessura da peça central e da faixa de densidade estão apresentados na TAB. E.5. Os valores médios das resistências correspondentes estão apresentados na TAB. E.6.

TABELA E.5 – ANOVA da Resistência (F_u), LCP, n = 310

Fator	Graus de liberdade dos efeitos (gl_{ef})	Graus de liberdade dos resíduos (gl_{er})	F_{calc}	p
Tipo de ligação	2	307	0,698	0,498
Espessura tc	2	307	20,822	3,3E-09
Densidade	1	308	4,348	0,038

TABELA E.6 – Resistências Médias, LCP, n = 310

Tipo de ligação	Resistência média (N)	Espessura tc (mm)	Resistência média (N)	Faixa de densidade	Resistência média (N)
CoCa	183506	24	160606	BD	180914
CoCaPa	189316	30	181389	AD	200074
CoPa	196668	40	227269		

b) Análise para agrupamentos de mesmas dimensões em função do tipo de ligação (trat), da espessura da peça central (tc) e da interação (trat x tc). Tabelas e testes de média (Tukey)

TABELA E.7 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias, bc = hc = 72 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)			Comp.		
trat	2	0,467	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	6,16	0,00625		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,614	*****	24	12	52026	59941	51854	54607	b
Resíduo	27			30	12	62130	57283	65236	61550	b
				48	12	78812	71919	93611	81448	a
				Todos	36	64323	63048	70234	65868	

***** não-significativo

TABELA E.8 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela de Médias, bc = hc = 96 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	0,316	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	2,002	0,15464		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,301	*****	24	12	122848	133000	142214	132687
Resíduo	27			30	12	134206	149484	149953	144548
				48	12	161821	167459	150030	159770
				Todos	36	139625	149981	147399	145668

TABELA E.9 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela de Médias bc=72 mm, hc=108 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	0,112	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	3,040	0,06446		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,154	*****	24	12	117708	118462	117610	117927
Resíduo	27			30	12	124900	138450	130486	131279
				48	12	141898	140445	149490	143944
				Todos	36	128169	132452	132529	131050

TABELA E.10 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias, bc=hc= 120 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				Comp.	
trat	2	6,768	0,00415	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	13,306	0,00000		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,703	*****	24	12	141515	180717	179421	167218	b
Resíduo	27			30	12	166070	184558	197411	182680	b
				48	12	190240	263130	246717	233363	a
				Todos	36	165942	209468	207850	194420	
				Comp. 5%		B	A	A		

TABELA E.11 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias,

bc = 96 mm, hc = 144 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de Ligação (trat)				Comp.	
trat	2	1,526	0,23551	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	13,062	0,00011		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,464	*****	24	12	166735	163222	160721	163560	B
Resíduo	27			30	12	188918	171504	196595	185673	B
				48	12	228244	171504	236417	212055	A
				Todos	36	194633	168743	197911	187096	

TABELA E.12 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias, bc = hc = 144 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de Ligação (trat)				Comp.	
trat	2	2,073	0,14531	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	15,854	0,00003		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	1,663	0,18750	24	12	218522	211614	246687	225608	c
Resíduo	27			30	12	269179	266828	265080	267029	b
				48	12	262944	321860	321331	302045	a
				Todos	36	250215	266767	277700	264894	

TABELA E.13 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias,

bc = 120 mm, hc = 180 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de Ligação (trat)				Comp.	
trat	2	0,770	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	61,232	0,000		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,483	*****	24	12	185011	194353	195417	191594	c
Resíduo	27			30	12	231385	211332	226760	223159	b
				48	12	297993	295002	316732	303243	a
				Todos	36	238130	233563	246303	239332	

TABELA E.14 – ANOVA (F_u), LCP, Tabela e Teste de Médias,

bc = 144 mm, hc = 216 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				Comp.	
trat	2	0,254	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	38,775	0,000		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,118	*****	24	12	220764	228089	233594	227482	b
Resíduo	27			30	12	248661	239372	245682	244572	b
				48	12	380602	368026	396750	381793	a
				Todos	36	283342	278496	292008	284616	

c) Análise para agrupamentos de mesmas dimensões em função em Função da Faixa de Densidade e Tabelas de Médias.

TABELA E.15 – ANOVA (F_u) em Função da Faixa de Densidade, LCP, Tabela de Médias

bc x hc	Graus de liberdade		Análise de variância		Valores médios (N)		
(mm)	efeitos	Resíduos	F_{calc}	p	(BD)	(AD)	Todos
72 x 72	1	34	21,004	0,00006	78956	52780	65868
96 x 96	1	34	9,696	0,00374	130714	160622	145668
72 x 108	1	34	14,383	0,00059	117369	144730	131050
120 x 120	1	34	1,479	0,23223	203773	185066	194420
96 x 144	1	34	16,418	0,00028	169910	211086	190498
144 x 144	1	34	1,409	0,24352	255668	274120	264894
120 x 180	1	34	4,346	0,04469	221653	257011	239332
144 x 216	1	34	6,513	0,01537	252311	316920	284616

2.3.2 Análise de Variância da Rigidez da Ligação (S_{lig})

TABELA E.16 – ANOVA (S_{lig}), LCP, Tabela e Teste de Médias, bc = hc = 120 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)						
N = 21	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				Comp.	
trat	2	0,108	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	18,788	0,00020		n	6	6	9	21	
trat x tc	4	0,211	*****	24	7	301259	308484	286312	296917	b
Resíduo	12			30	7	358318	348975	358196	355596	a
				48	7	388592	389286	386354	387831	A
				Todos	21	349390	348915	343621	346782	

2.3.3 Análise de Variância da Resistência ($F_{0,2\%}$) e da Rigidez de Ligações Coladas Paralelas Sob Força Excêntrica

TABELA E.17 - ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCP Sob Força Excêntrica, Tabela e Teste de Médias

Análise de variância				Tabela de médias (N/mm), teste de médias (Tukey)						
n = 18	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				Comp.	
trat	2	0,643	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	48,909	0,00001		n	6	6	6	18	
trat x tc	4	1,275	0,34857	24	6	111602	108208	126654	115488	c
Resíduo	9			30	6	156637	131557	147231	145142	b
				48	6	187107	203130	196860	195699	a
				Todos	18	151782	147632	156915	152110	

TABELA E.18 – ANOVA (S_{lig}), LCP Sob Força Excêntrica, Tabela e Teste de Médias

Análise de variância				Tabela de médias (N/mm), teste de médias (Tukey)						
n = 18	gl	F _{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				Comp.	
trat	2	0,275	*****	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	6,652	0,01684		n	6	6	6	18	
trat x tc	4	0,071	*****	24	6	155279	167197	151253	157910	b
Resíduo	9			30	6	179115	184010	178626	180584	ab
				48	6	203475	218684	215519	212559	a
				Todos	18	179290	189964	181800	183684	

2.4 Análise de Variância e Testes de Comparação de Médias - Ligações Coladas Normais

2.4.1 Introdução

Para as ligações coladas normais foram efetuadas análises de variância para a resistência convencional ($F_{0,2\%}$), para a forma máxima resistida ($F_{m\acute{a}x}$) e para a rigidez, em função das variáveis independentes ou dos fatores definidos pelo tipo de ligação ou tratamento (trat), para a espessura da peça central (tc) e faixa de densidade. Inicialmente, apresenta-se uma avaliação de todo o conjunto de resultados das variáveis independentes para cada um desses fatores isoladamente. A seguir, apresentam-se as análises dos resultados da resistência convencional e da força máxima resistida em função do tipo de ligação (trat), da espessura da peça central (tc) e de sua interação (trat x tc), para cada um dos agrupamentos de mesmas dimensões das áreas coladas (bc, hc), seguida do teste de comparação das médias (Tukey), para explicitar a diferenciação entre as mesmas, efetuada quando um dos fatores ou a interação entre os dois fatores apresentou influência sobre os resultados, para o nível de significância de $\alpha = 5\%$.

2.4.2 Análise de Variância da Resistência Convencional da Ligação ($F_{0,2\%}$)

a) Análise do conjunto de resultados para cada fator isoladamente

Na TAB E.19, estão apresentados os resultados das análises de variância para todo o conjunto de resultados da resistência convencional da ligação ($F_{0,2\%}$) em função do tipo de ligação, da espessura da peça central e da faixa de densidade. Na TAB. E.20, estão os valores médios da resistência convencional para os diferentes fatores.

TABELA E.19 – Análise de Variância da Resistência ($F_{0,2\%}$), LCN, $n = 169$

Parâmetro / Variável ind.	Graus de liberdade dos efeitos (gl_{ef})	Graus de liberdade dos resíduos (gl_{er})	F_{calc}	P
Tipo de ligação	2	166	0,709	0,494
Espessura tc	2	166	0,679	0,509
Faixa de densidade	1	167	10,659	0,001

TABELA E.20 – Valores Médios da Resistência ($F_{0,2\%}$), LCN, para os Fatores: Tipo de Ligação, Espessura da Peça Central e Faixa de Densidade

Tipo de ligação	$F_{0,2\%}$ (N)	Espessura tc (mm)	$F_{0,2\%}$ (N)	Faixa de densidade	$F_{0,2\%}$ (N)
CoCa	58209	24	58270	BD	56373
CoCaPa	62722	30	61023	AD	66368
CoPa	61160	40	62723		

b) Análise para agrupamentos de mesmas dimensões em função do tipo de ligação (trat), da espessura da peça central (tc) e da interação (trat x tc). Tabelas e Testes de Média.

TABELA E.21 – ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCN, Tabela e Teste de Médias, $bc = hc = 72$ mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	11,674	0,00022	(mm)	CoCa	Co	CoPa	Todos	
tc	2	1,488	0,24382		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,502	*****	24	12	31202	23905	37233	30780
Resíduo	27			30	12	32167	21102	37483	30251
				48	12	32843	30653	40074	34523
				Todos	36	32070	25220	38264	31851
Comp	5%			A	B	A			

***** não-significativo

TABELA E.22 – ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, Tabela de Médias, bc = hc = 96 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
Trat	2	2,985	0,06744	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
Tc	2	0,835	*****		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,652	*****	24	12	47992	67784	68798	61525
Resíduo	27			30	12	55533	70627	65509	63890
				48	12	67121	77004	63736	69287
				Todos	36	56882	71805	66014	64901

TABELA E.23 – ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, Tabela de Médias, bc = hc = 120 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	2,236	0,12635	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	0,039	*****		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,239	*****	24	12	59444	75562	66726	67244
Resíduo	27			30	12	61126	71825	73555	68835
				48	12	62904	75047	66725	68225
				Todos	36	61158	74145	69002	68102

TABELA E.24 – ANOVA ($F_{0,2}$) LCN, Tabela de Médias, bc = hc = 144 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	0,021	*****	(mm)	CoCa	Co	CoPa	Todos	
tc	2	1,169	0,32578		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,659	*****	24	12	79377	79201	74214	77598
Resíduo	27			30	12	81401	75955	75623	77660
				48	12	78592	84457	87337	83462
				Todos	36	79790	79871	79058	79573

c) Análise para agrupamentos de mesmas dimensões em função da faixa de densidade e tabela de médias.

TABELA E.25 – ANOVA ($F_{0,2}$) Função da Densidade, LCN, Tabela de Médias, $n = 36$

bc=hc (mm)	n	Graus de liberdade		F_{calc}	p	Valores médios (N)		
		efeitos	resíduos			(BD)	(AD)	Todos
72	36	1	34	9,805	0,00357	35731	27971	31851
96	36	1	34	41,714	0,00000	53511	76290	64901
120	36	1	34	455,6	0,00000	57021	78692	67856
144	36	1	34	13,058	0,00097	74213	84932	79573

2.4.3 Análise de Variância da Força Máxima da Ligação ($F_{máx}$)

a) Análise do conjunto de resultados para cada fator isoladamente

Na TAB E.26, estão os resultados das análises de variância para a força máxima resistida pela ligação em função do tipo de ligação, da espessura da peça central e da faixa de densidade. Na TAB. E.25, estão os valores médios para os diferentes valores das variáveis independentes consideradas.

TABELA E.26 – Análise de Variância para a Força Máxima ($F_{máx}$), LCN, $n = 169$

Parâmetro / Variável ind.	Graus de liberdade dos efeitos (gl_{ef})	Graus de liberdade dos resíduos (gl_{er})	F_{calc}	p
Tipo de ligação	2	166	9,383	0,0001
Espessura tc	2	166	0,193	0,825
Faixa de densidade	1	167	9,586	0,002

TABELA E.27 – Valores Médios da Força Máxima ($F_{m\acute{a}x}$) para as Variáveis Independentes: Tipo de Ligação, Espessura da Peça Central e Faixa de Densidade

Tipo de ligação	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	Espessura tc (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	Faixa de densidade	$F_{m\acute{a}x}$ (N)
CoCa	65084	24	60138	BD	68171
CoCaPa	88508	30	62597	AD	82865
CoPa	70359	40	60670		

b) Análise para agrupamentos de mesmas dimensões em função do tipo de ligação (trat), da espessura da peça central (tc) e da interação (trat x tc). Tabelas e testes de média.

TABELA E.28 – ANOVA ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, Tabela e Teste de Médias, bc = hc = 72 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)					
n = 36	gl	F_{calc}	P	tc Tipo de ligação (trat)					
trat	2	14,370	0,00006	(mm)					
tc	2	1,064	0,35922		n	CoCa	Co	CoPa	Todos
trat x tc	4	0,609	*****	24	12	12	12	12	36
Resíduo	27			30	12	37040	25873	41179	34697
				48	12	38196	24099	41798	34698
				Todos	36	37455	21365	44208	34343
				Comp	5%	37564	23779	42395	34579
						A	B	A	

TABELA E.29 – ANOVA ($F_{m\acute{a}x}$), LCN, Tabela e Teste de Médias, bc = hc = 96 mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc Tipo de ligação (trat)					
trat	2	14,982	0,00004	(mm)					
tc	2	1,187	0,32045		n	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos
trat x tc	4	0,319	*****	24	12	12	12	12	36
Resíduo	27			30	12	53015	94056	71909	72993
				48	12	60706	106042	69846	78865
				Todos	36	71898	112810	71904	85537
				Comp	5%	61873	104303	71219	79132
						B	A	B	

TABELA E.30 – ANOVA ($F_{\text{máx}}$), LCN, Tabela e Teste de Médias, $bc = hc = 120$ mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	9,005	0,00101	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	0,197	*****		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,070	*****	24	12	65510	102663	72315	80163
Resíduo	27			30	12	67072	106131	81264	84822
				48	12	67918	99504	72209	79877
				Todos	36	66833	102766	75263	81621
				Comp	5%	B	A	B	

TABELA E.31 – ANOVA ($F_{\text{máx}}$), LCN, Tabela e Teste de Médias, $bc = hc = 144$ mm

Análise de variância				Tabela de médias (N), teste de médias (Tukey)					
n = 36	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)				
trat	2	4,144	0,02694	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	0,102	*****		n	12	12	12	36
trat x tc	4	0,216	*****	24	12	95668	120968	92780	103139
Resíduo	27			30	12	99177	123094	98236	106836
				48	12	86266	118093	103732	102697
				todos	36	93703	120718	98250	104224
				Comp	5%	B	A	AB	

2.4.4 Análise de Variância da Rigidez da Ligação (S_{lig})

Na TAB E.32, apresentam-se os resultados das análises de variância para a rigidez da ligação de corpos-de-prova com $bc = hc = 120$ mm, em função dos fatores definidos pelo tipo de ligação (trat), pela espessura da peça central (tc) e pela faixa de densidade. Na TAB. E.33, estão relacionados os valores médios para as rigidezes em função dessas variáveis independentes. Na TAB. E.34, apresentam-se os resultados das análises de variância para a rigidez da ligação, de 36 corpos-de-prova, sendo 18 de ensaios complementares de madeira BD e 18 de madeira AD, em função dos fatores trat, tc e trat x tc.

TABELA E.32 – Análise de Variância das Rigidezes, LCN, $bc = hc = 120$ mm, $n = 55$

Parâmetro / Variável ind.	Graus de liberdade dos Efeitos (gl_{ef})	Graus de liberdade dos Erros (gl_{er})	F_{calc}	p
Tipo de ligação	2	52	0,142	0,868
Espessura tc	2	52	0,766	0,470
Densidade	1	53	57,678	5,0 E-10

TABELA E.33 – Valores Médios de Rigidez, LCN, para as Variáveis Independentes:

Tipo de Ligação, Espessura da Peça Central e Faixa de Densidade

Tipo de ligação	Rigidez (N/mm)	Espessura tc (mm)	Rigidez (N/mm)	Faixa de densidade	Rigidez (N/mm)
CoCa	62039	24	58958	BD	55607
CoCaPa	63218	30	63364	AD	74326
CoPa	61107	48	63582	Todos	62074
Todos	62074	Todos	62074		

TABELA E.34 – ANOVA da Rigidez (Slig) LCN, Tabela de Médias

Análise de variância				Tabela de médias (N)						
n = 36	gl	F_{calc}	p	Tipo de ligação (trat)						
trat	2	0,839	*****	(mm)		CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	
tc	2	1,424	0,25835		n	12	12	12	36	
trat x tc	4	0,254	*****	24	12	56056	58114	67126	60432	
Resíduo	27			30	12	64672	69414	73049	69045	
				48	12	65063	68895	66118	66692	
				todos	36	61930	65474	68764	65390	

2.4.5 Análise de Variância da Resistência ($F_{0,2\%}$) e da Rigidez de Ligações Coladas Normais Sob Força Excêntrica

TABELA E.35 - Análise de Variância ($F_{0,2\%}$, S_{lig}), LCN Sob Força Excêntrica

Propriedade	Variável independente	Fator F_{calc}	p
Resistência Convencional ($F_{0,2\%}$)	Tipo de ligação	9,340	2,3194 E-03
	Espessura tc	2,789	0,093
Força máxima ($F_{máx}$)	Tipo de ligação	62,071	5,556 E-8
	Espessura tc	0,453	0,644
Rigidez (S_{lig})	Tipo de ligação	10,743	1,273 E-3
	Espessura tc	2,352	0,129

TABELA E.36 - ANOVA ($F_{0,2\%}$), LCN Sob Força Excêntrica, Tabela e Teste de Médias

Análise de variância				Tabela de médias (N/mm), teste de médias (Tukey)						
n = 18	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)			Comp.		
trat	2	15,833	0,00113	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	7,737	0,01109		n	6	6	6	18	
trat x tc	4	0,238	*****	24	6	35726	56015	50032	47257	b
Resíduo	9			30	6	46983	62905	61732	57206	a
				48	6	50357	64521	60872	58583	a
				Todos	18	44355	61146	57545	54349	
				Comp.	5%	B	A	A		

TABELA E.37 - ANOVA (S_{lig}), LCN Sob Força Excêntrica, Tabela e Teste de Médias

Análise de variância				Tabela de médias (N/mm), teste de médias (Tukey)						
n = 18	gl	F_{calc}	p	tc	Tipo de ligação (trat)			Comp.		
trat	2	30,502	0,0010	(mm)	CoCa	CoCaPa	CoPa	Todos	5%	
tc	2	12,363	0,00262		n	6	6	6	18	
trat x tc	4	2,215	0,14792	24	6	22092	31706	25050	26283	b
Resíduo	9			30	6	25125	33755	33637	30839	a
				48	6	24838	41006	34923	33589	a
				Todos	18	24018	35489	31203	30237	
				Comp.	5%	C	A	B		

APÊNDICE A**RECOMENDAÇÕES DA NBR 7190, ABNT (1997)**

1

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

1.1 Caracterização da Resistência da Madeira Serrada

1.1.1 Alternativas para a Caracterização da Resistência da Madeira Serrada

A norma brasileira de *Projeto de estruturas de madeira*, NBR-7190, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1997), prevê em seu item 6.3 três alternativas para a caracterização da resistência da madeira serrada: caracterização completa, caracterização mínima de espécies pouco conhecidas e caracterização simplificada de espécies usuais. Prevê também a caracterização da rigidez da madeira.

Na caracterização completa das propriedades de resistência, os seguintes valores devem ser obtidos e referidos à condição de umidade padrão ($U = 12\%$):

- a) Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);
- b) Resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$);
- c) Resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$);

- d) Resistência à tração normal às fibras ($f_{t,90}$);
- e) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);
- f) Resistência de embutimento paralelo às fibras ($f_{e,0}$);
- g) Densidade básica e a densidade aparente, com os corpos-de-prova a 12% de umidade.

A caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, para projeto estrutural, deve ser feita por meio da determinação dos seguintes valores, referidos à condição padrão de umidade:

- a) Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);
- b) Resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$);
- c) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);
- d) Densidade básica e densidade aparente.

Permite-se a caracterização simplificada das resistências da madeira de espécies usuais a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras. Para as resistências a esforços normais, admite-se um coeficiente de variação de 18% e para as resistências a esforços tangenciais um coeficiente de variação de 28%. Para as espécies usuais, na falta da determinação experimental, permite-se adotar as seguintes relações para os valores característicos das resistências:

$$f_{c0,k}/f_{t0,k}=0,77 \quad (1.1a)$$

$$f_{c0,k}/f_{t0,k}=0,77 \quad (1.1b)$$

$$f_{tM,k}/f_{t0,k}=1,0 \quad (1.1c)$$

$$f_{c90,k}/f_{c0,k}=0,25 \quad (1.1d)$$

$$f_{e0,k}/f_{c0,k}=1,0 \quad (1.1e)$$

$$f_{e90,k}/f_{c0,k}=0,25 \quad (1.1f)$$

$$\text{Para coníferas: } f_{v0,k}/f_{c0,k}=0,15 \quad (1.1g)$$

$$\text{Para dicotiledôneas: } f_{v0,k}/f_{c0,k}=0,12 \quad (1.1h)$$

1.1.2 Estimativa do Valor Característico da Resistência da Madeira

Em seu item 6.4.7, a NBR 7190/97 estabelece que o valor característico da resistência da madeira deve ser estimado pela expressão:

$$f_k = \left[2 \cdot \left(\frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{n/2-1}}{n/2 - 1} \right) - f_{\frac{n}{2}} \right] \cdot 1,1 \quad (1.2)$$

Onde os resultados devem ser colocados em ordem crescente $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos-de-prova for ímpar, não se tomando para f_k valor inferior a f_1 , nem a 0,70 do valor médio (f_m).

Para a caracterização da resistência à compressão de um dado lote de madeira de peças delgadas, a NBR 7190/97 em seu Anexo B, “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, permite empregar corpos-de-prova com seção transversal quadrada, com lado igual à espessura do elemento delgado, com pelo menos 1,8 cm, e comprimento igual a três vezes o lado da seção transversal, ensaiando-se pelo menos 12 corpos-de-prova, extraídos aleatoriamente de 12 diferentes peças delgadas.

Na caracterização da resistência da madeira na compressão paralela às fibras, na tração paralela às fibras e na compressão normal às fibras, a NBR 7190/97 define que os ensaios devem se dar sob tensão uniforme e duração total de 3 a 8 minutos.

1.1.3 Amostragem

A NBR 7190/97, em seu Anexo B, “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, estabelece que na investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos, cada lote não deve ter volume superior a 12 m³. O número mínimo de corpos-de-prova deve atender aos objetivos da caracterização:

- a) caracterização simplificada: seis corpos-de-prova; e
- b) caracterização mínima de espécies pouco conhecidas: 12 corpos-de-prova.

1.1.4 Caracterização da Rigidez da Madeira

A caracterização completa de rigidez das madeiras é feita por meio da determinação dos seguintes valores, que devem ser referidos à condição padrão de umidade ($U=12\%$):

a) Valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$);

b) Valor médio do módulo de elasticidade na compressão normal às fibras ($E_{c90,m}$);

Admite-se que sejam iguais os valores médios dos módulos de elasticidade à compressão e à tração paralelas às fibras: $E_{c0,m} = E_{t0,m}$. A caracterização simplificada da rigidez das madeiras pode ser feita apenas na compressão paralela às fibras, admitindo-se a relação:

$$E_{w90} = E_{w0} / 20 \quad (1.3)$$

Na impossibilidade da realização do ensaio de compressão simples, permite-se avaliar o módulo de elasticidade $E_{CO,m}$ por meio de ensaio de flexão. Por este ensaio, determina-se o módulo aparente de elasticidade na flexão E_M , admitindo as seguintes relações:

$$\text{Coníferas: } E_M = 0,85 E_{CO} \quad (1.4a)$$

$$\text{Dicotiledôneas: } E_M = 0,90 E_{CO} \quad (1.4b)$$

A determinação do módulo de elasticidade deve ser efetuada com dois corpos-de-prova. O número mínimo de corpos-prova para caracterização da resistência da madeira deve atender aos objetivos da caracterização: 6 corpos-de-prova, para caracterização simplificada e 12 corpos-de-prova, para caracterização mínima.

1.2 – Caracterização da Resistência de Ligações Mecânicas

A NBR 7190/97 em seu anexo C, relativo à “Determinação da resistência das ligações mecânicas das estruturas de madeira”, estabelece o número mínimo de corpos-de-prova para caracterização da resistência de uma ligação: dois corpos-de-prova, para caracterização simplificada e seis corpos-de-prova, para caracterização mínima. O valor característico da resistência das ligações deve ser estimado pela expressão:

$$X_k = \left[2 \cdot \left(\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n/2-1}}{n/2 - 1} \right) - X_{n/2} \right] \cdot 1,1 \quad (1.5)$$

Onde os resultados devem ser colocados em ordem crescente $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos-de-prova for ímpar, não se tomando para X_k valor inferior a X_1 , nem a 0,70 do valor médio (X_m).

2

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

2.1 Umidade

A norma brasileira de *Projeto de estruturas de madeira*, NBR-7190 de 1997, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), define o teor de umidade da madeira pela relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, sendo obtida por meio da expressão:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde m_i é a massa inicial da madeira, em g, e m_s , é a massa da madeira seca, em g.

A resistência da madeira é fortemente influenciada por sua umidade, sendo mínima para teores de umidade igual ou superiores ao ponto de saturação das fibras, excetuando-se as resistências para rupturas provocadas por choques. A partir deste ponto, a água liberada provoca retrações e alterações na estrutura celular da madeira, acarretando um

aumento na capacidade de resistência mecânica, que passa a ser tanto maior quanto menor for a quantidade de água contida na madeira.

A NBR-7190, ABNT (1977), define que a condição padrão de referência é dada pelo teor de umidade de 12% e que na caracterização das propriedades de resistência e de rigidez de um dado lote de madeira os resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%, devem ser corrigidos para a umidade padrão de 12%, admitindo-se que a resistência e a rigidez da madeira sofram apenas pequenas variações para umidades acima de 20%. A resistência da madeira ou de ligação de peças de madeira deve ser corrigida pela expressão:

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.2)$$

A rigidez deve ser corrigida pela expressão:

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.3)$$

2.2 Densidade

A NBR-7190, ABNT (1997), define a densidade básica (ρ_{bas}) como sendo uma massa específica convencional obtida pela razão entre a massa seca e o volume saturado:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2.4)$$

Onde m_s é a massa seca da madeira, em kg, e V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metro cúbico (m^3).

A densidade aparente (ρ_{ap}) é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova com teor de umidade de 12%:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (2.5)$$

Onde m_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, em kg, e V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, em metro cúbico (m^3).

2.3 Resistência ao Cisalhamento na Lâmina de Cola

Na determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na lâmina de cola, a NBR 7190 emprega o corpo-de-prova representado na FIG. 2.1.

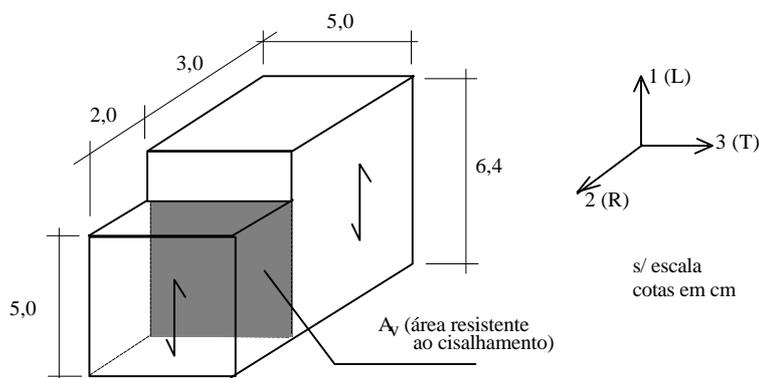


FIGURA 2.1 – Corpo-de-Prova para Ensaio de Cisalhamento na Lâmina de Cola na Direção Paralela às Fibras da Madeira.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na lâmina de cola, f_{gv} , é dada por:

$$f_{gv} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{gv,0}} \quad (2.6)$$

Onde $F_{v0,m\acute{a}x}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, em newtons, e $A_{gv,0}$ é a área inicial da lâmina de cola do corpo-de-prova, em um plano paralelo às fibras, em milímetros quadrados.

2.4 Resistência da Lâmina de Cola à Tração Normal

Na determinação da resistência da lâmina de cola à tração normal às fibras, a NBR 7190 emprega o corpo-de-prova representado na FIG. 2.2.

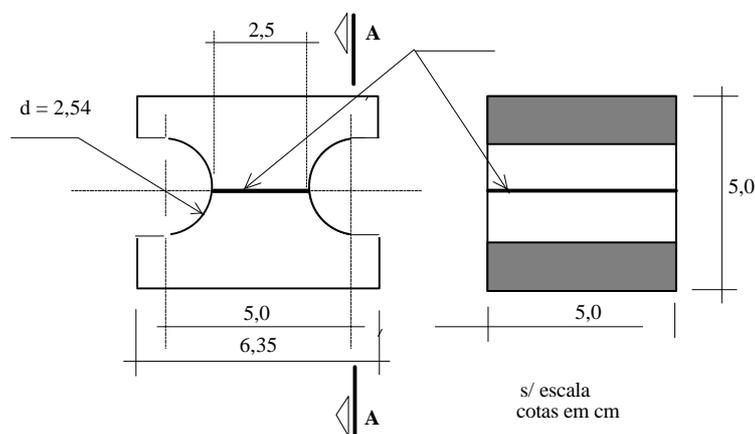


FIGURA 2.2 – Corpo-de-Prova para Ensaio de Tração na Lâmina de Cola Normal às Fibras da Madeira.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na lâmina de cola, $f_{gt,90}$, é dada por:

$$f_{gt,90} = \frac{F_{t90,m\acute{a}x}}{A_{g,90}} \quad (2.7)$$

Onde $F_{t90,m\acute{a}x}$ é a máxima força de tração normal aplicada ao corpo-de-prova, em newtons e $A_{g,90}$ é a área inicial da lâmina de cola tracionada do trecho alongado do corpo-de-prova, em milímetros quadrados.

3

DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES MECÂNICAS

A NBR-7190, ABNT (1977), em seu Anexo C, “Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira”, define uma metodologia geral para a determinação direta de resistências das ligações mecânicas com pinos metálicos, cavilhas, anéis metálicos e chapas com dentes estampados, com base em ensaios experimentais e limitação das deformações. Nas FIG. 3.1 a 3.4, apresentam-se, respectivamente, as geometrias dos corpos-de-prova, o diagrama de carregamento força relativa aplicada x tempo força, o diagrama típico força relativa x deformação específica de ligação por pino e o diagrama de carregamentos e descarregamentos sucessivos para determinação da carga limite das ligações. Os resultados dos ensaios devem ser apresentados com valores característicos das resistências referentes à umidade de 12%, com as correções para o teor de umidade de 12% efetuadas por:

$$R_{12} = R_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.1)$$

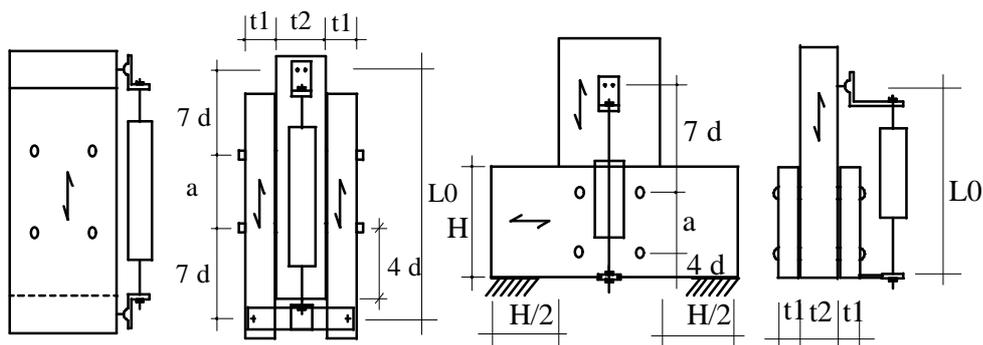


FIGURA 3.1 – Corpos-de-Prova para Ensaio de Ligações Mecânicas

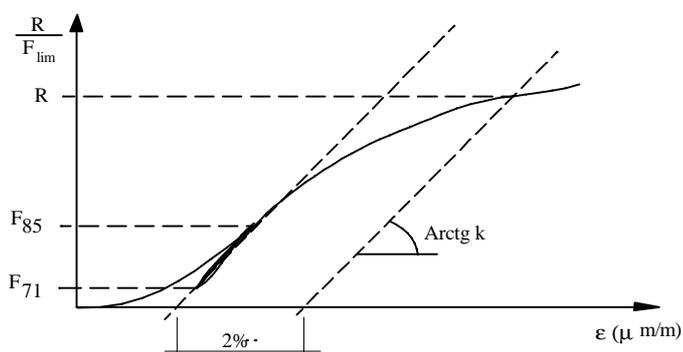


FIGURA 3.2 - Diagrama Força Relativa x Deformação Específica da Ligação

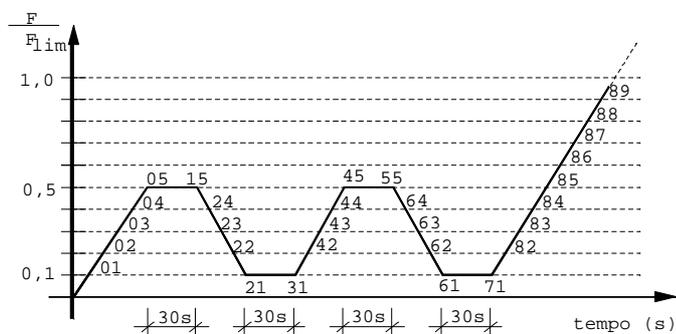


FIGURA 3.3 - Diagrama de Carregamento Força Relativa Aplicada x Tempo

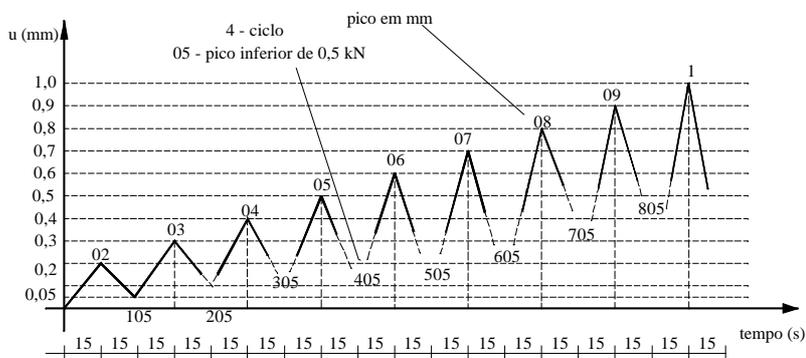


FIGURA 3.4 - Diagrama de Carregamentos e Descarregamentos Sucessivos para Determinação da Carga Limite das Ligações

APÊNDICE B**FORMULAÇÃO DA EQUAÇÃO DE GOVERNO
DAS TENSÕES CISALHANTES E DA OBTENÇÃO
DA FORÇA DE FRATURA EM JUNTAS ADESIVAS**

1

FORMULAÇÃO DA EQUAÇÃO DE GOVERNO DAS TENSÕES CISALHANTES EM JUNTAS ADESIVAS ELÁSTICAS

1.1 Introdução

HART-SMITH (1973) apresenta a formulação da equação diferencial de governo da distribuição das tensões cisalhantes em juntas adesivas e a avaliação analítica para a capacidade de carga estática de juntas adesivas laterais duplas, considerando o comportamento elasto-plástico do adesivo, a rigidez diferenciada das peças aderentes e efeitos de diferenças térmicas entre as peças aderentes. Neste trabalho o referido autor relaciona VOLKERSEN¹ (1938) e GOLAND e REISSNER² (1944) como os trabalhos clássicos de origem da formulação teórica puramente elásticas para, respectivamente, os problemas de juntas laterais duplas e simples. Cita ainda DE BRUYNE³ (1944) como trabalho de origem da solução para o caso de juntas laterais duplas puramente elásticas.

¹ VOLKERSEN, O. Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschen-querschnitten. *Luftfahrtforschung* 15, 4-47, 1938.

² GOLAND, M.; REISSNER, E. The Stresses in Cemented Joints. *J. Appl. Mech.* 11, A17-A27, 1944.

³ DE BRUYNE, N. A. The Strength of Glued Joints. *Aircraft Engineering* 16, 115-118, 140, 1944.

1.2 Distribuição de Tensões Cisalhantes em Juntas Adesivas em Problemas Elásticos

Seja uma ligação adesiva submetida a esforços de tração, com três peças dispostas simetricamente em relação ao plano médio paralelo à lâmina adesiva, como representada esquematicamente na Figura 1.1. Considerando-se o comportamento para peças componentes e para o adesivo, elástico linear e uniforme ao longo da largura da ligação, o equilíbrio de força na direção x nos elementos aderentes, de comprimento genérico Δx e largura unitária, desprezando-se as influências das tensões normais à linha adesiva, fica definido como:

$$\text{Elemento 1: } \frac{dF_1}{dx} + \tau = 0; \quad (2.1a)$$

$$\text{Elemento 2: } \frac{dF_2}{dx} - 2\tau = 0 \quad (2.1b)$$

Onde os índices 1 e 2 representam, respectivamente, as peças laterais e a peça central.

As relações tensão deformação nos aderentes são definidas por:

$$\text{Elemento 1: } \varepsilon_1 = \frac{d\delta_1}{dx} = \frac{F_1}{E_1 t_1}; \quad (2.2a)$$

$$\text{Elemento 2: } \varepsilon_2 = \frac{d\delta_2}{dx} = \frac{F_2}{E_2 t_2} \quad (2.2b)$$

A deformação por cisalhamento na lâmina adesiva é aproximada pela relação:

$$\text{Elemento 3: } \gamma = \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{t_3} \quad (2.3)$$

Onde γ é a distorção angular ao longo da espessura t_3 , δ_1 e δ_2 são os alongamentos na interface adesiva, respectivamente, dos elementos 1 e 2.

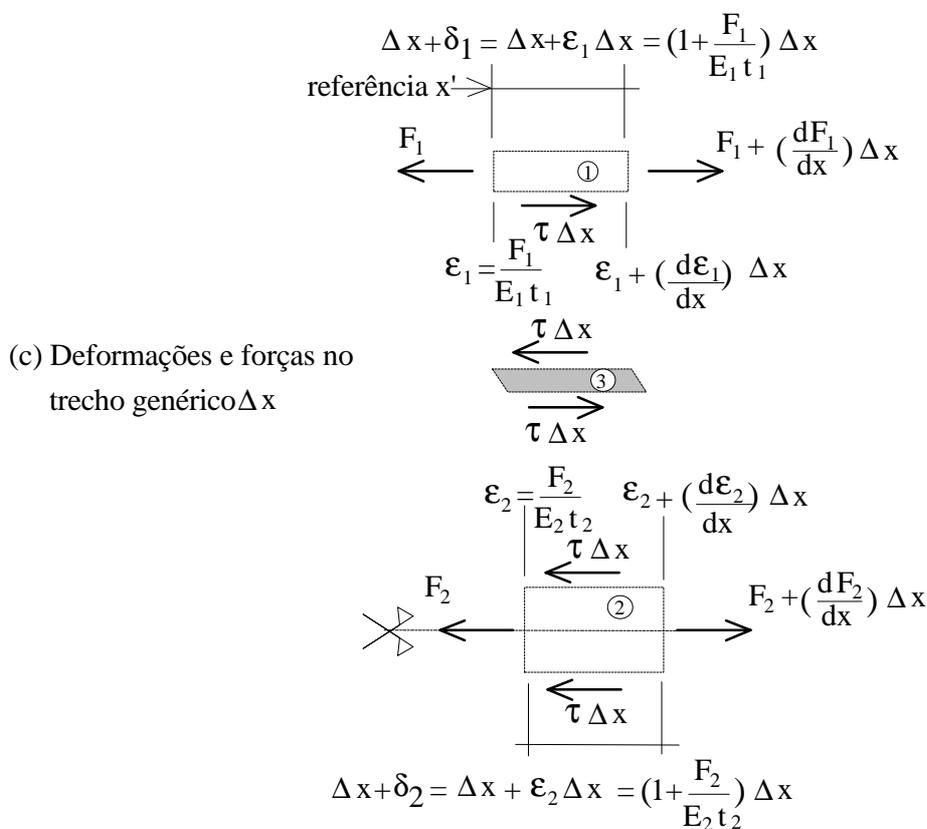
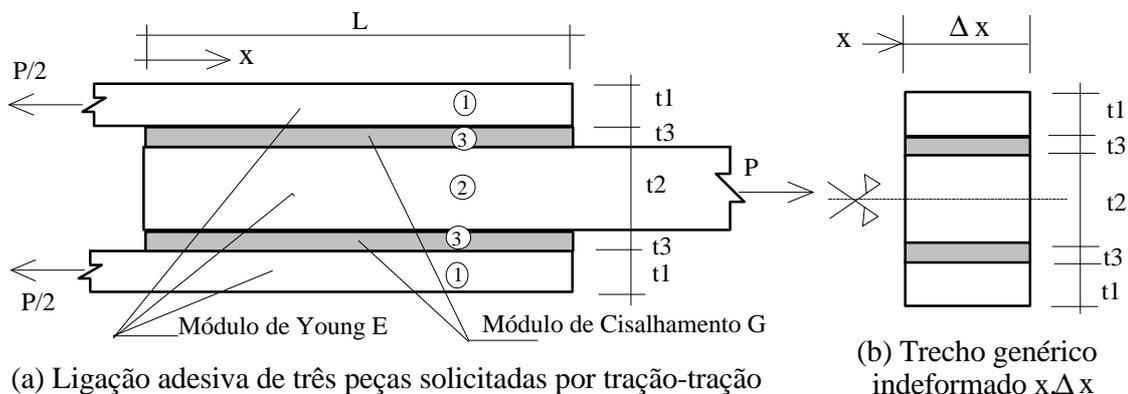


FIGURA 1 – a) Componentes de uma Ligação Adesiva Simétrica com Três Peças submetida à tração-tração; b) Trecho genérico indeformado de comprimento Δx ; c) Deformações e Forças Atuantes no Elemento genérico Δx .

Para comportamento elástico linear do adesivo sob tensões cisalhantes, resulta:

$$\text{Elemento 3: } \tau = G_3 \cdot \gamma = \frac{G_3}{t_3} (\delta_2 - \delta_1) \tag{2.4}$$

Onde G_3 é o módulo de deformação por cisalhamento do adesivo.

Segundo HART-SMITH (1973), a Eq. (2.4) utilizada por VOLKERSEN (1938) para juntas com peça central e duas peças laterais e por GOLAND e REISSNER (1944) em juntas com apenas duas peças implica a consideração de relações lineares tensão-deformação no adesivo sob o cisalhamento e também a uniformidade da distribuição das tensões cisalhantes ao longo da espessura da camada de adesivo. Esta última aproximação é importante apenas no problema puramente elástico, conduzindo a uma superavaliação dos picos de tensões cisalhantes nas extremidades da lâmina adesiva. Este mesmo autor afirma que os adesivos usualmente utilizados na prática apresentam alguma não-linearidade antes da fratura, o que provoca uma suavização dos picos de tensões nas extremidades das lâminas adesivas.

A substituição da Eq. (2.2) na avaliação da taxa de variação das distorções angulares na lâmina adesiva na direção x , definida na Eq. (2.3), fornece:

$$\frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{t_3} \frac{(d\delta_2 - d\delta_1)}{dx} = \frac{1}{t_3} \left(\frac{F_2}{E_2 t_2} - \frac{F_1}{E_1 t_1} \right) \quad (2.5)$$

O emprego das relações definidas na Eq. (2.1) na derivada da Eq. (2.5), elimina F_1 e F_2 , resultando a equação diferencial básica de governo do problema:

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} = \frac{1}{t_3} \left(\frac{dF_2/dx}{E_2 t_2} - \frac{dF_1/dx}{E_1 t_1} \right) \Rightarrow \frac{d^2\gamma}{dx^2} - \frac{\tau}{t_3} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Substituindo-se a Eq. (2.4) na Eq. (2.6), tem-se:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{G_3}{t_3} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) \tau = 0 \quad (2.7)$$

A Eq. (2.7) pode ser escrita em forma condensada, como:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \omega^2\tau = 0 \quad (2.8)$$

Onde:

$$\omega^2 = \frac{G_3}{t_3} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) \quad (2.9)$$

A solução geral da Eq.(2.7) é definida como:

$$\tau(x) = A \cosh(\omega x) + B \sinh(\omega x) \quad (2.10)$$

Onde A e B são constantes definidas em função das condições de contorno.

2

OBTENÇÃO DA FORÇA DE FRATURA EM LIGAÇÕES ADESIVAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO - COMPRESSÃO

GUSTAFSSON e SERRANO (1998) apresentam um trabalho sobre o comportamento de juntas coladas com base na Mecânica da Fratura, no âmbito da fratura frágil, obtendo uma equação de avaliação da resistência de ligações adesivas simétricas de três elementos, submetida à tração – compressão, que emprega certos parâmetros obtidos experimentalmente.

Os referidos autores apresentam o desenvolvimento teórico da obtenção da distribuição de tensões em superfícies coladas de ligações simétricas com três elementos, submetidos à tração-compressão, como representado na FIG. 2.1, com obtenção de expressões para avaliação da distribuição de tensões cisalhantes na ligação e da correspondente força resistente. Apresentam ainda uma avaliação comparativa das resistências obtidas com a formulação desenvolvida em função do comprimento da lâmina de adesivo, com os resultados teóricos obtidos com análise numérica por meio do MEF e com os valores obtidos experimentalmente por GLOS e HORSTMAN⁴ (1989). Por fim, apresentam uma avaliação comparativa das forças de ruptura de ligações, obtidas, teórica e experimentalmente, em função da orientação dos ângulos entre as peças componentes da ligação.

⁴ GLOS, P.; HORSTMAN, H. Strength of Glued Lap Timber Joints, East Berlin: 1989. *Proceedings CIB-W18A meeting 22*, paper 22-7-8, pp 1-17

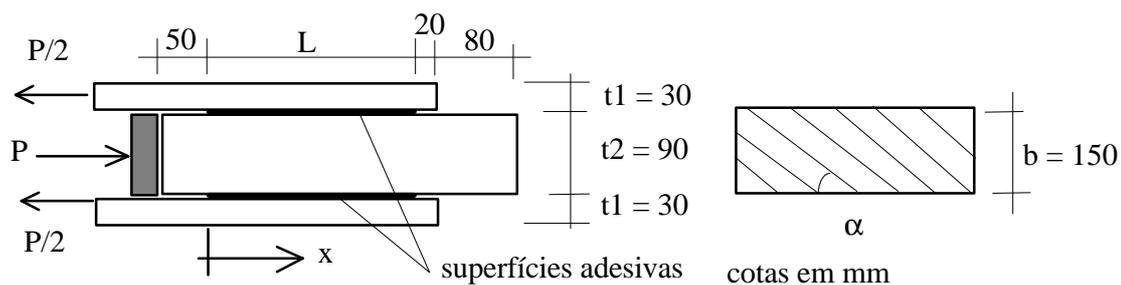


FIGURA 2.1 – Vista superior da ligação colada e orientação das fibras da peça central em relação às peças laterais solicitadas por tração paralela. Fonte: GUSTAFSSON e SERRANO (1998)

Na obtenção da equação de avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas, os autores, citando o trabalho de VOLKERSEN⁵ (1953), partem da Eq. (2.8), cuja solução geral é definida na Eq. (2.10). Na Eq. (2.9), consideram que a relação G_3/t_3 representa a resistência da junta adesiva ao deslocamento relativo das peças coladas, estando relacionada à energia de fratura da linha adesiva, na forma:

$$G_t = \int \tau(\delta) d\delta \quad (3.1)$$

Onde δ é o escorregamento por cisalhamento, que para comportamento linear vale:

$$\tau(\delta) = \frac{G_3}{t_3} \delta \quad (3.2)$$

Na ruptura $\tau = \tau_f$, resultando das Eq. (3.1) e (3.2) :

$$\frac{G_3}{t_3} = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \quad (3.3)$$

Substituindo-se a Eq. (3.3) na Eq. (2.9), tem-se:

⁵ VOLKERSEN, O. Die Schubkraftverteilung in Leim, Niet- und Bolzenverbindungen. *Energie und Technik*, 1953. pp 68-71, 103-108, 150-154

$$\omega = \left(\left(\frac{\tau_f^2}{2G_f} \right) \left[(E_1 t_1)^{-1} + (E_2 t_2/2)^{-1} \right] \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

As relações entre as constantes A e B empregadas pelos autores são obtidas a partir da consideração da compatibilidade das deformações na extremidade da lâmina adesiva e uma distribuição uniforme de tensões, na forma:

$$\tau' \Big|_{x=L} = 0 \quad (3.5)$$

$$\tau' \Big|_{x=0} = \left(\frac{G_3}{t_3} \right) \left[\frac{-N_1(0)}{2 \cdot t_1 \cdot b \cdot E_1} + \frac{N_2(0)}{t_2 \cdot b \cdot E_2} \right] \quad (3.6)$$

Na Eq. (3.6) N_i indica a força normal atuante na peça correspondente, isto é, $N_1(0) = -N_2(0) = P$, onde P é a força transmitida. Com a obtenção das constantes A e B, a solução geral definida na Eq. (2.10) pode ser escrita em forma condensada como:

$$\tau(x) = \left(\frac{P \cdot \omega}{2b} \right) \frac{\cosh(\omega(L-x))}{\sinh(\omega L)} \quad (3.7)$$

A tensão cisalhante máxima ocorre em $x = 0$, valendo:

$$\tau_{\text{máx}} = \tau(0) = \left(\frac{P \cdot \omega / 2b}{\tanh(\omega L)} \right) \quad (3.8)$$

Com $\tau_{\text{máx}} = \tau_f$, obtém-se a correspondente força de ruptura na fratura P_f :

$$\tau_f = \left(\frac{P_f \cdot \omega / 2b}{\tanh(\omega L)} \right) \Rightarrow P_f = \frac{2b \tau_f \tanh(\omega L)}{\omega} \quad (3.9)$$

A resistência normalizada é definida pela relação entre a tensão cisalhante média e a tensão cisalhante máxima na ruptura na forma:

$$\left(\frac{P_f / 2.bL}{\tau_f} \right) = \frac{\tanh(\omega L)}{\omega L} \quad (3.10)$$

A avaliação da resistência da ligação, com o emprego das Eq. (3.9) e (3.4), exige a definição da geometria e o conhecimento dos seguintes parâmetros: os módulos de elasticidade da madeira E_1 e E_2 , a resistência ao cisalhamento τ_f da linha adesiva e o valor da energia de deformação G_f . No caso de ligações alinhadas $E_1 = E_2 = E_L$. Para ligações ortogonais $E_1 = E_L$ e $E_2 = E_N$. Para a peça central inclinada em relação às peças laterais de um ângulo α , os autores propõem para a determinação do módulo de elasticidade da peça central, com base na utilização das transformação da matriz de flexibilidade da Teoria da Elasticidade de material ortotrópico, a equação:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{(c^4 - s^2 c^2 \nu_{LN})}{E_L} + \frac{(s^4 - s^2 c^2 \nu_{NL})}{E_N} + \frac{s^2 c^2}{G_{LN}} \quad (3.11)$$

Onde $c = \cos(\alpha)$ e $s = \sin(\alpha)$. E_L , E_N e G_{LN} são, respectivamente, os módulos de elasticidade nas direções paralela e normal às fibras e o módulo de deformação ao cisalhamento da madeira, e ν_{LN} e ν_{NL} são os correspondentes valores dos coeficientes de Poisson.

Os autores apresentam valores para a energia G_f e para a força resistente de ligações P_f , transcritos na TAB. 3.1, obtidos experimentalmente com $b = 150$ mm, $L = 400$ mm e para ligações com diferentes adesivos: mistura resorcinal-formaldeído, epóxi e PVAc. Os autores, apud WERNERSSON⁶ (1994), reportam $G_t = 1900$ J/m² e $G_t = 730$ J/m² como resultados obtidos em ensaios diretos de energia de deformação para, respectivamente, adesivo de PVAc e mistura adesiva resorcinol-formaldeído. Valor elevado da energia de fratura indica propriedades mais dúcteis para linha adesiva e maior resistência para a ligação.

⁶ WERNERSSON, H. Fracture Characterization of Wood Adhesive Joints, Lound University, Sweden: 1994. Report TVSM-1006, Div. of Structural Mechanics.

TABELA 3.1 – Valores de P_f e G_f . Fonte: GUSTAFSSON e SERRANO (1998)

Adesivo	R/F	Epóxi	PVAc
P_f (kN)	167	214	230
G_f (J/m ²)	800	1400	1600

Na comparação dos resultados para ligações com diferentes comprimentos L da lâmina de cola, obtidos pela formulação analítica apresentada, com emprego do MEF e experimentalmente, os autores obtiveram excelente concordância entre os dois primeiros e menor concordância destes com os obtidos por análise numérica. Os resultados numéricos foram obtidos com emprego do MEF e modelo de estado plano de tensões. Na modelagem da lâmina de adesivo foi empregado um modelo misto de fratura mecânica que considera a ocorrência gradual não linear de danos e uma fratura progressiva na linha adesiva com o crescimento da força externa aplicada.

Na análise da influência da inclinação das peças ligadas, com estimativa da rigidez do material com base na Eq. (3.11), os autores obtiveram boa concordância entre os resultados estimados analiticamente e os obtidos com o MEF e experimentalmente.