

SANDRA MARIA FERREIRA COURI PETRAUSKI

**DESENVOLVIMENTO DE PÓRTICOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA
DE EUCALIPTO, UTILIZANDO ADESIVOS À BASE DE RESORCINOL E
ÓLEO DE MAMONA**

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ciência
Florestal, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P493d
2012

Petrauski, Sandra Maria Ferreira Couri, 1963-
Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada
de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo
de mamona / Sandra Maria Ferreira Couri Petrauski.
– Viçosa, MG, 2012.
xviii, 119f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: José de Castro Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 114-119.

1. Eucalipto. 2. Estruturas de madeira (Construção civil).
3. Materiais laminados. 4. Adesivos. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa
de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt CDD 634.9833

SANDRA MARIA FERREIRA COURI PETRAUSKI

**DESENVOLVIMENTO DE PÓRTICOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA
DE EUCALIPTO, UTILIZANDO ADESIVOS À BASE DE RESORCINOL E
ÓLEO DE MAMONA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de dezembro de 2012.

Prof. Fernando da Costa Baêta

Prof. Alfredo Petruski

Prof^a. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Coorientador)

Prof. José de Castro Silva
(Orientador)

A Deus;

Ao meu marido, Alfredo;

Aos meus filhos, Mateus e Letícia.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso, na Área de Tecnologia da Madeira.

Ao meu orientador, Professor José de Castro Silva, pela oportunidade, confiança e ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Ricardo Marius Della Lucia, pelos conselhos e dedicação durante a realização do trabalho e por sua amizade, ao longo de mais de vinte anos de vida.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, por suas sugestões, pelo carinho e pela amizade, sempre sinceros.

Ao Professor Fernando da Costa Baêta, pela disposição e pelas sugestões.

Ao Professor José Ivo Ribeiro Júnior, pelas sugestões nas análises estatísticas.

Aos estagiários, Danilo e Thamara, pela amizade e valiosa ajuda.

Aos funcionários do Setor de Marcenaria da UFV, pela amizade e ajuda nos trabalhos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À empresa Aracruz Produtos de Madeira, pela doação da madeira para a realização da pesquisa.

À Hexion Química Indústria e Comércio Ltda., pela doação do adesivo Cascophen RS 216 M para a realização da pesquisa.

À Kehl Indústria e Comércio Ltda., pela doação do adesivo à base de óleo de mamona para a realização da pesquisa.

Aos meus colegas de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em especial aos do LPM e LPEM, pelo convívio e amizade.

Ao meu marido Alfredo, companheiro de uma vida, por tudo.

Aos meus filhos, Mateus e Letícia, força motriz da minha vida, pelo incentivo, pela compreensão e pelos momentos felizes.

BIOGRAFIA

Sandra Maria Ferreira Couri Petrauski, filha de Esmeraldino José Couri e Alice Ferreira Couri, nasceu em 1^o de dezembro de 1963, em Muriaé, Estado de Minas Gerais.

Concluiu o Colégio Universitário da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Em 1989, obteve o título de Engenheira Civil, pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Em 1995, ingressou no curso de mestrado em Ciência Florestal, com opção para Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo dissertação em fevereiro de 1999.

Em maio de 1999, aprovada em concurso público para ingresso na carreira de Magistério Superior, foi nomeada professora assistente da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, exercendo atividades de ensino, pesquisa e extensão, na área de Tecnologia de Materiais de Construção e Construção Civil, nos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Agrícola.

Em 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em nível de doutorado, na área de Tecnologia da Madeira, submetendo-se à defesa da tese em dezembro de 2012.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE QUADROS.....	xiii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Uso estrutural da madeira no Brasil e o sistema de pré-fabricação de estruturas em madeira.....	4
2.2. A madeira laminada colada.....	5
2.3. Adesivos de uso estrutural.....	6
2.3.1. Adesivo resorcinol formaldeído.....	7
2.3.2. Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	7
2.3.3. Formação da junta colada a partir de adesivos resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona.....	9
2.4. Desempenho de estruturas de madeira e ligações por adesivos.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Classificação das peças de madeira.....	19
3.1.1. Classificação visual e determinação da densidade.....	19
3.1.2. Classificação mecânica.....	20

3.2. Caracterização da madeira.....	21
3.3. Resistência de juntas coladas.....	23
3.4. Modelo de Hankinson como estimador da resistência de juntas coladas sob diferentes ângulos entre fibras.....	25
3.5. Resistência ao cisalhamento na torção sob diferentes ângulos de colagem entre as fibras da madeira.....	27
3.6. Configuração geométrica, projeto e verificação da estrutura.....	29
3.6.1. Configuração geométrica.....	29
3.6.2. Verificação da estrutura.....	31
3.6.2.1. Verificação da ligação colada.....	31
3.6.2.2. Verificação das barras.....	35
3.6.2.3. Verificação da articulação.....	35
3.7. Execução das estruturas.....	36
3.8. Ensaio das estruturas construídas.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1. Classificação das peças de madeira.....	47
4.1.1. Classificação visual e determinação da densidade.....	47
4.1.2. Classificação mecânica.....	48
4.2. Caracterização da madeira.....	49
4.3. Propriedades de adesão do <i>Eucalyptus sp.</i>	51
4.3.1. Juntas coladas utilizando adesivo resorcinol formaldeído.....	51
4.3.1.1. Resistência das juntas coladas com resorcinol formaldeído.....	51
4.3.1.2. Falha na madeira em juntas coladas com resorcinol formaldeído.....	55
4.3.1.3. Avaliação das melhores combinações para resorcinol.....	56
4.3.2. Juntas coladas utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	59
4.3.2.1. Resistência das juntas coladas com óleo de mamona.....	59
4.3.2.2. Falha na madeira em juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona.....	62
4.3.2.3. Avaliação das melhores combinações para adesivo à base de óleo de mamona.....	63
4.4. Validade do modelo de Hankinson para análise de juntas coladas.....	72
4.4.1. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído	72
4.4.2. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	74
4.5. Resistência ao cisalhamento na torção para diferentes ângulos de colagem entre fibras da madeira.....	77
4.5.1. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído	79
4.5.2. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	81
4.6. Verificação da estrutura.....	84
4.6.1. Estrutura a ser construída, utilizando adesivo resorcinol formaldeído.....	85
4.6.1.1. Verificação da ligação colada.....	86
4.6.1.2. Verificação das barras.....	92
4.6.1.3. Verificação da articulação no ponto C.....	94
4.6.2. Estrutura a ser construída utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	94

4.7. Desempenho das estruturas.....	96
4.7.1. Resistência apresentada pelas estruturas.....	96
4.7.2. Rigidez apresentada pelas estruturas.....	102
5. CONCLUSÕES.....	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

LISTA DE FIGURAS

	Página	
1	Esquema de confecção dos corpos de prova para condução dos ensaios: 1- cisalhamento paralelo às fibras, 2- compressão paralela às fibras e 3- tração normal às fibras.....	22
2	Colagem das peças para obtenção dos corpos de prova, onde α é o ângulo entre as fibras das peças coladas; dimensões em cm.....	26
3	Configuração geométrica da estrutura projetada.....	30
4	Configuração geométrica da estrutura executada, dimensões em cm....	30
5	Esquema dos esforços atuantes nos nós B e D.....	32
6	Esquema de análise da ligação colada.....	33
7	Gabarito confeccionado para construção das estruturas.....	37
8	Espalhamento do adesivo resorcinol formaldeído com pincel.....	39
9	Aperto dos parafusos com controle da aplicação de pressão.....	39
10	Estrutura sob pressão no gabarito.....	40
11	Retirada da estrutura construída, do gabarito, para armazenamento.....	40
12	Aspecto geral das estruturas construídas.....	41
13	Lixamento da superfície.....	41
14	Vista geral do aparato de teste instalado.....	45

15	Detalhe da rótula metálica da cumeeira e posicionamento do relógio...	46
16	Detalhe da aplicação da carga lateral e do posicionamento da célula de carga sob o pilarete.....	46
17	Formação das pilhas de madeira e balança utilizada para pesagem das tábuas.....	48
18	Superfície de resposta estimada obtida para a variável dependente: resistência, em função de diferentes níveis de pressão de colagem e densidade, obtida a partir da equação 5.....	52
19	Resistência estimada das juntas coladas por níveis de densidade, em função da pressão de colagem.....	54
20	Resistência estimada das juntas coladas por níveis de pressão de colagem, em função da densidade.....	54
21	Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$	64
22	Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$	64
23	Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$	65
24	Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,85 \text{ g/cm}^3$	65
25	Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,95 \text{ g/cm}^3$	66
26	Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$	67
27	Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$	68
28	Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$	68
29	Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,85 \text{ g/cm}^3$	69

30	Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,95 \text{ g/cm}^3$	69
31	Representação gráfica dos resultados experimentais e do modelo de Hankinson como estimador das resistências de juntas coladas sob diferentes ângulos.....	74
32	Representação gráfica do modelo de Hankinson e dos resultados experimentais de juntas coladas sob diferentes ângulos.....	76
33	Juntas coladas para obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados ao cisalhamento.....	78
34	Corpos de prova a serem ensaiados ao cisalhamento na compressão e na torção.....	78
35	Representação gráfica do modelo de regressão para estimar a resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com resorcinol formaldeído.....	80
36	Valores experimentais e estimados da resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com adesivo resorcinol formaldeído.....	81
37	Representação gráfica do modelo de regressão para estimar a resistência à torção de juntas coladas, com adesivo à base de óleo de mamona.....	83
38	Valores experimentais e estimados da resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com adesivo à base de óleo de mamona.....	84
39	Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura M1.....	98
40	Detalhe da fratura de compressão ocorrida no nó B da estrutura M1....	99
41	Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura M2.....	99
42	Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura R1.....	100
43	Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó D da estrutura R2.....	100
44	Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura R3.....	101
45	Detalhe da fratura de compressão ocorrida no nó B da estrutura R3....	101
46	Posição de instalação dos relógios comparadores na estrutura.....	102
47	Esquema de carregamento com ação de vento lateral na estrutura.....	103

48	Aspecto da deformada da estrutura, considerada a ação da carga de projeto, com a aplicação da carga de vento lateral.....	104
49	Diagrama força x deformação para os deslocamentos da cumeeira das estruturas, coladas com adesivo resorcinol formaldeído.....	106
50	Diagrama força x deformação para os deslocamentos da cumeeira das estruturas, coladas com adesivo derivado de óleo de mamona.....	106
51	Diagrama força x deformação para os deslocamentos médios dos trechos centrais dos banzos superiores das estruturas coladas com adesivo resorcinol formaldeído.....	107
52	Diagrama força x deformação para os deslocamentos médios dos trechos centrais dos banzos superiores das estruturas coladas com adesivo derivado de óleo de mamona.....	107
53	Aspecto da deformada da estrutura.....	108

LISTA DE QUADROS

		Página
1	Descrição das peças componentes do aparato de teste, parte 1.....	43
2	Descrição das peças componentes do aparato de teste, parte 2.....	44
3	Resultados da caracterização física e mecânica do <i>Eucalyptus sp.</i>	50
4	Resultados da caracterização mecânica do <i>Eucalyptus sp.</i> , corrigidos para o teor de umidade de 12%.....	50
5	Equações de regressão da resistência das juntas coladas por níveis de densidade e em função da pressão de colagem.....	53
6	Equações de regressão da resistência das juntas coladas por níveis de pressão de colagem e em função da densidade.....	53
7	Intervalos de previsão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, utilizando resorcinol.....	58
8	Equações de regressão da resistência das juntas coladas, por classe de densidade.....	61
9	Equações de regressão da resistência das juntas coladas para as classes de densidade, por níveis de pressão de colagem e em função da proporção entre os componentes isocianato e poliol.....	61
10	Equações de regressão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, por classe de densidade.....	63

11	Intervalos de previsão da resistência ao cisalhamento das juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	70
12	Intervalos de previsão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, utilizando óleo de mamona.....	71
13	Desempenho ao cisalhamento das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo resorcinol formaldeído.....	72
14	Desempenho ao cisalhamento das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo à base de óleo de mamona.	75
15	Desempenho à torção das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo resorcinol formaldeído.....	79
16	Desempenho à torção das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo à base de óleo de mamona.....	82
17	Resumo dos esforços calculados para a estrutura feita com adesivo resorcinol formaldeído.....	85
18	Desempenho das estruturas testadas, em termos de resistência.....	97
19	Deslocamentos finais após a aplicação da carga de projeto, incluindo vento lateral.....	104
20	Equações de regressão para os diagramas força x deslocamento.....	105

RESUMO

PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira Couri, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2012. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona.** Orientador: José de Castro Silva. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Ricardo Marius Della Lucia.

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento estrutural de pórticos confeccionados a partir de tábuas coladas de eucalipto, utilizando madeira de *Eucalyptus sp* e dois adesivos: poliuretano (à base de óleo de mamona) e resorcinol-formaldeído. Estudou-se o desempenho de madeira colada, relacionando a resistência e o percentual de falha na madeira, através de três pressões de colagem (0,9; 1,1 e 1,3 MPa); três quantidades de adesivo (200; 250 e 300 g/m²) e cinco classes de densidade aparente da madeira (0,55; 0,65; 0,75; 0,85 e 0,95 g/cm³). A proporção entre os componentes isocianato e poliálcool do adesivo à base de óleo de mamona, foi avaliada em três níveis 1:1; 1:1,25 e 1:1,5, em massa. Foram projetadas, construídas e submetidas a testes de carga cinco unidades, em escala real, de pórticos retos triarticulados, com vão livre de 5 metros e com inclinação de 44%, aptas ao emprego de cobertura cerâmica. Duas delas foram feitas com adesivo, à base de óleo de mamona, e outras três, com resorcinol formaldeído, todas testadas até a ruptura. Os resultados de desempenho das juntas coladas mostraram que várias combinações dos fatores estudados satisfizeram critérios normalizados, podendo ser empregadas na feitura de juntas estruturais. O modelo de Hankinson mostrou-se válido na predição da resistência de juntas coladas, sob diferentes ângulos entre as fibras. Observou-se, ainda, a existência da relação entre a resistência média ao cisalhamento na

torção e a resistência média ao cisalhamento na compressão das juntas coladas com ângulo entre as fibras da madeira. Os valores médios obtidos para as resistências últimas das estruturas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona foram, respectivamente, de 4,63 e 4,42 vezes a carga de projeto, segundo critérios estabelecidos pela norma NBR 7190/97. As estruturas apresentaram desempenho mecânico satisfatório e deformações inferiores às permitidas por norma. O adesivo à base de óleo de mamona demonstrou potencialidade para uso estrutural. Para ambos os adesivos, concluiu-se pela viabilidade técnica de se confeccionar pórticos inteiramente colados com lâminas de madeira de pequena espessura.

ABSTRACT

PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira Couri, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2012. **Development of timber frames made of glued-laminated eucalypt lumber, using either resorcinol-formaldehyde or an adhesive derived from castor oil.** Adviser: José de Castro Silva. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Ricardo Marius Della Lucia.

Here we describe the structural behavior of timber frames made by gluing boards of eucalypt lumber with two adhesives, resorcinol-formaldehyde or a polyurethane glue manufactured from castor oil. We first studied the strength and percentage of wood failure of small samples produced by gluing wood under three different pressures (0.9; 1.1 and 1.3 MPa), three spread rates (200; 250 and 300 g/m²) and five classes of specific gravity of the wood (central values 0.55; 0.65; 0.75; 0.85 e 0.95). The proportion of isocyanate and polyol in the castor oil adhesive was evaluated at three levels (1:1; 1:1.25 and 1:1.5, by mass). We designed and built five tri-articulated frames of real size and had them submitted to load till failure. They all had a 5-meter span with a 44% inclination and were designed to withstand a clay tiles roofing. Two of the frames were glued with the castor oil based adhesive, three with resorcinol. The results of the tests on small glued samples showed that several combinations of the factors could produce joints that would meet the building standards. The Hankinson model proved to be a good predictor of strength when joints were made at different angles between fibers. We also found that there exists a relationship between average shear strength in torsion and average shear strength in compression of joints made at an angle

between fibers. Mean values of the ultimate strength of the resorcinol or castor oil based glues were equal to, respectively, 4.63 and 4.42 times the design load stress, following the Brazilian standard NBR 7190/97. The structures all showed a satisfactory mechanical behavior, with deformations smaller than the allowed. The castor oil based adhesive performed well and is adequate for structural use. The two adhesives are technically acceptable for the manufacture of timber frames made of lumber of small thickness.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas ou partes de estruturas em madeira que demandam posterior transporte e montagem nas obras não são, ainda, uma realidade comum no mercado brasileiro tal como ocorre com as estruturas de aço e concreto armado. Nos países da Europa e América do Norte, por exemplo, as estruturas de madeira, aço e concreto são, há muito tempo, pré-fabricadas.

A técnica da madeira laminada colada possibilita o uso de espécies de reflorestamento, podendo, ainda, oferecer soluções a uma variedade considerável de tipos e portes de estruturas em madeira para diferentes finalidades. Num processo de industrialização, tais estruturas de madeira poderiam tornar-se alternativas ao mercado brasileiro.

Através de adesivo, as lâminas de madeira com pequenas dimensões permitem a fabricação de peças de variadas dimensões e formas para emprego estrutural; agregando a estas todas as vantagens de um processo industrial, destacam-se pelo controle de qualidade e racionalização do uso do material. Outras vantagens técnicas podem ser agregadas, como ganho de resistência, rigidez e durabilidade quando se empregam os recursos tecnológicos disponíveis.

Os produtos laminados e colados de madeira não são comuns no mercado brasileiro, pela pequena quantidade de indústrias, bem como pelo alto custo, tornando inacessíveis para as edificações consideradas econômicas ou de baixo custo. Os custos do adesivo tradicional equivalem a, aproximadamente, 30% do custo final da peça e,

contrariamente ao custo da madeira de reflorestamento, concorre para não popularizar seu emprego.

No mercado brasileiro, a recente introdução de novos e mais baratos adesivos pode diminuir os custos das estruturas de madeira e torná-las mais acessíveis a várias aplicações. Dentre os adesivos alternativos, destacam-se o adesivo poliuretano Purbond, desenvolvido na Europa, e o adesivo poliuretano bicomponente, à base de óleo de mamona, desenvolvido no Brasil. Paralelamente, o desenvolvimento tecnológico de outros adesivos já existentes pode ampliar o número de opções na escolha de um adesivo adequado ao uso estrutural.

No cálculo de estruturas coladas de madeira e no seu processo de dimensionamento, faz-se necessário que as juntas coladas apresentem comportamentos previsíveis e níveis elevados de resistência para atendimento às normas e exigências específicas de cada projeto. Deve-se conhecer sob quais condições o adesivo adotado poderá ter seu desempenho estrutural otimizado bem como as condições sob as quais não se pode realizar a colagem, sob pena de perda de resistência e/ou durabilidade.

Nesse contexto, a disponibilidade e o custo de outros adesivos, com potencial para uso estrutural, é uma perspectiva muito interessante para o uso mais intensivo de estruturas coladas. Nas condições de uso, o desempenho das ligações coladas de madeira está sujeito a influências de fatores diversos, tanto quantitativos quanto qualitativos.

Diante do exposto, este estudo é justificado pelos seguintes motivos:

- Dentre as madeiras de reflorestamento, que apresentam potencial como fonte de matéria-prima para a construção civil, destacam-se as do gênero *Eucalyptus*, o que tem motivado vários trabalhos de pesquisa, visando a uma melhor caracterização de suas propriedades.
- Uma das propriedades mais importantes dessas madeiras é a capacidade de adesão, principalmente quando se pretende construir elementos estruturais pré-fabricados.
- Como fator restritivo do uso da madeira laminada colada destaca-se o custo do adesivo envolvido no processo de produção, que representa, aproximadamente, 30% do custo total. Tal fato justifica o estudo de adesivos alternativos, avaliando-lhes o desempenho no uso com a madeira visando ao emprego estrutural.
- No caso da madeira laminada, a norma vigente estabelece que a colagem das lâminas seja feita no sentido paralelo das fibras. Não existe consenso entre os

pesquisadores sobre esta questão específica da norma e surgiu, então, a necessidade de estudo dos diferentes níveis de resistência em estruturas feitas com lâminas coladas, sob diferentes ângulos entre as fibras.

1.1.Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento e teste de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto usando dois diferentes adesivos.

Como objetivos específicos:

- avaliar o desempenho estrutural de juntas coladas com adesivo resorcinol formaldeído e adesivo à base de óleo de mamona, relacionando a resistência com fatores qualitativos e/ou quantitativos inerentes ao processo de colagem, como a gramatura e pressão de colagem;
- avaliar o modelo de Hankinson como estimador da resistência ao cisalhamento, a partir do esforço normal de juntas coladas sob diferentes ângulos, e verificar a existência da relação entre essa resistência e a resistência ao cisalhamento à torção dessas juntas;
- projetar, construir, submeter a testes de carga e avaliar o desempenho estrutural de pórticos retos em madeira laminada colada, aptos ao emprego em pequenas e médias edificações e que exijam colagem em ângulo, entre as lâminas de madeira.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Uso estrutural da madeira no Brasil e o sistema de pré-fabricação de estruturas em madeira

A madeira é o material de construção mais frequente nas estruturas de telhados de pequenas e médias edificações urbanas e rurais. Aproximadamente, 75% das construções no Brasil têm suas estruturas de cobertura executadas em madeira (BARALDI e CALIL JUNIOR, 1998). Dados publicados por Klitzke (2007) dão conta de que 42% da madeira utilizada na construção civil brasileira é destinada à execução de estruturas para telhados.

Para Damiano e Sales (2004), ainda é incipiente o emprego da madeira reflorestada para construção civil no país, além do preconceito sobre o uso dessas madeiras. Para os autores, também, há enorme desperdício de madeira, em função do uso incorreto na execução das estruturas.

Os sistemas construtivos de telhados, por exemplo, podem ser agrupados em duas vertentes: o sistema convencional e o pré-fabricado. No primeiro sistema, as estruturas principais e toda a trama secundária são executadas na obra, geralmente por mão de obra pouco qualificada, não havendo, também, controle de qualidade adequado sobre os materiais empregados. Segundo Damiano e Sales (2004), os telhados, assim concebidos, geram, normalmente, um consumo de 0,03 m³ de madeira por metro quadrado de obra coberta. Para os autores, quando aplicadas as melhores técnicas da

engenharia de estruturas, tal consumo não pode ultrapassar a $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de telhado, em obras residenciais.

O sistema pré-fabricado preconiza a execução das estruturas principais em uma fábrica, envolvendo o posterior transporte e montagem do telhado na futura obra. Este sistema permite maior controle de qualidade sobre os materiais empregados; a mão de obra, por sua vez, tende a ser mais especializada. Baraldi e Calil Junior (1998), citando Souza, atestaram que, em 1998, menos de 3% dos telhados eram executados com esta técnica.

Para Carvalho Filho (1984), o sistema pré-fabricado permite uma economia de até 40% da madeira utilizada quando comparado com o sistema convencional. Esta expectativa se confirma quando se utilizam estruturas principais mais leves e, conseqüentemente, com menores espaçamentos entre si, eliminando caibros e ripas quando se usam chapas de cobertura e se eliminam terças e caibros, no caso de coberturas com telhas cerâmicas e similares. A economia está relacionada ao uso de sistemas mais eficientes de ligação madeira-madeira, tais como as chapas de dentes estampados e similares.

A maior vantagem advinda da pré-fabricação está relacionada à agilidade do processo e ganho de tempo de execução dos telhados. Breuer (1983) atestou a produtividade de montagem destes telhados entre $2,5$ a $5 \text{ m}^2/\text{hora}/\text{homem}$, contra $0,67 \text{ m}^2/\text{hora}/\text{homem}$ do sistema convencional. Por uma série de razões, o sistema não foi aceito pelo mercado brasileiro e, segundo Vale e Ino (2008), o tema é pouco estudado e utilizado na construção civil do país.

2.2. A madeira laminada colada

Segundo Bez e Szücs (2000), a idéia de reconstituir seções de madeira, a partir da colagem de peças pequenas, remonta ao tempo dos egípcios. Moody, Hernandez e Liu (1987) atestam que a primeira construção em Madeira Laminada Colada (MLC) foi um auditório em Basel, na Suíça, em 1893. Na época, no entanto, o adesivo utilizado não era à prova d'água, limitando o uso do material para locais secos. Os primeiros pórticos ensaiados pelo Forest Products Laboratory, em Madison / Wisconsin, com base nesta técnica, datam de 1935 (RHUDE,1996).

Para Bez e Szücs (2000), a utilização efetiva de MLC na construção civil, a partir do início do século XX, foi conseqüência do surgimento de colas orgânicas de alta

resistência, à base de caseína. Durante este século, a técnica da MLC obteve grandes progressos, em dois momentos. O primeiro, em 1940, se deu por ocasião do surgimento dos primeiros adesivos sintéticos; posteriormente, na década de 1980, as mudanças políticas e econômicas vividas pelos países do Hemisfério Norte, assim como a unificação européia, provocaram uma grande abertura dos mercados econômicos. Tais mudanças fizeram com que se estabelecessem normas e padrões para a comercialização de diversos produtos, inclusive os empregados na construção civil. Segundo Moody, Hernandez e Liu (1987), em 1963, o American Institute of Timber Construction (AITC), formalizou os padrões para executar as estruturas em MLC.

Desde então, a técnica vem sendo muito utilizada nos países da Europa e América do Norte. O crescimento da indústria da MLC nos EUA ocorreu em paralelo ao desenvolvimento da industrialização das madeiras e dos adesivos, à melhoria dos processos de colagem, ao progresso dos sistemas de transportes, à elevação dos custos da mão de obra tradicional e à normalização da técnica, como produto industrial, trazendo, como vantagem, as formas estéticas oferecidas (BONO, 1996; VALLE, 1999).

A madeira laminada colada é utilizada para construção de estruturas com arcos, vigas retas ou curvas, pilares e outros elementos estruturais, que vencem pequenos e grandes vãos, com finalidades diversas do espaço projetado, como por exemplo, passarelas, pontes, centros politécnicos, quadras de patinação, igrejas, algumas estruturas com mais de 100 metros de vão livre (BONO & INO, 1998; MANTILLA CARRASCO & PAOLIELLO, 1998).

No Brasil, a madeira laminada colada ainda não está amplamente divulgada e grande parte das pesquisas sobre MLC depende de questões técnicas relacionadas a processos de dimensionamento e análise, com uso preferencial de madeiras de reflorestamento, disposições construtivas, ligações para emendas do tipo finger-joint, avaliação de possibilidades de reforço com materiais compósitos e adesivos. A grande maioria das pesquisas experimentais apresenta estudos utilizando vigas retas (BONO & INO, 1998; VALLE, 1999).

2.3. Adesivos de uso estrutural

Os adesivos e o fenômeno físico-químico de adesão desempenham um importante papel para os materiais à base de madeira. No caso do uso de adesivos para a

colagem de madeira com fins estruturais, o desempenho das peças e/ou estruturas fabricadas está intimamente ligado ao adesivo empregado. Assim sendo, faz-se necessário que o adesivo possua características que ofereçam uma união resistente, estável e durável, diretamente relacionadas com as propriedades da madeira.

Tradicionalmente, o adesivo resorcinólico é o mais utilizado para a confecção de elementos estruturais de madeira, entretanto, o mercado de adesivos vem apresentando uma série de inovações e tecnologias, buscando atender às exigências sociais de redução de impacto sobre o meio ambiente, sem perder a excelência na performance. A introdução no mercado brasileiro do adesivo poliuretano bicomponente, à base de óleo de mamona, encontra-se em fase de testes, o que concorre para um relativo desconhecimento de suas características e dos procedimentos tecnológicos envolvidos na sua utilização.

2.3.1. Adesivo resorcinol formaldeído

O adesivo mais usado na confecção de peças em MLC é o resorcinol formaldeído. Tal situação se deve, principalmente, às elevadas resistência e percentual de falha na madeira, à aplicação sob temperatura ambiente e a elevada estabilidade do adesivo, sob umidade e temperatura variadas (PIZZI, 1983).

Dos adesivos comercializados no país, o Cascophen RS-216-M é a resina sintética à base de resorcinol, especialmente recomendada para estruturas de madeira em ambientes internos e externos. Pertencente e comercializado pela empresa Hexion, o adesivo apresenta custo elevado. Em outubro de 2012, a embalagem de 1,2 kg apresentava o preço de R\$189,00.

Para Melo e Carrasco (2004), o resorcinol formaldeído é um adesivo caro que concorre para integrar o custo final da MLC em até 30%.

2.3.2. Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

O desenvolvimento dos poliuretanos, derivados de óleo de mamona, teve origem na década de 1940, sendo os primeiros trabalhos relatados por Hilditch e Congenecker, em 1946. O interesse na caracterização e utilização do óleo de mamona, como matéria-prima industrial, elevou-se com a crise do petróleo na década de 1970 (PLEPIS, 1992).

Segundo Araújo (1992), a tendência mundial pela procura de materiais não poluentes, derivados de biomassa e biodegradáveis, alavancou as pesquisas com poliuretanos derivados de óleo de mamona, ampliando as perspectivas para o seu desenvolvimento.

A mamona (*Ricinus communis*) é uma planta da família das Euforbiáceas, encontrada em regiões tropicais e subtropicais, sendo muito cultivada no Brasil. A partir da semente de mamona é extraído o óleo, também conhecido como óleo de rícino e, internacionalmente, como “castor oil” (VILAR, 2002).

A partir deste recurso natural e renovável, é possível sintetizar polióis e pré-polímeros, com diferentes características, permitindo grande versatilidade de aplicações como, por exemplo, fluidos de freios de aviação, cosméticos, tintas, adesivos, entre outras.

As propriedades dos polímeros derivados do óleo de mamona são definidas pelo seu peso molecular, grau de entrecruzamentos, forças intermoleculares, rigidez dos segmentos que compõem a cadeia e pela sua cristalinidade (ARAÚJO, 1992).

Os adesivos poliuretanos bicomponentes possuem cura rápida, sob temperatura ambiente, e são mais baratos que os monocomponentes; no entanto, apresentam cura incompleta se os dois componentes não forem misturados adequadamente. Os métodos de aplicação incluem “spray” e cobertura com rolo ou pincel (VILAR, 2002; FRIHART, 2005).

Claro Neto (1997) caracterizou as propriedades físico-químicas de um poliuretano, derivado de óleo de mamona, desenvolvido para ser utilizado como material para implantes ósseos. O poliuretano, bicomponente, foi sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato (MDI), pré-polimerizado com um polioliol, também derivado de óleo de mamona. O autor verificou que a decomposição térmica desse polímero iniciou-se em temperaturas acima de 150°C, o que evidencia a estabilidade térmica da resina até esta temperatura.

As resinas poliuretanas apresentam alta resistência à umidade e não emanam formaldeído (PETERSON, 1964; AZEVEDO, 2009).

A rota de preparação da resina poliuretana bicomponente, à base de óleo de mamona, inicia-se com a obtenção de um polímero, onde a polimerização está incompleta, que pode ser denominado de pré-polímero. Este pré-polímero é, geralmente, obtido a partir da reação do difenilmetano diisocianato (MDI) com o polioliol, mantendo uma porcentagem de isocianato sem reagir, para posterior reação. Catalisadores,

juntamente com quaisquer outros aditivos necessários para as propriedades desejadas são, geralmente, incorporados na parte que contém o polioliol, também denominado lado resina. Antes da aplicação no substrato, o pré-polímero é misturado ao polioliol, resultando numa resina poliuretana (ARAÚJO, 1992; MARRA, 1992; DIAS, 2005).

As propriedades do polímero como a flexibilidade, rigidez, interpenetração de segmentos, força inter-cadeia e entrecruzamento molecular são explicadas a partir do balanceamento e das características químicas do polioliol empregado na reação final com o pré-polímero (ARAÚJO, 1992; DIAS, 2005).

Como regra, um excesso de isocianato leva à obtenção de filmes mais duros, enquanto um excesso de polioliol resulta em adesivos de maior elasticidade. Os adesivos com maior teor de ligações cruzadas exibem ligações mais fortes, maior resistência à tensão e ao rasgo, porém, menor elasticidade. Em geral, a resistência às altas temperaturas, água, solventes, plastificantes, óleos e gorduras, aumenta com o teor de ligações cruzadas (VILAR, 2002).

2.3.3. Formação da junta colada a partir de adesivos resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona

Os mecanismos de adesão têm sido estudados há anos e muitas teorias são propostas para o fenômeno da adesão; nenhuma delas, no entanto, é capaz de justificar todos os aspectos de aderência e, provavelmente, a combinação entre elas é a que mais se aproxima da realidade (PIZZI e MITTAL, 1994).

Com relação à utilização de adesivos resorcinólicos e poliuretanos para a colagem de madeira, alguns autores ressaltam que o fenômeno da adesão poderia ser explicado por duas teorias muito importantes: a teoria mecânica e a teoria da adsorção (MARRA, 1992; CONNER, 2001; FRIHART, 2005).

Segundo a teoria mecânica ou enganchamento mecânico, a penetração do adesivo em um substrato poroso leva à formação de ganchos ou entrelaçamento mecânico do adesivo, que se prende nas camadas superficiais da madeira, após a cura e endurecimento do adesivo. De acordo com essa teoria, a rugosidade da superfície pode propiciar ganchos mecânicos para a ancoragem do adesivo. Esse fator contribuiria para o aumento da adesão, desde que a superfície apresente coesão suficiente para suportar esforços (PIZZI e MITTAL, 1994; SCHULTZ e NARDIN, 1994).

A teoria da adsorção estabelece que a adesão é resultante do contato molecular entre dois materiais que desenvolvem forças de atração superficialmente. Para que ocorra um contato íntimo e contínuo entre um adesivo e um substrato, é necessário que o adesivo umidifique a madeira, fenômeno que envolve a migração do adesivo para dentro da estrutura submicroscópica da parede celular, expulsando o ar, água e outros componentes estranhos à superfície de contato da madeira. O umedecimento depende de vários fatores, tais como mobilidade do adesivo, pressão no adesivo e tempo disponível até que o endurecimento do adesivo o imobilize (GALEMBECK e GANDUR, 2001).

De acordo com Gent e Hamed (1990), para que duas substâncias possam desenvolver uma interação direta, as moléculas de uma devem aproximar-se poucos angstroms da outra, ou seja, considerado o relacionamento sólido/líquido, o líquido deve ser adsorvido pelo sólido. A adsorção compreende um fenômeno de superfície que consiste na fixação de moléculas ou átomos de uma substância na superfície da outra; distingue-se da absorção, pois nessa última há penetração, não restringindo o fenômeno à superfície da substância penetrada. Não é raro, porém, que ocorra adsorção e absorção, simultaneamente.

Segundo Pizzi (1994), a teoria química da adesão deve ser entendida como uma subdivisão da teoria da adsorção. Baseia-se na hipótese de que as ligações químicas formadas entre adesivo e substrato seriam consideradas como os principais mecanismos de adesão. As ligações são ditas primárias, em comparação às interações físicas, consideradas forças secundárias. A resistência ou energia de adesão das ligações primárias (ligações covalentes, iônicas e metálicas) apresenta maior magnitude do que aquelas provenientes de forças secundárias.

Em resumo, na formação da junta colada, considerando o emprego de adesivos resorcinólicos e poliuretânicos, diversos mecanismos de adesão poderiam ocorrer, simultaneamente. Parece ser consenso entre pesquisadores, que entre os adesivos considerados, o adesivo iria aderir-se à madeira por um processo físico. Nesse caso, a penetração do adesivo nas cavidades, poros e asperezas da superfície da madeira levaria à formação de ganchos ou entrelaçamento mecânico do adesivo, que se prenderia nas camadas superficiais do substrato após a cura e endurecimento do adesivo. Contudo, esse não seria o único nem o mais importante mecanismo de adesão. Para os dois adesivos analisados, a adsorção é considerada como o mais relevante mecanismo que operaria na adesão da madeira. Nesse caso, a adesão seria resultante do contato molecular entre o adesivo e a madeira, que desenvolveria forças de atração superficiais,

especialmente forças de *Van der Waals*. Com relação à utilização dos adesivos poliuretanos, alguns pesquisadores consideram o isocianato como sendo o mais provável de todos os adesivos para madeira a formar ligações covalentes com esse substrato, enquanto outros afirmam que tal contribuição à adesão nunca foi demonstrada (TROUGHTON, 1968; ALLAN e NEOGI, 1971; MARRA, 1992; PIZZI, 1994; CONNER, 2001; FRIHART, 2005).

A adesão entre componentes de madeira depende de uma série de parâmetros relacionados às características físico-químicas do adesivo e do material a ser colado, do procedimento adotado na colagem, da forma geométrica, do tamanho das peças a serem coladas, bem como das condições a que as peças coladas estarão expostas, quando em serviço (MARRA, 1992; VICK, 1999).

Com relação aos parâmetros do processo, Habenicht (2002), citado por Follrich et al. (2007), menciona que o espalhamento do adesivo, a pressão aplicada e propriedades de superfície, influenciadas pelos processos de usinagem, incluindo limpeza de superfície, danos estruturais, rugosidade da superfície etc., desempenham um papel importante na formação e qualidade da linha de ligação.

A penetração do adesivo é importante, tanto na formação quanto na qualidade da linha de ligação. A profundidade de penetração do adesivo no interior do aderente é fortemente influenciada pelos fatores relacionados com a madeira, como a espécie, permeabilidade, rugosidade da superfície, bem como, fatores associados ao adesivo, tais como, o tipo do adesivo ou viscosidade, além de fatores de processo, como temperatura ou pressão aplicada. A penetração exerce, ainda, uma grande influência sobre o desempenho da ligação (FOLLRICH et al., 2007; KAMKE e LEE, 2007).

Os adesivos resorcinol formaldeído e poliuretanos bicomponentes, à base de óleo de mamona, como a maioria dos adesivos utilizados para colagem de madeira, pertencem ao grupo polimerizado *in situ*. Uma parte desses adesivos é de peso molecular baixo, podendo penetrar nas macro e microestruturas anatômicas da madeira antes da cura, tornando-se polímeros relativamente rígidos e altamente entrecruzados, após a cura. Tal fato poderia reforçar o material, levando à ocorrência ruptura numa região mais interna que a interface madeira-adesivo, além de diminuir a variação dimensional da madeira, frente às variações de umidade (JESUS, 2000; NIEMZ et al., 2004; FRIHART, 2005; KONNERTH e GINDL, 2006; FRIHART, 2009).

Couri Petruski (1999) estudou o comportamento de adesão de juntas coladas de *Eucalyptus citriodora*, utilizando adesivo resorcinol formaldeído. O experimento

constou de um fatorial, com quatro níveis de quantidade de adesivo (150; 200; 250 e 300 g/m²), quatro níveis de pressão de colagem (0,7; 1,1; 1,5 e 1,9 MPa) e duas formas de aplicação do adesivo (face simples ou dupla), com dez repetições por tratamento. Os resultados obtidos indicaram que a resistência da linha de adesivo ao cisalhamento e a percentagem de falha na madeira das juntas coladas de *E. citriodora* foram afetadas por todas as variáveis em estudo. Houve, ainda, um efeito significativo para as seguintes interações: quantidade de adesivo x pressão e quantidade de adesivo x face. De acordo com os critérios estabelecidos pela norma brasileira, foram aceitos todos os tratamentos com quantidade de adesivo de 300 g/m², bem como os tratamentos com quantidade de adesivo de 250 g/m², exceto aqueles com pressão de colagem de 1,1 MPa e aplicação de adesivo em apenas uma face, além dos tratamentos com quantidade de adesivo de 200 g/m², que receberam adesivo em apenas uma face, com níveis de pressão de 0,7 e 1,5 MPa. As estimativas da quantidade de adesivo para obtenção dos valores de resistências máximas encontraram-se dentro do domínio estudado, variando entre 270 e 300 g/m², sendo decrescentes com o aumento da pressão de colagem. As estimativas das resistências máximas indicaram valores superiores aos obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira sólida.

Petrauski (2000) conduziu experimento objetivando avaliar o desempenho de juntas coladas, através da pressão de colagem, quantidade aplicada de adesivo e aplicação de adesivo em uma ou ambas as faces. O experimento foi conduzido com quatro níveis de pressão de colagem (0,3; 0,7; 1,1 e 1,5 MPa) e com quatro níveis de quantidade de adesivo (150, 200, 250 e 300 g/m²), num arranjo fatorial 4x4x2, com vinte repetições por tratamento. Utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis* e o adesivo escolhido foi o Cascophen RS 216 M. Várias combinações apresentaram desempenho satisfatório, comparativamente à madeira sólida. O percentual de falha na madeira foi influenciado por todas as variáveis em estudo, acusando interação tripla significativa. A resistência das juntas coladas, julgada por cisalhamento na compressão, recebeu influência significativa de todas variáveis em estudo, ocorrendo, também, interação significativa entre pressão de colagem e quantidade de adesivo. A estimativa obtida para a máxima resistência das juntas foi da ordem de 15 MPa, associada a uma quantidade de adesivo de 263 g/m² e a uma pressão de colagem de 1,14 MPa.

Favaro (2004) pesquisou o adesivo de poliuretano, derivado do óleo de mamona, para utilização em metais. Os resultados obtidos mostraram que o adesivo preparado na

proporção de 1:1,4 de pré-polímero e polioliol foi o que apresentou melhor desempenho na colagem.

Desai et al. (2003) avaliaram o efeito do conteúdo de isocianato (NCO) sobre o desempenho do adesivo com relação à resistência ao cisalhamento. Os resultados indicaram um aumento da resistência do adesivo obtido com a razão molar NCO/OH até 1,3; mas uma diminuição depois disso. Os modos de falha observados levaram a especulações sobre a causa das diferenças no desempenho do adesivo, como consequência do grau de reticulação ou ligações cruzadas entre as cadeias. Para taxas menores que 1,3, a falha foi principalmente coesiva, ocorrendo dentro do material adesivo em si, provavelmente devido à estrutura menos reticulada. Quando a razão molar NCO/OH foi superior a 1,3, observaram-se falhas coesivas e adesivas; o adesivo passou a apresentar comportamento frágil, devido ao alto grau de reticulação ou ligações cruzadas entre as cadeias, pelo excesso de grupamentos NCO, assim como a presença de “microbolhas”, que agiam como pontos de concentração de tensão, dando início à falha, com propagação até o rompimento do material. Os valores de deformação decresceram com o aumento da fragilidade dos compostos.

Jesus (2000), utilizando o adesivo à base de óleo de mamona, bicomponente, de cura a frio, composto pelo polioliol B1640 e pelo pré-polímero A249, na proporção em massa de 1:1, observou que, em função do aumento da viscosidade, o tempo de utilização da mistura foi, de aproximadamente, vinte minutos. Esse tempo de trabalhabilidade reduzido dificulta a aplicação do adesivo em estruturas de madeira laminada colada.

O tempo necessário para a reação de cura, de modo a se obter a máxima resistência da ligação adesiva, é função da composição química do adesivo. No caso do adesivo resorcinol formaldeído, estima-se um período de oito a dez dias, após a retirada da peça da prensa. Para os adesivos poliuretanos, o tempo de cura é diretamente proporcional ao número de grupamentos NCO (SKEIST, 1977; PIZZI, 1983; WU e PAUL, 2005; SILVA, 2006).

Jesus (2000), avaliando o tempo de cura do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, bicomponente, empregado para colagem de *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, observou uma tendência de aumento dos valores das resistências ao cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras, com o aumento do tempo de cura. Entretanto, verificou que as resistências desenvolvidas para o tempo de quatro dias de cura foram adequadas para o emprego em estruturas de MLC.

Wu e Paul (2005) avaliaram o grau de cura na linha adesiva de juntas coladas testadas ao cisalhamento. As juntas foram confeccionadas com adesivos poliuretanos, com níveis distintos de NCO livre e diferentes substratos de madeira. Os resultados indicaram que o grau de cura foi diretamente dependente do percentual de NCO presente na fórmula. Para cada fórmula testada, o grau de cura foi independente do tipo de substrato de madeira. Os resultados experimentais também indicaram que o alto nível percentual de NCO na fórmula não é determinante para um bom desempenho ao cisalhamento. Entretanto, para fórmulas com alto percentual de NCO, os autores sugerem que permitir um maior tempo de cura poderá conduzir a um aumento da resistência ao cisalhamento.

2.4. Desempenho de estruturas de madeira e ligações por adesivos

A resistência, estabilidade e a vida útil de uma estrutura dependem, em grande parte, da resistência, rigidez e durabilidade das ligações. Estas são causa comum de ruptura de diversas estruturas ensaiadas e merecem atenção especial no dimensionamento.

Wilkinson (1984) estudou a performance de tesouras Fink com 8,5 m de vão e 33,33% de inclinação do banzo superior ao longo do tempo. Utilizou sete soluções diferentes para os sistemas de ligações, tendo construído quatro treliças para cada tipo de solução adotada. Uma tesoura de cada tipo foi testada até a ruptura, para efeito de controle, outras três tesouras de cada grupo recebiam a carga de projeto e ficavam em galpão aberto; ao final de cada cinco anos, uma delas deveria ser testada até a ruptura. Durante o tempo de observação, eram anotados os deslocamentos verticais em vários pontos das estruturas. Segundo o autor, a deformação das estruturas parece estar relacionada à rigidez imposta por cada tipo de junta. Concluiu haver uma relação entre a deformação apresentada ao final de quinze anos e a deformação inicial das treliças. A deformação final foi da ordem de 3 vezes a deformação inicial, para treliças confeccionadas com compensado pregado; de 2,5 vezes, para treliças cujas juntas eram metálicas (chapa-prego, chapas de dentes estampados e chapas de farpas estampadas); e, menos de 2 vezes, naquelas feitas com compensado colado e pregado. Os valores das deflexões, passados quinze anos, foram aceitáveis para todos os tipos de tesouras, levando-se em conta o critério do vão da tesoura dividido por 360, exceto para as estruturas feitas com compensado pregado, que apresentaram deslocamentos maiores.

Os dados apresentados pelo autor permitiram calcular os quocientes das cargas de ruptura pela carga de projeto das tesouras. Os valores médios variaram de 3,4 , para tesouras confeccionadas com compensado pregado, até 4,9 , para aquelas feitas com compensado colado e pregado. As tesouras feitas com chapas e pregos apresentaram quociente médio igual a 4,5.

Carvalho Filho (1984), estudando o desenvolvimento de estruturas pré-montadas no Brasil, construiu e testou trinta e três treliças Fink, com seis metros de vão e 33,33% de inclinação no banzo superior. As tesouras foram projetadas para um espaçamento, no telhado, de 0,5 m e uma carga de 3000 N, uniformemente distribuída no banzo superior. Utilizaram-se madeiras de eucalipto e de *Pinus* e diversas soluções para as ligações. Das trinta e três treliças confeccionadas, vinte e três tiveram conectores metálicos e as restantes tiveram chapas de compensado estrutural nas ligações. Nessas últimas, as ligações recebiam grampos metálicos ou pregos, lisos comuns ou especiais, aplicados por pistola de ar comprimido (air-fix). Com base nos diagramas carga-deformação, obtidos dos ensaios das tesouras, o autor concluiu que, nas treliças feitas com chapas metálicas, é razoável desprezar as deformações das ligações, quando se calcula a deformação da estrutura. As deformações dessas tesouras foram admissíveis dentro da faixa de carga de projeto, mesmo prevendo-se uma deformação final, para carga de longa duração, da ordem de três vezes a deformação inicial. As treliças que mais deformaram foram confeccionadas com madeira de eucalipto, chapas de compensado e pregos “air-fix”. Nessas treliças, a madeira foi seca ao ar e apresentava umidade, variando de 20 a 30%.

Das rupturas ocorridas entre as tesouras de conectores metálicos, nove aconteceram nas ligações de extremidade, devido ao cisalhamento das chapas; treze foram devidas ao destacamento das chapas, em relação à madeira, nas ligações do banzo inferior, e uma ocorreu por falha na madeira. Do grupo de tesouras feitas com chapas de compensado, sete não romperam, tendo uma delas apresentado flambagem do banzo superior. As outras três se romperam na ligação de extremidade (CARVALHO FILHO, 1984).

Baracho Júnior (1990) observou desempenho estrutural satisfatório em ensaios com tesouras fink, de seis metros de vão, construídas com *Eucalyptus saligna*. As tesouras foram construídas com banzos duplos, tendo uma única chapa-prego, como elemento de ligação nos pontos de união. Obteve-se um quociente médio entre carga de ruptura e carga de projeto da ordem de 7,2.

Petrauski (1991), estudando o desenvolvimento de estruturas pré-fabricadas, construiu e testou nove treliças Fink, confeccionadas com madeira da pindaíba (*Xylopia sericea*) e com ligações de chapas e pregos de fuste torcido. As tesouras foram construídas com 6 m de vão, 33,33% de inclinação no banzo superior e projetadas para um espaçamento no telhado de 1,0 m. As rupturas, observadas em cinco tesouras, ocorreram nas peças do banzo superior mais solicitadas por compressão. Obteve-se um quociente médio da carga máxima aplicada nas tesouras pela sua carga de projeto igual a 5,4. Os deslocamentos do ponto central do banzo inferior apresentaram valores inferiores ao limitado pela norma.

Couri Petrauski (1999), ao dimensionar ligações coladas sujeitas ao cisalhamento por compressão, tração, torção, cortante, ou para combinações destes esforços, construiu e testou pórticos treliçados em madeira laminada colada de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*, previstos para uso em estruturas de cobertura com telha cerâmica, com sete metros de vão livre e beirais de 0,5 metros em cada extremidade, obtendo quociente médio entre as cargas de ruptura e carga de projeto da ordem de 7,3. Observou, ainda, um comportamento linear dos diagramas cargas x deslocamentos, sendo os deslocamentos observados plenamente satisfatórios. A autora atestou a viabilidade de se aplicar a metodologia para dimensionamento de ligações coladas.

Jesus (2000) estudou o comportamento desse adesivo poliuretano, à base de mamona, para emprego em madeira laminada colada (MLC). A eficiência do adesivo foi avaliada por meio da resistência dos seguintes ensaios mecânicos: cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras. O adesivo estudado foi do tipo bicomponente, de cura a frio, composto pelo polioliol B1640 e pelo pré-polímero A249, na proporção em peso de 1:1, com a quantidade de adesivo de 350 g/m². Foram empregadas duas espécies de madeira, *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, com variação dos níveis de pressão de colagem, tempo de cura, tempo de prensagem e viscosidade. Esta última propriedade fora tratada como o tempo decorrido entre a preparação do adesivo e sua aplicação nas juntas, adotando-se níveis de 0, 3 e 6 minutos. Para ambas as espécies, todos os ensaios apresentaram valores médios das resistências dos corpos de prova colados superiores aos valores médios dos corpos de prova maciços, utilizados como controle. Os resultados mostraram que o adesivo é uma alternativa para a utilização tecnológica da madeira laminada colada em estruturas com espécies de reflorestamento. Foram feitas, ainda, recomendações de emprego, enquanto variáveis estudadas, para uso

em finger-joint e vigas. Para vigas de *Eucalyptus grandis*, por exemplo, recomendou-se viscosidade a 0 minutos de preparo, pressão de colagem de 0,6 MPa, 4 horas de prensagem e 4 dias de cura.

Petrauski (2000) construiu tesouras de telhados, feitas de laminado colado, com madeira de *Eucalyptus grandis*, de modo que cada ligação fosse feita, exclusivamente, com uso de adesivo e as submeteu a testes de carga. Propôs modelo de análise e dimensionamento de tais ligações, considerando-se válido o modelo de Hankinson, em função da necessidade de se colar lâminas a diferentes ângulos entre as fibras das peças. Os resultados foram satisfatórios enquanto protótipos ensaiados, considerados os desempenhos quanto à resistência e rigidez. Suas resistências últimas foram, em média, 4,26 vezes a carga de projeto, segundo critérios da NBR 7190/97. As rupturas não puderam ser assumidas como frágeis e nem atribuídas à perda de desempenho das ligações. Os deslocamentos apresentados para o nível de carga de projeto foram da ordem de 1/5 daqueles admissíveis pela NBR 7190/97, o que dá uma excelente margem de segurança para o incremento de deslocamento para cargas de longa duração; ainda, o comportamento no diagrama carga x deslocamento foi linear, mesmo para os mais altos níveis de carga. A técnica proposta, ou seja, a confecção de estruturas inteiramente coladas para coberturas, a partir de lâminas de pequena espessura, mostrou-se viável e com desempenho muito satisfatório.

Dias e Beraldo (2008) atestaram o ótimo desempenho estrutural do adesivo, à base de óleo de mamona, no teste de quatorze vigas de MLC, feitas de *Pinus sp.*, com vão de 3,8 m. O comportamento fora julgado por critérios de resistência e rigidez, sendo comparado, ainda, os resultados de resistência ao cisalhamento de juntas coladas com o apresentado pela madeira sólida. Não se encontraram, no entanto, evidências claras sobre a proporção utilizada na mistura dos componentes do adesivo e gramatura utilizada.

Dias et al. (2006) conduziram estudo relativo à avaliação da eficiência de adesivos utilizados em emendas dentadas longitudinais, por meio de ensaios de tração, em peças com dimensão estrutural, confeccionadas com *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos apresentaram os valores médios de 54,07 MPa, para o adesivo à base de mamona; 59,77 MPa, para o Wonderbond; 64,12 MPa, para o Purbond e 56,39 MPa, para o Cascophen. Concluiu-se pela viabilidade de utilização dos três adesivos testados, tendo, como base de comparação, o adesivo resorcinol-formaldeído.

Beraldo e Dias (2008) avaliaram o desempenho do adesivo de mamona, sob três proporções de mistura polioli/isocianato em relação ao Cascophen, na feitura de juntas finger-joint e sob três condições de teste: secas ao ar, saturadas e fervura. O desempenho do adesivo de mamona fora inferior ao do Cascophen e os pesquisadores não recomendaram o uso do adesivo de mamona, com razão de mistura polioli/isocianato superior a 1,5:1.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Toda a parte experimental da pesquisa foi conduzida no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais. A madeira utilizada foi o *Eucalyptus sp.*, de idade e procedência desconhecidos, comercialmente denominada Lyptus, cedida pela Aracruz Produtos de Madeira. A madeira foi fornecida seca em estufa, à umidade média de 8%, sob a forma de tábuas, com comprimentos e larguras variáveis e espessura de 3,2 cm. As tábuas se encontravam hermeticamente fechadas, em forma de pacotes, embaladas com plástico. Os pacotes, mantidos lacrados, foram armazenados, em local seco e coberto, até o início da fase experimental.

Utilizaram-se dois tipos de adesivos: à base de resorcinol formaldeído, comercialmente denominado Cascophen RS 216 M, da empresa Hexion Química Indústria e Comércio Ltda, e adesivo à base de óleo de mamona, da empresa Kehl Indústria e Comércio Ltda.

3.1. Classificação das peças de madeira

3.1.1. Classificação visual e determinação da densidade

Cada peça de madeira foi identificada e submetida à inspeção visual e determinação da densidade aparente. A inspeção visual teve por objetivo identificar e quantificar os defeitos, de modo a se estabelecer, para cada tábua, o comprimento e

largura que efetivamente poderiam ser utilizados. Cada peça foi registrada, anotando-se o tamanho e frequência de defeitos, como nós, rachaduras, esmoados e empenamentos.

A densidade é uma característica física que afeta a resistência da madeira e a sua determinação objetivou conhecer a variabilidade apresentada entre as peças.

A densidade aparente é a relação entre a massa e o volume da tábua quando seco ao ar, ou seja, no equilíbrio higroscópico. A massa foi determinada com auxílio de balança eletrônica digital. O volume foi obtido através do produto do comprimento, largura e espessura, utilizando-se a média de três medições de cada uma das medidas.

3.1.2. Classificação mecânica

A classificação mecânica consistiu em determinar o módulo de elasticidade longitudinal das tábuas, em flexão, através de um processo não destrutivo. Objetivou-se distribuir as peças, de modo que as partes simétricas de um pórtico fossem constituídas por lâminas com módulos de elasticidade similares sem discrepância entre os valores médios dos módulos de elasticidade dos pórticos colados com os diferentes adesivos.

As peças de madeira foram colocadas sobre apoios de aço, instalados na parte superior de cavaletes, distanciados de 2,50 m. No centro do vão entre os apoios foi colocado um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm, e curso máximo de 50 mm. Aplicou-se uma força no centro das tábuas, com duas intensidades. Considerando a variação de largura, apresentada pelas peças, a intensidade da força foi definida limitando-se o deslocamento vertical máximo em $L/200$, considerando-se um módulo de elasticidade médio de 10.000 MPa. Desse modo, a força foi aplicada, inicialmente, com intensidade de 136 N; a segunda intensidade variou entre 172 N, 241 N e 277 N, em função da largura das peças.

O módulo de elasticidade à flexão, em relação ao eixo de menor inércia, foi determinado no segundo incremento de carregamento, utilizando-se a seguinte expressão:

$$E = \frac{(\Delta F \times L^3)}{48 \times \Delta \delta \times I} \quad \text{eq. 1}$$

em que:

- E = Módulo de elasticidade (MPa);

- $\Delta F = (F_2 - F_1)$, incremento de força (N);
- $L =$ Vão da prancha (mm);
- $\Delta \delta = (\delta_2 - \delta_1)$, incremento de flecha (mm);
- $I =$ Momento de inércia da seção transversal (mm^4).

3.2. Caracterização da madeira

A madeira foi caracterizada segundo a norma NBR 7190/97. Foram conduzidos os seguintes ensaios de caracterização mecânica:

- compressão paralela às fibras;
- módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;
- cisalhamento paralelo às fibras;
- tração normal às fibras.

Tais ensaios foram realizados com o objetivo principal de se obter parâmetros de resistência mecânica da madeira, para uso no projeto da estrutura a ser desenvolvida na pesquisa. Além disso, os resultados para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras seriam usados para julgamento das juntas coladas a serem confeccionadas.

Tais ensaios foram acompanhados das seguintes propriedades físicas: umidade e densidade aparente.

Como a madeira disponível encontrava-se na forma de tábuas, com espessura menor que 5 cm, os corpos de prova foram fabricados a partir da colagem de duas lâminas de madeira da mesma tábua, conforme Figura 1. Escolheram-se quinze tábuas utilizando, como critério de seleção, a densidade aparente, de modo que, para cada ensaio, o percentual de corpos de prova por classe de densidade representasse a distribuição de densidade das peças no lote de madeira.

As lâminas foram extraídas com dimensões da ordem de 3 x 6 x 40 cm. O excesso no comprimento, em relação às dimensões dos corpos prescritas na norma, relacionou-se ao descarte de parte das extremidades, após o processamento na plaina desengrossadeira. As superfícies das lâminas foram usinadas na plaina desempenadeira, antes da colagem.

Utilizando, como referência, os estudos realizados por Couri Petruski (1999) e Petruski (2000), o adesivo empregado para a colagem dos corpos de prova foi o resorcinol formaldeído, com razão de mistura resina/pó endurecedor de 5:1 e quantidade

de adesivo, de 300 g/m^2 . A quantidade de cola a ser aplicada foi controlada através de balança analítica, com resolução de $0,01\text{g}$. O adesivo foi aplicado em uma das faces e espalhado por pincel. A temperatura, na sala de confecção, apresentou valor aproximado de 25°C . A pressão de colagem foi de $1,1 \text{ MPa}$. O tempo de montagem em aberto foi nulo e o tempo, em fechado, foi de aproximadamente trinta minutos. O tempo na prensa foi de, no mínimo, doze horas. A confecção dos corpos de prova ocorreu após um período de, no mínimo, dez dias de cura das peças coladas.

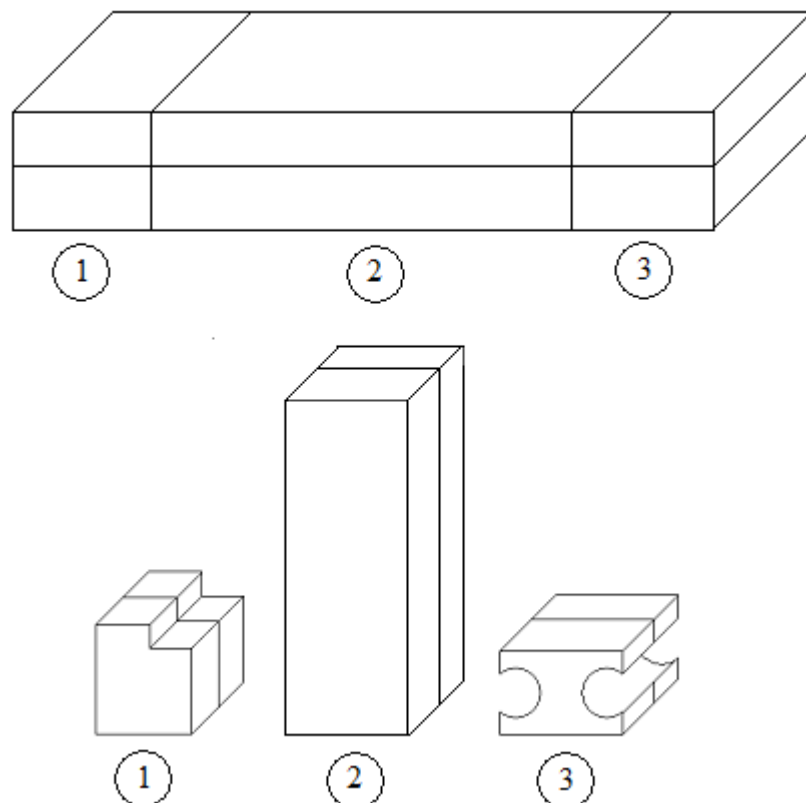


Figura 1 – Esquema de confecção dos corpos de prova para condução dos ensaios:
1 - cisalhamento paralelo às fibras, 2 - compressão paralela às fibras e
3 - tração normal às fibras.

3.3. Resistência de juntas coladas

Objetivou-se estudar o comportamento da madeira de *Eucalyptus sp.*, comercialmente denominado Lyptus, quanto à adesão madeira-madeira, utilizando-se dois adesivos: resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona. Pretendeu-se definir, para cada adesivo, as melhores combinações para as variáveis pressão de colagem e quantidade de adesivo; para o adesivo à base de óleo de mamona, ainda, buscou-se a proporção entre os componentes isocianato e polioliol, objetivando-se obter resistências de juntas coladas, compatíveis com aquelas apresentadas pela madeira sólida.

Utilizou-se o adesivo resorcinol formaldeído, de uso consagrado para emprego estrutural, uma vez que seu desempenho poderia ser uma referência para a análise do adesivo à base de óleo de mamona.

Consideradas as prescrições da norma D-905 da ASTM, das tábuas de Lyptus foram extraídas lâminas com dimensões da ordem de 2,4 x 6 x 45 cm. O excesso no comprimento das lâminas, em relação ao prescrito na norma, relacionou-se ao fato de ter-se que descartar parte das extremidades após o processamento na plaina desengrossadeira.

Conforme prevê a norma, o teor de umidade das lâminas a serem coladas deve ser compatível com as recomendações impostas pelo fabricante do adesivo. Para o adesivo à base de resorcinol formaldeído, a recomendação era que a madeira fosse colada com teor de umidade inferior a 15%. Para o adesivo à base de óleo de mamona não havia recomendação do fabricante. Frente a isso, optou-se por adotar para o adesivo à base de óleo de mamona o teor de umidade das lâminas similar à umidade de equilíbrio para as condições locais, o que conduziu ao mesmo valor recomendado para o adesivo resorcinol formaldeído.

A verificação do teor de umidade médio das peças a serem coladas conduziu ao valor de 11%, com desvio-padrão de 0,57%. Tais valores indicaram não haver necessidade de condicionamento das peças em câmara climática, anteriormente à colagem.

Todas as lâminas passaram por uma seleção prévia. Inicialmente, realizou-se a seleção visual, objetivando a eliminação de tábuas defeituosas. As peças consideradas aprovadas tiveram suas massas e medidas de comprimento, largura e espessura registradas. Os valores obtidos possibilitaram a seleção das lâminas em cinco classes de densidade, definidas para fins experimentais: inferior a 0,60; de 0,60 a 0,69; de 0,70 a

0,79; de 0,80 a 0,89 e igual ou superior a 0,90 g/cm³. Desse modo, procurou-se formar cada junta a partir de lâminas com densidade similar e, ao mesmo tempo, distribuir, entre todos os tratamentos, juntas com classes semelhantes de densidade, buscando a uniformização.

As superfícies das tábuas foram usinadas, utilizando procedimento similar ao anteriormente citado. A temperatura apresentou valor aproximado de 25°C, na sala de confecção das juntas. A quantidade de cola a ser aplicada em cada junta foi controlada através de balança analítica, com resolução de 0,01g. A cola foi espalhada por pincel, procurando distribuir o adesivo da maneira mais uniforme possível, em apenas uma das faces das tábuas. O tempo de montagem “em aberto” foi nulo; o tempo “em fechado” foi, de aproximadamente, trinta minutos. O tempo na prensa foi de, no mínimo, doze horas.

O adesivo resorcinol formaldeído foi utilizado no experimento conduzido, segundo um arranjo fatorial 3 x 3, compreendendo, respectivamente, os fatores quantidade de adesivo e pressão de colagem. A quantidade de adesivo foi avaliada para os níveis 200, 250 e 300 g/m². A pressão de colagem foi avaliada para os níveis 0,9; 1,1 e 1,3 MPa. O adesivo foi preparado, segundo orientação do fabricante, numa razão de mistura resina/pó endurecedor de 5:1. De modo a obter-se uma junta por classe de densidade, foram confeccionadas cinco juntas, para cada tratamento. Considerando que cada junta gerou cinco amostras, foram retirados vinte e cinco corpos de prova por tratamento.

Utilizando o adesivo à base de óleo de mamona, o experimento foi conduzido segundo um arranjo fatorial 3 x 3 x 3, compreendendo os fatores proporção entre os componentes isocianato e polioliol, quantidade de adesivo e pressão de colagem. A proporção entre os componentes isocianato e polioliol, em massa, foi avaliada para os seguintes níveis: 1:1, 1:1,25 e 1:1,5; a quantidade de adesivo para os níveis 200, 250 e 300 g/m². A pressão de colagem foi avaliada para os níveis 0,9; 1,1 e 1,3 MPa. Para cada tratamento, a distribuição das juntas por classe de densidade seguiu o mesmo padrão adotado para o experimento utilizando adesivo resorcinol formaldeído, obtendo-se vinte e cinco corpos de prova por tratamento.

Após a confecção de todas as juntas e a retirada dos corpos de prova, estes foram acondicionados em câmara climática, nas condições de 23 ± 1°C e 50 ± 2% de umidade relativa, atendendo à ASTM D-905.

Romperam-se 900 corpos de prova ao cisalhamento na compressão, dos quais 675 foram confeccionados utilizando o adesivo à base de óleo de mamona e 225 empregando o adesivo resorcinol formaldeído.

Após a ruptura, as partes pertencentes ao mesmo corpo-de-prova foram reunidas para avaliação do percentual de falha na madeira. Utilizou-se uma série de lâminas transparentes previamente quadriculadas e com dimensões que atendessem à variabilidade observada para as dimensões dos corpos colados. O quadriculado das lâminas dividiu o plano colado em oitenta partes, de modo que cada quadrícula representava 1,25% da área em análise. Considerou-se, como falha na madeira, a falha profunda, com visível arrancamento de camadas de fibras, e a falha rasa, com presença visível de fibras das partes envolvidas.

Posteriormente à avaliação do percentual de falha na madeira, das partes obtidas após ruptura de cada corpo-de-prova, aquela com maior perda de madeira foi destinada à determinação da densidade, por imersão em mercúrio metálico, e do teor de umidade.

Os dados de resistência e percentual de falha na madeira foram submetidos à análise de variância, para avaliar os possíveis efeitos dos fatores estudados, utilizando-se o programa MINITAB para a realização dessas análises.

O desempenho dos tratamentos foi avaliado pela análise da resistência e do percentual de falha na madeira. A resistência foi avaliada pelos critérios das normas ASTM D-2559 e NBR 7190/97. O percentual de falha na madeira foi avaliado pelos critérios da ASTM D-2559, que exige um percentual médio de falha não inferior a 75%.

3.4. Modelo de Hankinson como estimador da resistência de juntas coladas sob diferentes ângulos entre fibras

Objetivando-se a construção de pórticos isentos de quaisquer outros elementos de ligação que não o adesivo, fez-se necessária a estimativa da resistência de juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras.

O modelo de Hankinson é um estimador para a resistência da madeira a esforços oblíquos em relação às fibras. Seu uso mais comum ocorre na predição da resistência da madeira à compressão inclinada, usando-se a fórmula:

$$f_{c\alpha,k} = \frac{f_{c0,k} \cdot f_{c90,k}}{f_{c0,k} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{c90,k} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad \text{eq. 2}$$

em que:

- $f_{c\alpha,k}$ = estimativa da resistência característica à compressão inclinada, MPa;
- $f_{c0,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras, MPa;
- $f_{c90,k}$ = resistência característica à compressão normal às fibras, MPa;
- α = ângulo, em graus, entre a direção das fibras e a carga aplicada.

Nesse trabalho, propôs-se validar o modelo de Hankinson como estimador da resistência de juntas coladas, usando o *Eucalyptus sp.*, como substrato.

Foram conduzidos dois experimentos em função do tipo de adesivo utilizado para confecção das juntas. No primeiro experimento, as juntas foram confeccionadas empregando adesivo à base de resorcinol formaldeído; no segundo, utilizou-se o adesivo à base de óleo de mamona.

Utilizando os corpos de prova e a metodologia proposta pela ASTM D-905 (1994) foram conduzidos ensaios de resistência ao cisalhamento, para juntas coladas sob os ângulos 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° entre as fibras. As juntas foram confeccionadas a partir de dois tipos básicos de pequenas tábuas, cujas dimensões aproximadas e disposição de colagem são ilustradas na Figura 2.

Pela Figura 2, vê-se que cada tábua colada sobre outra possibilitou a geração de dois corpos de prova: um a ser ensaiado no cisalhamento na compressão (C), e outro no cisalhamento na torção (T).

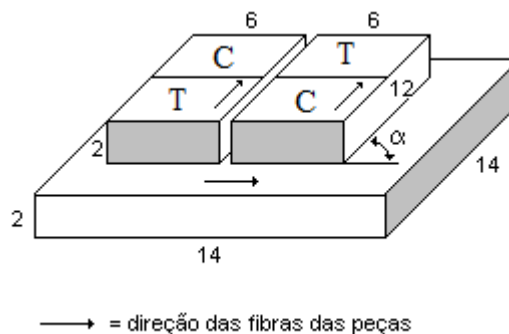


Figura 2 – Colagem das peças para obtenção dos corpos de prova, onde α é o ângulo entre as fibras das peças coladas; dimensões em cm.

Nesses experimentos, cada tipo de adesivo e cada ângulo entre as fibras envolveu o uso de tábuas cuja variabilidade, em termos de densidade, representou a distribuição percentual das diversas classes de densidade do lote. Evidentemente, cada corpo de prova foi composto de peças com densidades similares.

Utilizando procedimento similar ao anteriormente citado, as superfícies das tábuas a serem coladas foram usinadas imediatamente antes da colagem, em plaina desengrossadeira. A temperatura e a umidade relativa médias na sala de confecção das juntas indicaram valores de, respectivamente, 23,5 °C e 65 %, obtidos de leituras nos dias de colagem.

Para cada adesivo, a quantidade a ser aplicada e a pressão de colagem foram estabelecidas a partir dos resultados obtidos do estudo da resistência de juntas coladas, conforme item 3.3.. Para o adesivo à base de óleo de mamona, esse estudo também definiu a proporção entre os componentes isocianato e poliol. O adesivo resorcinol formaldeído foi preparado, segundo orientação do fabricante, numa mistura resina/pó endurecedor à razão de 5:1.

A quantidade de adesivo aplicada em cada junta foi controlada através de balança analítica, com resolução de 0,01g. Após a aplicação nas tábuas, o adesivo, foi espalhado por pincel, procurando distribuí-lo da maneira mais uniforme possível. O tempo de montagem “em aberto” foi nulo e, “em fechado”, de trinta minutos. O tempo de prensagem foi superior a doze horas. Foram feitos vinte corpos de prova para os ângulos de 0° e 90° e doze corpos de prova, para os outros ângulos estudados.

Em termos de resistência das juntas, os resultados foram utilizados para testar o modelo de Hankinson.

Após a ruptura de cada corpo de prova, a parte com maior perda de madeira foi destinada à determinação da densidade, por imersão em mercúrio metálico, e do teor de umidade.

3.5. Resistência ao cisalhamento na torção sob diferentes ângulos de colagem entre as fibras da madeira

O desempenho de pórticos, feitos de madeira multilaminados, com colagem de juntas em ângulo, depende da rigidez e da resistência apresentada pela ligação dos nós rígidos. As solicitações que irão atuar nestes nós serão esforços normais (Nd), esforços cortantes (Qd) e momentos fletores (Md). Tais momentos, nas ligações, agem como

momentos de torção, solicitando os planos de colagem por meio de tensões de cisalhamento.

Alguns pesquisadores concluíram pela validade do modelo de Hankinson como estimador da resistência ao cisalhamento de juntas coladas (DE PAULA, 1983; MANTILLA CARRASCO, 1986; COURI PETRAUSKI, 1999; PETRAUSKI, 2000; SERRANO, 2009). Os resultados obtidos para os ângulos de 0° e 90° , em termos de resistência das juntas, são utilizados como dados de entrada no modelo e permitem calcular a resistência ao cisalhamento para diferentes ângulos. A partir daí, já se dispõe de um modelo para estimar a resistência ao cisalhamento sob o esforço normal de juntas coladas a diferentes ângulos, o mesmo não ocorre em relação à resistência à torção.

Nessa lógica, objetivou-se a obtenção de resultados para a resistência à torção de juntas coladas sob diferentes ângulos entre fibras da madeira, bem como a verificação da existência da relação entre a resistência ao cisalhamento por esforço normal e a resistência ao cisalhamento à torção dessas juntas.

Não existindo norma técnica específica para a obtenção da resistência à torção de juntas coladas sob diferentes ângulos entre fibras da madeira, utilizou-se uma metodologia e um aparato de teste, para tal finalidade, propostos por Petruski (2012). A metodologia proposta considerou o uso de uma viga “bi-apoiada”, carregada simetricamente em dois pontos, de modo que o trecho central estivesse sujeito apenas ao efeito do momento fletor. Para tanto, foi desenvolvido e confeccionado um aparato que simulasse tal situação teórica. O aparato foi feito de um misto de madeira e aço, tendo, na porção central, dois quadrados vazados para inserção do corpo de prova colado. Nas faces laterais dos quadrados, um conjunto de parafusos permitiu o ajuste do corpo de prova. Considerou-se o corpo de prova similar ao proposto pela norma ASTM D-905.

Os corpos de prova foram obtidos conforme descrito no item 3.4., envolvendo dois experimentos, com dois tipos de adesivos. Anteriormente ao ensaio, cada corpo de prova teve sua área colada restrita a uma área circular de raio de 2,5 cm, aproximadamente. A distribuição de tensões de cisalhamento em uma área circular é bem caracterizada na literatura, além disso, a metodologia utilizada para o dimensionamento das ligações coladas foi concebida considerando tal distribuição.

Conforme citado anteriormente, foram feitos vinte corpos de prova para os ângulos de 0° e 90° e doze corpos de prova para os outros ângulos estudados. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaio. Das partes obtidas após

ruptura de cada corpo de prova, aquela com maior perda de madeira foi destinada à determinação da densidade, por imersão em mercúrio metálico, e do teor de umidade.

Em termos de resistência à torção das juntas, os resultados foram obtidos para cada ângulo de colagem avaliado.

Para verificar a existência da relação entre a resistência ao cisalhamento na compressão e a resistência ao cisalhamento na torção das juntas coladas, os dados foram submetidos à análise de regressão, para tanto, utilizou-se o programa MINITAB.

3.6. Configuração geométrica, projeto e verificação da estrutura

3.6.1. Configuração geométrica

A Figura 3 ilustra a configuração geométrica escolhida para a estrutura em laminado colado. Trata-se de pórtico triarticulado, com articulações nos nós A, C e E. Tal estrutura é comumente empregada na sustentação simultânea das cargas de cobertura e fechamentos de edificações comerciais, industriais e rurais, podendo, também, ser utilizada em edificações residenciais pré-fabricadas.

A opção pela utilização de uma articulação no nó C, considerado um processo industrial, objetiva facilitar o transporte das partes da estrutura até o local de instalação. No processo de montagem, a união das partes simétricas da estrutura foi projetada para utilização de um pino metálico.

Embora a estrutura tenha sido projetada considerando a configuração geométrica apresentada na Figura 3, devido às limitações de espaço do quadro de reação, houve a necessidade de redução do comprimento das barras verticais dos pilares, conforme Figura 4. Tal alteração geométrica não prejudicaria o objetivo de avaliar o comportamento da ligação colada na região pilar x banzo.

O pórtico foi dimensionado para cargas verticais, equivalentes às cargas atuantes numa cobertura para telha cerâmica, com plano das águas com inclinação de 26° , com espaçamento de 2,5 metros entre pórticos, cuja trama foi constituída de terças, caibros e ripas. Optou-se pelo emprego de cinco terças, uniformemente distribuídas, com bitola de 6 cm x 12 cm. Adotou-se o espaçamento, entre caibros, de 60 cm e, entre ripas, de 33 cm. As bitolas dos caibros e ripas foram de 6 cm x 6 cm e 4 cm x 2 cm, respectivamente.

O levantamento das cargas de vento se fez de acordo com a norma NBR 6123/88, considerando uma edificação industrial na região de Viçosa-MG, em terreno aberto, com poucas obstruções. Com relação à sobrecarga, foi considerada a carga distribuída de 150 N/m^2 e a carga concentrada de 1000 N , aplicada na cumeeira, de acordo com a norma NBR 6120/80.

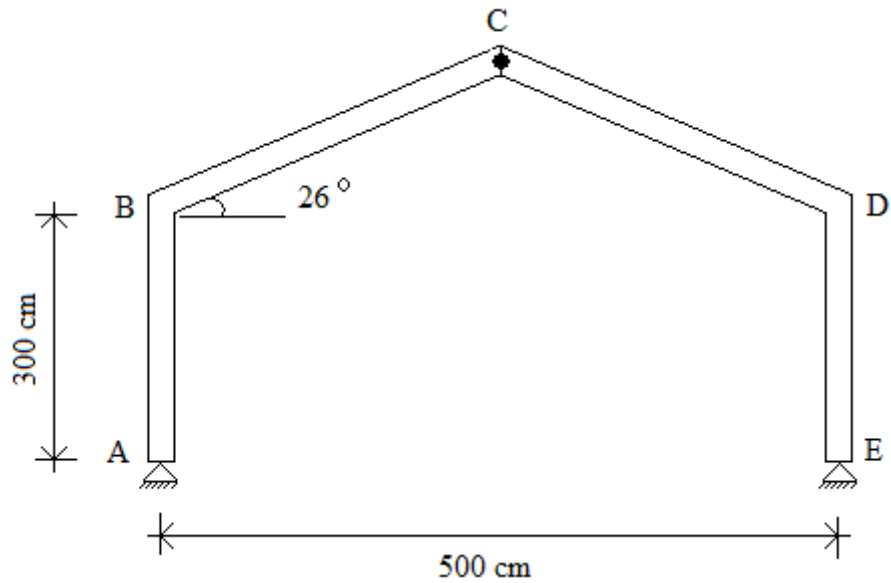


Figura 3 – Configuração geométrica da estrutura projetada.

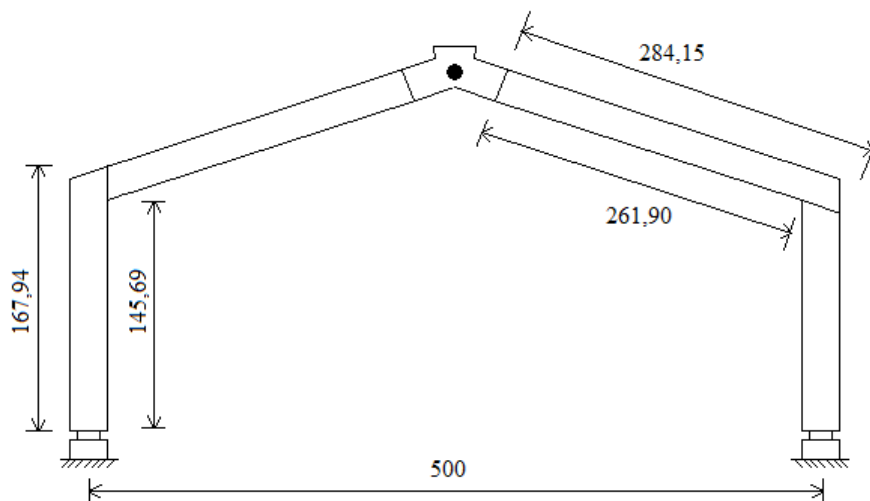


Figura 4 – Configuração geométrica da estrutura executada, dimensões em cm.

Optando-se pela utilização de cinco lâminas, com 2,8 cm de espessura cada, para execução das barras do pórtico; foram definidas, preliminarmente, as seguintes bitolas para os elementos da estrutura: 14 x 17 cm, para os banzos superiores, e 14 x 21 cm, para os pilaretes.

3.6.2. Verificação da estrutura

Os procedimentos para verificação da estrutura foram conduzidos de acordo com os critérios da NBR 7190/97.

A norma brasileira para cálculo e execução de estruturas de madeira adota um método probabilístico, Método dos Estados Limites, no qual as propriedades de resistência da madeira são minoradas e as ações sobre a estrutura são, de forma ponderada, majoradas. As ações são de natureza permanente e acidental. A magnitude das ações e o levantamento inicial de carga são considerados como ações características, que devem ser combinadas de modo a se obter as ações de cálculo, nas verificações pertinentes aos chamados Estados Limites Últimos. Em situações de projeto, onde existem duas cargas acidentais, de naturezas distintas, a norma estabelece três combinações de ações, para os Estados Limites Últimos. As duas primeiras destinam-se à verificação de peças de madeira e a terceira, ao dimensionamento dos elementos de ligação.

3.6.2.1. Verificação da ligação colada

Considerando que o desempenho dos pórticos depende da rigidez e resistência apresentadas pelos nós rígidos, conduziu-se, inicialmente, a verificação da ligação colada, ou seja, dos nós rígidos B e D. Por não haver um método normalizado para verificação de ligações coladas, adotou-se um critério proposto por Couri Petruski (1999) e Petruski (2000), embasado na teoria da Resistência dos Materiais.

A partir da análise estrutural e das combinações especificadas na NBR 7190/97, o método considera que as ligações coladas estão submetidas a um esforço normal de cálculo N_d , um esforço cortante de cálculo Q_d , e um momento fletor de cálculo M_d , que age como um momento de torção, conforme ilustrado na Figura 5.

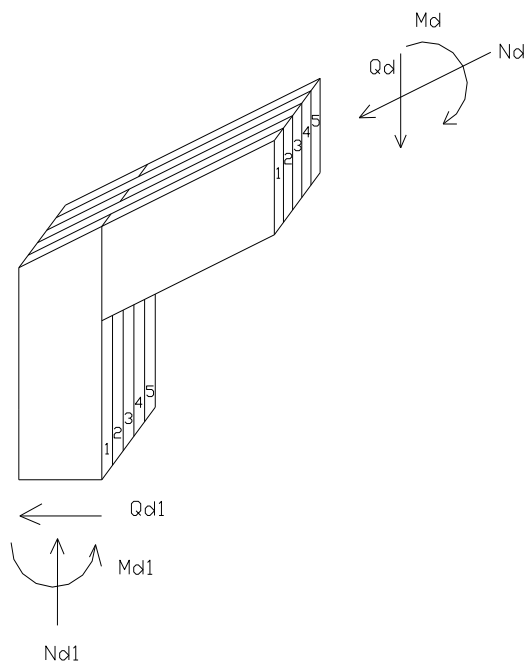


Figura 5 – Esquema dos esforços atuantes nos nós B e D.

De acordo com o método, tais solicitações serão absorvidas nos planos de contato entre as barras, cuja área básica é um paralelogramo. Nessa área, todas as solicitações serão transmitidas por tensões de cisalhamento, agindo nos planos colados. No caso dos esforços normais e cortantes, as direções das tensões de cisalhamento são consideradas paralelas aos esforços solicitantes associados; no caso do momento de torção, considera-se que as tensões de cisalhamento ocorrem em todas as direções.

A área total resistente da ligação corresponde à área do paralelogramo, multiplicada pelo número de faces coladas. Admite-se que a área do paralelogramo possa ser dividida em sub-áreas que absorverão cada uma das tensões de cisalhamento que aparecem em função dos esforços solicitantes. Desse modo, considera-se que uma área circular A_M irá absorver as tensões de cisalhamento, oriundas do momento de torção; determinada área A_N irá absorver as tensões de cisalhamento, oriundas do esforço normal; e uma área A_Q absorverá as tensões provenientes do esforço cortante. O esquema de análise da ligação pode ser observado na Figura 6.

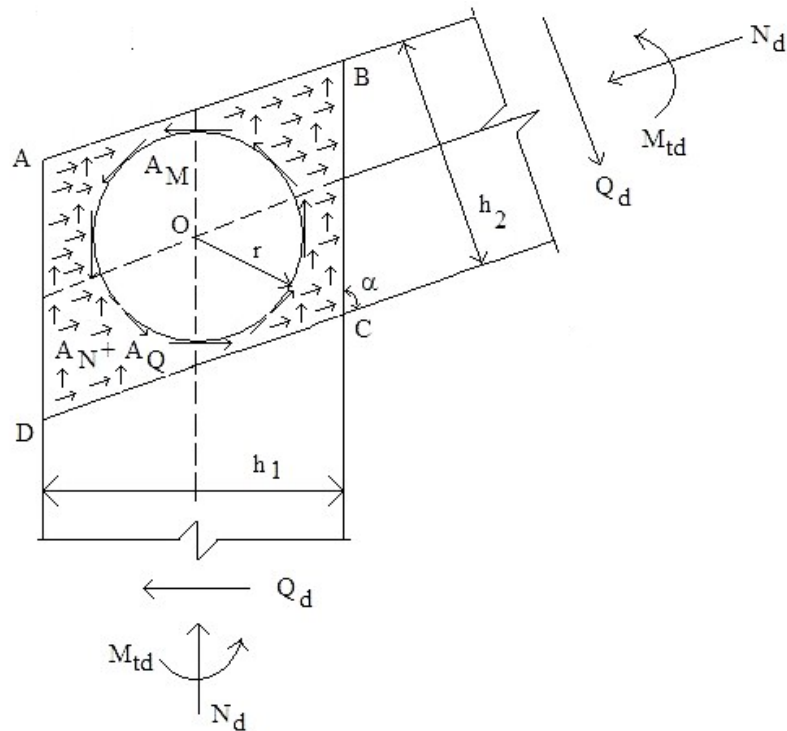


Figura 6 – Esquema de análise da ligação colada.

Nessa lógica, considera-se a superposição de efeitos; a ideia geral do método é que a ligação permaneça estável se a soma das áreas necessárias à absorção dos esforços atuantes for inferior à área colada, ou seja:

$$A_M + A_N + A_Q \leq A_C \quad \text{eq. 3}$$

em que:

- A_M = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do momento de torção de cálculo M_{td} ;
- A_N = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do esforço normal de cálculo N_d ;
- A_Q = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do esforço cortante de cálculo Q_d ;
- A_C = área colada entre duas lâminas da ligação, equivalente à área do paralelogramo.

De acordo com o critério proposto, em ligações que envolvam peças dispostas sob diferentes ângulos entre as fibras, admite-se que a resistência da junta ao cisalhamento inclinado possa ser estimada pelo modelo de Hankinson, a partir da resistência da junta ao cisalhamento paralelo e normal às fibras.

Procurando-se trabalhar sob segurança, adotam-se, como parâmetros de cálculo, a resistência à torção de juntas coladas normais entre si, $f_{tor90,d}$, a resistência ao cisalhamento de juntas coladas normais entre si, $f_{v90,d}$ e a resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas em relação às fibras, $f_{v\alpha,d}$. Desse modo, a equação 3, enquanto equação geral de verificação da ligação, pode ser expressa por:

$$\left(\frac{2 \cdot M_{td} \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{tor90,d}}\right)^{2/3} + \frac{N_d}{n \cdot f_{v\alpha,d}} + \frac{Q_d}{n \cdot f_{v90,d}} \leq \frac{h_1 \cdot h_2}{sen(\alpha)} \quad \text{eq. 4}$$

em que:

- M_{td} = momento de torção de cálculo, kNm;
- N_d = esforço normal de cálculo, kN;
- Q_d = esforço cortante de cálculo, kN;
- n = número de faces coladas numa dada ligação;
- $f_{tor90,d}$ = resistência à torção de juntas coladas normais entre si, MPa;
- $f_{v90,d}$ = resistência ao cisalhamento de juntas coladas normais entre si, MPa;
- $f_{v\alpha,d}$ = resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas, em relação às fibras, MPa;
- h_1 = altura da barra 1, m;
- h_2 = altura da barra 2, m;
- α = ângulo entre a direção das fibras.

Segundo o método proposto, a análise de ligações coladas envolve a verificação da área colada, necessária para absorver as tensões oriundas dos esforços solicitantes e, também, a verificação da resistência da seção transversal, das lâminas que compõem a ligação, em relação às ações impostas. A verificação da resistência da seção transversal deve ser realizada conforme a norma NBR 7190/97. Nesse caso, todas as peças são consideradas curtas.

3.6.2.2. Verificação das barras

As barras da estrutura foram verificadas à flexo-compressão ou flexo-tração e aos esforços de cisalhamento atuantes, seguindo os critérios da norma NBR 7190/97.

Com relação às peças que trabalham sob compressão, a norma impõe que seja verificada a estabilidade da peça, bem como a resistência da seção transversal às solicitações. A norma estabelece a existência de três possíveis tipos de peças, em função do índice de esbeltez: peças curtas, com índice de esbeltez “ λ ”, no máximo, igual a 40; peças medianamente esbeltas, para as quais $40 < \lambda \leq 80$, e peças esbeltas, para as quais $80 < \lambda \leq 140$. O índice de esbeltez deverá ser calculado para cada direção de análise e é função da geometria da peça e de suas condições de vinculação.

Na análise da estabilidade, peças curtas com carga centrada, têm a verificação restrita ao fenômeno da compressão, isentas de flexão. No caso de peças medianamente esbeltas ou esbeltas, considera-se a possibilidade de a peça entrar em colapso por flambagem e a estabilidade deverá ser avaliada pela flexo-compressão.

A resistência da seção transversal de barras submetidas à análise sob flexo-tração deverá ser verificada de modo similar às peças submetidas à flexo-compressão.

A verificação para esforços de cisalhamento, atuantes nas barras, é realizada através da tensão de cisalhamento atuante no ponto mais solicitado da peça, devendo ser inferior à resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras.

3.6.2.3. Verificação da articulação

Para finalizar a análise da estrutura proposta fez-se necessária, também, a verificação da articulação no ponto C. Nesse caso, foi conduzido o cálculo do raio mínimo do pino metálico e a sua resistência aos esforços solicitantes, sendo considerada a possibilidade de embutimento do pino na madeira ou a ocorrência de flexão do pino. Com relação à madeira, verificaram-se as possibilidades de ocorrência de embutimento, devido aos esforços normal e cortante.

3.7. Execução das estruturas

Construíram-se cinco estruturas: três utilizaram o adesivo resorcinol formaldeído e duas, utilizando o adesivo à base de óleo de mamona.

A verificação da estrutura atendeu aos critérios impostos pela norma NBR 7190/97. Desse modo, manteve-se o pré-dimensionamento estabelecido, ou seja:

- banzo superior, formado por cinco lâminas coladas de 2,8 cm x 17 cm;
- pilarete, formado por cinco lâminas coladas de 2,8 cm x 21 cm.

Realizou-se uma seleção das peças de madeira com largura adequada à dimensão final das peças. Para a confecção dos pilaretes e dos banzos, realizou-se nova seleção das peças de madeira, com o objetivo de distribuir as lâminas a fim de que os lados simétricos de um mesmo pórtico apresentassem valores similares para as médias da densidade e do módulo de elasticidade. A seleção das peças de madeira, destinadas à construção dos pórticos, independe de qualquer um dos adesivos já mencionados.

O pórtico é formado por duas partes simétricas, unidas por uma rótula metálica no nó C, confeccionando-se cada parte ou lado, separadamente.

Primeiramente, as lâminas foram processadas na plaina desengrossadeira, de modo a obter, com a máxima precisão possível, a espessura de 2,8 cm. Posteriormente, as lâminas receberam um corte em uma das extremidades, com o ângulo pré-estabelecido, com o auxílio de gabarito, construído para essa finalidade.

As lâminas eram processadas e coladas no mesmo dia. Desse modo, conseguiu-se preparar metade de uma estrutura por dia. A montagem/colagem das estruturas foi feita com auxílio de gabarito especialmente construído para esse fim, em madeira de jatobá (*Hymenaea sp.*). Tal madeira foi escolhida em função de sua resistência e rigidez. No gabarito, foram instalados vários pares de cantoneiras metálicas, para determinar as posições das peças do pórtico, conforme a Figura 7.

A construção iniciou-se pela conferência de todas as peças e encaixes, quando de uma montagem preliminar, sem adesivo. Todas as peças foram escovadas e dispostas em camadas, próximas do gabarito, de modo a agilizar o processo de montagem/colagem.

A razão de mistura entre os componentes, a pressão de colagem e a quantidade de cada adesivo utilizado foram os obtidos, experimentalmente, dos ensaios de resistência das juntas coladas.



Figura 7 – Gabarito confeccionado para construção das estruturas.

O adesivo resorcinol formaldeído foi preparado, segundo orientação do fabricante, com razão de mistura resina/pó endurecedor de 5:1. Foram aplicados 250 g/m^2 , em apenas uma das faces da madeira.

Para o adesivo à base de óleo de mamona a proporção entre os componentes isocianato e polioliol, em massa, foi de 1:1,32. Com relação à preparação, devido à rápida alteração da viscosidade, percebida especialmente no espalhamento, o adesivo foi preparado em duas porções, separadas de 8 minutos, aproximadamente. A quantidade de adesivo foi de 300 g/m^2 , aplicado em uma das faces.

Anteriormente à montagem, previu-se a quantidade de adesivo para cada uma das quatro linhas de cola a serem aplicadas, por camada de cola e por peça, ou seja, banzo superior e pilarete. Desse modo, a mistura adesiva foi depositada em copos, para cada peça da estrutura. Durante a montagem, a quantidade de adesivo existente em cada copo foi aplicada sobre a peça, a ele associada, através de pincel. Essa operação é ilustrada na Figura 8.

O processo de montagem/colagem envolvia, em média, quatro pessoas para sua execução. O tempo de montagem em fechado foi, no máximo, 20 minutos, e o tempo de montagem em aberto foi nulo.

A temperatura média do ambiente de montagem foi de 23°C. As peças coladas apresentaram um teor de umidade médio de 11,57%, com desvio-padrão de 0,53%.

Após deposição de todas as camadas e lâminas sobre o gabarito, a estrutura recebeu a pressão pré-estabelecida de 1,3 MPa, feita com o aperto do conjunto de parafusos, especialmente instalados para esse fim, no gabarito. O controle do aperto foi, inicialmente, manual, seguido pela conferência com uma chave de boca, instrumentada com “strain gage”, cuja leitura era feita em “strain meter”. Após trinta minutos, foi executado um reaperto em todos os parafusos, conforme a Figura 9.

Após a construção, a estrutura ficava sob pressão, no gabarito, por um período mínimo de 12 horas, normalmente durante uma noite, após o que, a mesma era retirada do gabarito, ficando armazenada, pelo menos, durante dez dias, antes do ensaio. Tal procedimento visou cumprir recomendação do fabricante do adesivo, conforme Figuras 10, 11 e 12.

Anteriormente aos testes, as estruturas foram lixadas nas superfícies onde ocorreram os escorrimientos do adesivo, conforme a Figura 13.



Figura 8 – Espalhamento do adesivo resorcinol formaldeído com pincel.



Figura 9 – Aperto dos parafusos com controle da aplicação de pressão.



Figura 10 – Estrutura sob pressão no gabarito.



Figura 11 – Retirada da estrutura construída, do gabarito, para armazenamento.

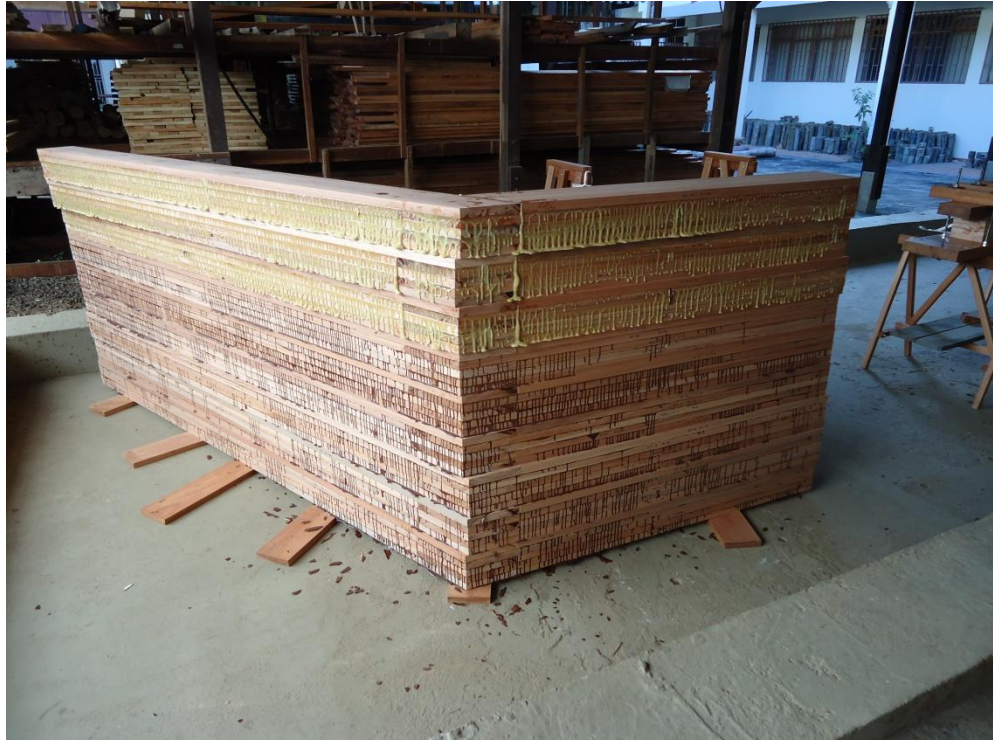


Figura 12 – Aspecto geral das estruturas construídas.



Figura 13 – Lixamento da superfície.

3.8. Ensaio das estruturas construídas

As estruturas construídas foram testadas individualmente e dispostas no piso do quadro de reação, com o objetivo de avaliar o desempenho das estruturas, quanto à resistência e rigidez.

O ensaio exigiu a execução e montagem de todo um aparato de teste, conforme descrito nos Quadros 1 e 2.

Com relação ao sistema de aplicação de cargas, foram confeccionados e fixados, em pontos específicos, os suportes dos cilindros hidráulicos para aplicação das cargas verticais e horizontal. No caso da carga horizontal, correspondente à carga do vento, agindo em um dos pilaretes, foi confeccionado um suporte deslizante para recepção e distribuição da carga aplicada. Foram instalados aparatos metálicos para recepção das cargas dos cilindros, no centro do vão dos banzos superiores.

O sistema confeccionado para a sustentação do pórtico permitiu, também, o deslizamento da estrutura, evitando atritos com o piso do quadro de reação. A estrutura foi contida em pontos específicos. Foram instalados sistemas de contenção nas laterais da estrutura, na parte central e nos banzos superiores. Os sistemas de sustentação e contenção da estrutura objetivaram simular contraventamentos teóricos de projeto, permitir o livre deslocamento na direção da carga, impedindo, porém, deslocamentos consideráveis, fora do plano da estrutura, bem como evitar acidentes, quando de sua ruptura.

Foram instalados, em pontos pré-estabelecidos, cinco relógios comparadores para leitura dos deslocamentos apresentados pela estrutura sob carga.

Nas reações de apoio, foram instaladas células de carga para acompanhamento e registro das cargas aplicadas. Os sistemas de sustentação das células de carga foram fixados em uma das vigas do quadro de reação.

Instalado todo o aparato de teste, aplicou-se uma carga de “acomodação” na estrutura. Aliviada essa carga, todos os relógios comparadores foram “zerados” e procedeu-se ao ensaio.

Foram pré-estabelecidos alguns níveis de aplicação de carga. Embora não se tenha conseguido reproduzir exatamente os níveis previstos, foram feitas leituras em todos os relógios instalados, após obtenção de determinada magnitude de carga.

Quadro 1 – Descrição das peças componentes do aparato de teste, parte 1

Descrição da peça	Peças de madeira (un)	Barras de aço de 1/4" (un)	Furos nas peças de madeira (un)	Furos para instalação de bucha de 1/4" (un)	Porcas (un)	Arruelas (un)
Sistema de contenção dos banzos superiores	12	8	16	8	16	8
Suportes de cilindros hidráulicos para aplicação de cargas verticais no centro dos banzos	22	12	72	12	24	24
Suporte de cilindro hidráulico para aplicação de carga na cumeeira	12	6	22	6	12	12
Sistema de sustentação e deslizamento do pórtico	4		40			
Sistema de aplicação de carga de vento	19	6	56	6	16	16
Sistema de contenção lateral da célula de carga C1	15	6	47	6	14	30
Sistema de contenção central	22	6	71	20*	100	100
Sistema de contenção lateral da célula de carga C2	16	6	50	6	24	34
Sistemas de sustentação das células de carga	24		72	8	8	34
Aparatos de suporte dos relógios	28			14		28
Aparatos instalados no centro dos banzos para recepção das cargas dos cilindros	6		14			
Aparato de suporte do relógio da cumeeira	4					
Cavalete para instalação da máquina filmadora	23		13		17	17
Banco para instalação da máquina filmadora	7		5			3
Rótula metálica						24
Dois grampos metálicos						
Total	214	50	478	66	231	330

* bucha de 1/2"

Quadro 2 – Descrição das peças componentes do aparato de teste, parte 2

Descrição da peça	Materiais diversos
Sistema de contenção dos banzos superiores	Pregos, 10 bolas de gude
Suportes de cilindros hidráulicos para aplicação de cargas verticais no centro dos banzos	20 parafusos de 1/4", lixa, encaixe (torneado) do cilindro, cunha metálica
Suporte de cilindro hidráulico para aplicação de carga na cumeeira	6 parafusos de 1/4", lixa, encaixe (torneado) do cilindro, barra chata com 2 furos, calços metálicos
Sistema de sustentação e deslizamento do pórtico	40 parafusos, 10 rolamentos
Sistema de aplicação de carga de vento	19 parafusos de 1/4", lixa, encaixe (torneado) do cilindro, cantoneira e chapa metálica, 4 rolamentos, pregos
Sistema de contenção lateral da célula de carga C1	16 parafusos de 1/4", cutelo metálico, chapa metálica, pregos, 5 bolas de gude
Sistema de contenção central	27 parafusos, 3 chapas metálicas, cutelo, placa metálica, parafusos e porcas de ajuste da célula de carga
Sistema de contenção lateral da célula de carga C2	10 parafusos de 1/4", chapa metálica, 4 barras de alumínio, pregos, 5 bolas de gude,
Sistemas de sustentação das células de carga	34 parafusos, 18 barras de alumínio, 4 cantoneiras, 4 chapas de aço, 8 esferas de aço, 24 pregos, frisos na madeira
Aparatos de suporte dos relógios	21 parafusos, 21 entalhes, pregos
Aparatos instalados no centro dos banzos para recepção das cargas dos cilindros	14 parafusos, lixa, corte em ângulo, entalhes
Aparato de suporte do relógio da cumeeira	2 parafusos, pregos, entalhes
Cavalete para instalação da máquina filmadora	17 parafusos, pregos, entalhes
Banco para instalação da máquina filmadora	peça metálica para instalação da filmadora, 3 parafusos, pregos
Rótula metálica	8 parafusos, chapas metálicas
Dois grampos metálicos	
Total	237 parafusos, pregos, 14 rolamentos, 22 barras de alumínio, 20 bolas de gude, 4 encaixes (torneados) dos cilindros, 12 esferas de aço, frisos e entalhes na madeira, lixas, cutelos, cantoneiras, chapas, barras, cunhas e calços metálicos

Inicialmente, aplicou-se sobre a estrutura um carregamento até o nível correspondente à carga de projeto, incluindo a carga lateral, devido à ação do vento. Fez-se o registro dos deslocamentos apresentados nos relógios comparadores. Aliviada essa carga, todos os relógios comparadores foram “zerados”. Procedeu-se, então, à aplicação de um carregamento até o nível correspondente a 2,5 vezes a carga de projeto. Nessa fase, estabelecidos intervalos proporcionais ao total previsto, para cada nível,

fez-se o registro dos deslocamentos apresentados pelos relógios. Novamente, a carga foi aliviada e todos os relógios foram retirados, à exceção daquele instalado na cumeeira. A partir de então, procedeu-se à elevação da carga até a ruptura da unidade ensaiada. Registrou-se, por fim, a carga de ruptura ou carga máxima indicada nos equipamentos de leitura das células de carga, bem como os valores acusados pelo relógio da cumeeira.

Todas as cinco estruturas construídas foram levadas à ruptura. As Figuras seguintes ilustram o procedimento e aparatos usados nos ensaios.



Figura 14 – Vista geral do aparato de teste instalado.



Figura 15 – Detalhe da rótula metálica da cumeeira e posicionamento do relógio.

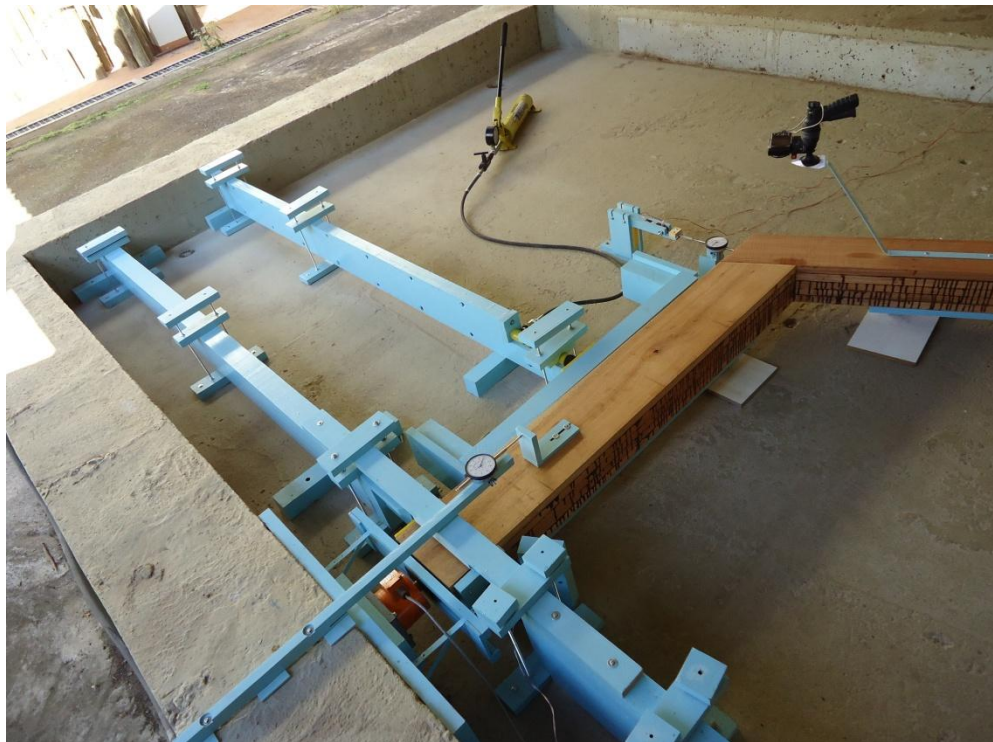


Figura 16 – Detalhe da aplicação da carga lateral e do posicionamento da célula de carga sob o pilarete.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Classificação das peças de madeira

4.1.1. Classificação visual e determinação da densidade

Foram identificadas, mensuradas e inspecionadas 357 tábuas de madeira de *Eucalyptus sp.*. Tais tábuas foram separadas em três pilhas, em função das diferentes larguras. A pilha 1 foi formada por 203 peças que apresentaram valores de largura entre 10 e 14,5 cm. A pilha 2 foi formada por 103 peças que apresentaram valores entre 15 e 19,5 cm; e a pilha 3 foi formada por 51 peças, cujos valores foram iguais ou superiores a 20 cm. A formação das pilhas de madeira e a balança utilizada para a pesagem das peças são ilustradas na Figura 17.

Com relação ao comprimento, 98 peças apresentaram valores entre 330 e 340 cm, e 259 peças entre 360 e 370 cm. O valor obtido para a espessura média foi de 3,24 cm, com desvio-padrão de 0,12.

A inspeção visual das peças permitiu perceber que o defeito mais frequente foi o esmoado.

Os valores de densidade obtidos possibilitaram a seleção das lâminas em cinco classes, definidas para fins experimentais, como:

- Classe 1: densidade, variando de 0,50 a 0,59 g/cm³;
- Classe 2: densidade, variando de 0,60 a 0,69 g/cm³;
- Classe 3: densidade, variando de 0,70 a 0,79 g/cm³;

- Classe 4: densidade, variando de 0,80 a 0,89 g/cm³;
- Classe 5: densidade, variando de 0,90 a 1 g/cm³.

Quanto à distribuição das peças entre as classes de densidade, 3% pertenciam à classe 1; 13%, à classe 2; 37%, à classe 3; 36%, à classe 4 e 11 %, à classe 5. Portanto, a maioria das peças apresentou valores de densidade aparente variando de 0,70 a 0,89 g/cm³.



Figura 17 – Formação das pilhas de madeira e balança utilizada para pesagem das tábuas.

4.1.2. Classificação mecânica

Determinou-se o módulo de elasticidade à flexão de todas as peças de madeira, fornecidas para o experimento. Os resultados obtidos indicaram o valor médio de 19.118 MPa, com desvio padrão de 3.369 MPa. O menor valor observado foi 12.124 MPa e o valor máximo, 30.713 MPa. O coeficiente de variação foi de 17,62%.

Scanavaca Junior (2004), estudando as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*, obteve o valor de 17.738 MPa para o módulo de elasticidade, com a amplitude de variação entre 9.493 e 25.340 MPa.

Targa et al. (2005) estudaram o emprego de métodos não destrutivos para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Para a madeira de *Eucalyptus grandis*, os autores encontraram o valor médio do módulo de elasticidade de 15.306 MPa, com desvio padrão de 2.152 MPa. De acordo com os autores, os valores elevados de módulo de elasticidade indicam uma elevada rigidez da madeira e, geralmente, associam-se à alta resistência, qualificando-a como material para fins estruturais.

4.2. Caracterização da madeira

Os resultados da caracterização física e mecânica do *Eucalyptus sp.*, comercialmente denominado Lyptus, estão apresentados no Quadro 3.

Os teores de umidade médios apresentados no Quadro 3 referem-se aqueles apresentados pelos corpos de prova do ensaio. Foram feitas determinações do teor de umidade e densidade, em todos os corpos testados.

Seguindo critérios da NBR 7190/97, para o dimensionamento das estruturas, os resultados de caracterização mecânica foram corrigidos para o teor de umidade padrão de 12% e, convenientemente, transformados para a obtenção das resistências características. Para uso em projeto, os valores estão apresentados no Quadro 4. A propriedade relacionada à rigidez é apresentada com seu valor médio, conforme prevê a norma brasileira para cálculo de estruturas em madeira.

Quadro 3 – Resultados da caracterização física e mecânica do *Eucalyptus sp.*

	Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})	Módulo de elasticidade à compressão (E_{c0})	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})	Resistência à tração normal às fibras (f_{t90})
Nº de corpos de prova	35	35	35	35
Teor de umidade médio (%)	10,62	10,62	11,08	11,01
Densidade aparente média (g/cm^3)	0,79	0,79	0,78	0,80
Valores médios (MPa)	69,31	20654	11,49	4,54
Desvio-padrão (MPa)	7,60	2568	1,55	0,82

Quadro 4 – Resultados da caracterização mecânica do *Eucalyptus sp.*, corrigidos para o teor de umidade de 12%

Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	Módulo de elasticidade médio à compressão (MPa)	Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	Resistência característica à tração normal às fibras (MPa)
$f_{c0,k}$	$E_{c0,m}$	$f_{v0,k}$	$f_{t90,k}$
57,50	20072	9,70	3,48

4.3. Propriedades de adesão do *Eucalyptus sp.*

4.3.1. Juntas coladas utilizando adesivo resorcinol formaldeído

4.3.1.1. Resistência das juntas coladas com resorcinol formaldeído

Foram feitas determinações do teor de umidade dos 225 corpos de prova, rompidos ao cisalhamento na compressão. O valor obtido para o teor de umidade médio foi de 11,89%, com desvio-padrão de 0,55. Tendo em vista o emprego dos critérios da NBR 7190/97 para dimensionamento das estruturas, todos os resultados de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento foram corrigidos para o teor de umidade padrão de 12%.

Preliminarmente, foi conduzida uma análise das resistências observadas para os efeitos principais estudados, ou seja, quantidade de adesivo e pressão de colagem, considerando as classes de densidade como blocos. Os resultados mostraram uma variação significativa entre as classes de densidade nas resistências obtidas, para um nível de 5% de probabilidade. Assim sendo, enquanto metodologia de análise, optou-se por considerar, também, a densidade como fator experimental com cinco níveis, referentes às cinco classes de densidade definidas para condução do experimento. Para fins de utilização nos modelos matemáticos, os níveis de densidade foram representados pelo ponto central do intervalo das classes de densidade inicialmente consideradas, assumindo os valores de 0,55; 0,65; 0,75; 0,85 e 0,95 g/cm³.

A análise de regressão das médias dos valores obtidos gerou um modelo matemático que relacionou o comportamento da variável dependente: resistência, com as variáveis independentes estudadas. Foi aplicado o teste t para testar a significância dos coeficientes da regressão.

Desse modo, a estimativa da resistência ao cisalhamento das juntas coladas com adesivo à base de resorcinol formaldeído, consideradas as variáveis estudadas e seus respectivos níveis, poderia ser obtida a partir do modelo de regressão, indicado a seguir:

$$\hat{Y} = -17,41 - 11,11 * P + 87,53 * D - 65,33 * D^2 + 17,70 * P \times D \quad \text{eq. 5}$$

(R² = 0,70), para 0,9 ≤ P ≤ 1,3 MPa e 0,5 ≤ D ≤ 1 g/cm³

*: significativo pelo teste t (P < 0,05)

em que:

- P = pressão de colagem, (MPa);
- D = densidade aparente (g/cm^3);
- \hat{Y} = estimativa da resistência das juntas (MPa).

A equação 5 permite verificar que a quantidade de adesivo, para os níveis estudados, não apresentou efeito significativo sobre a resistência das juntas. Nesse caso, considerado o aspecto econômico, a quantidade de adesivo de $200 \text{ g}/\text{m}^2$ faria com que o custo final da estrutura em madeira laminada colada fosse minimizado, sem que houvesse comprometimento da resistência da peça.

A interação pressão x densidade foi avaliada por meio de superfície de resposta, apresentada na Figura 18 e construída a partir do modelo da equação 5.

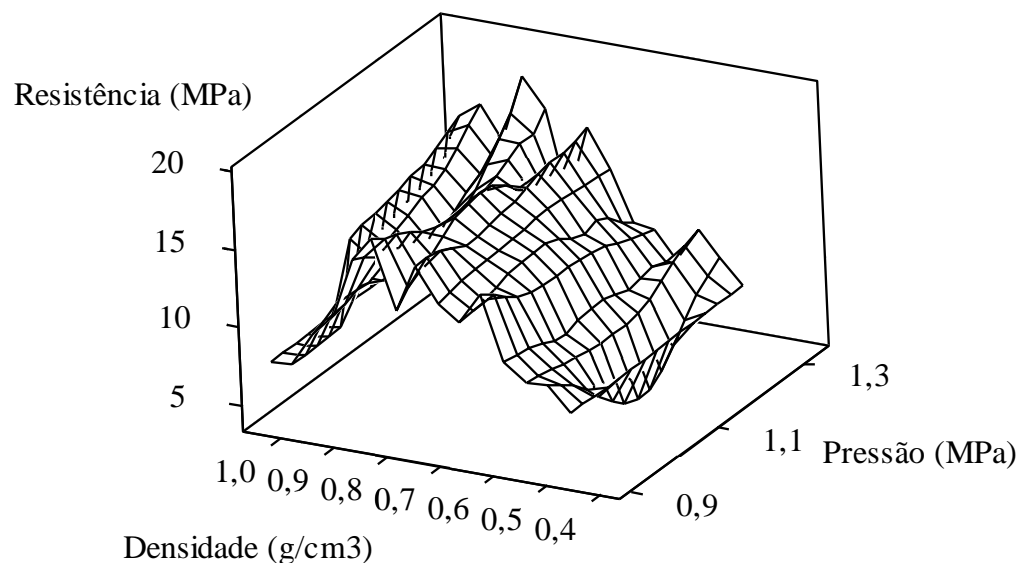


Figura 18 – Superfície de resposta estimada obtida para a variável dependente: resistência, em função de diferentes níveis de pressão de colagem e densidade, obtida a partir da equação 5.

Resolvendo o modelo da equação 5 para os diversos níveis de pressão e densidade estudados, obtiveram-se as equações apresentadas nos Quadros 5 e 6, que permitiram gerar as Figuras 19 e 20. Tais Figuras ilustram os cortes da superfície de resposta e permitem avaliar a interação entre as variáveis estudadas.

Quadro 5 – Equações de regressão da resistência das juntas coladas por níveis de densidade e em função da pressão de colagem

Classe de densidade	Ponto central (g/cm ³)	Equações de regressão da resistência	Estimativas da resistência para os níveis de pressão (MPa)		
			0,9	1,1	1,3
1	0,55	$\hat{Y} = 10,97 - 1,375P$	9,73	9,46	9,18
2	0,65	$\hat{Y} = 11,88 + 0,395P$	12,24	12,32	12,39
3	0,75	$\hat{Y} = 11,49 + 2,165P$	13,44	13,87	14,30
4	0,85	$\hat{Y} = 9,79 + 3,935P$	13,33	14,12	14,90
5	0,95	$\hat{Y} = 6,78 + 5,705P$	11,92	13,06	14,20

Quadro 6 – Equações de regressão da resistência das juntas coladas por níveis de pressão de colagem e em função da densidade

Pressão (MPa)	Equações de regressão da resistência	Densidade para resistência máxima (g/cm ³)	Estimativa da resistência máxima (MPa)
0,9	$\hat{Y} = -27,41 + 103,46D - 65,33D^2$	0,79	13,55
1,1	$\hat{Y} = -29,63 + 107D - 65,33D^2$	0,82	14,18
1,3	$\hat{Y} = -31,86 + 110,54D - 65,33D^2$	0,85	14,90

As retas apresentadas na Figura 19 permitem verificar que, para as classes de densidade estudadas, as estimativas das resistências foram crescentes com o incremento da pressão, ocorrendo fenômeno inverso para a classe de densidade 1. As estimativas de resistência permaneceram, praticamente, constantes para o nível de densidade de 0,65 g/cm³. Observa-se que as estimativas das resistências dos maiores níveis de densidade

foram mais sensíveis ao aumento da pressão. As menores estimativas para resistência, apresentadas pelos modelos, indicaram valores superiores aos médios obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, exceto para o nível de densidade de ponto central igual a $0,55 \text{ g/cm}^3$.

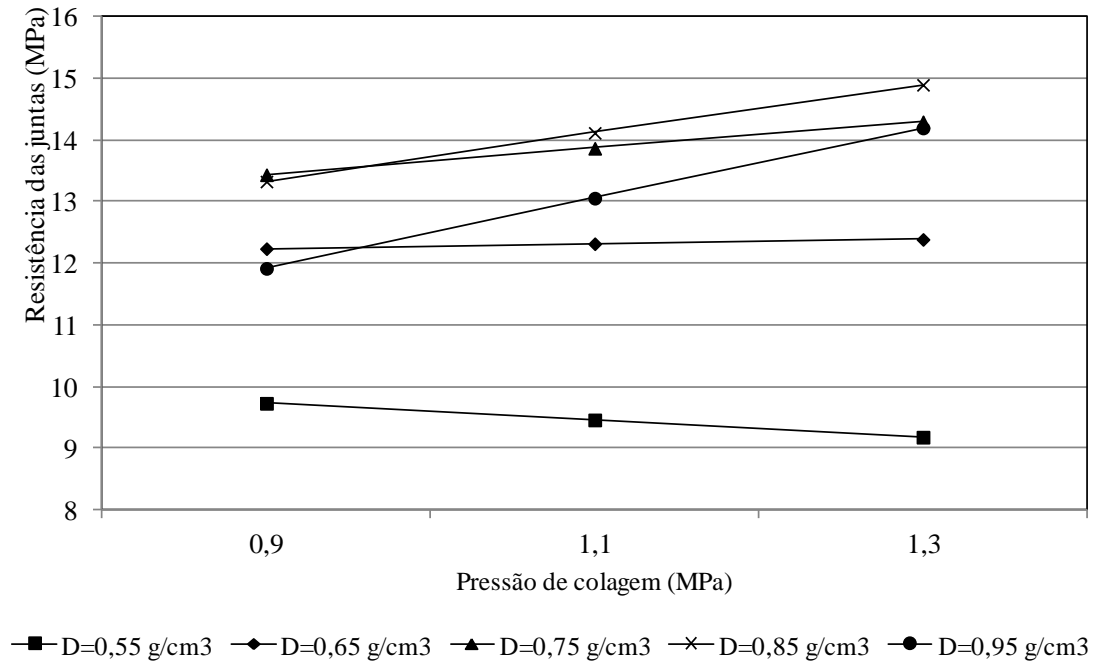


Figura 19 – Resistência estimada das juntas coladas por níveis de densidade, em função da pressão de colagem.

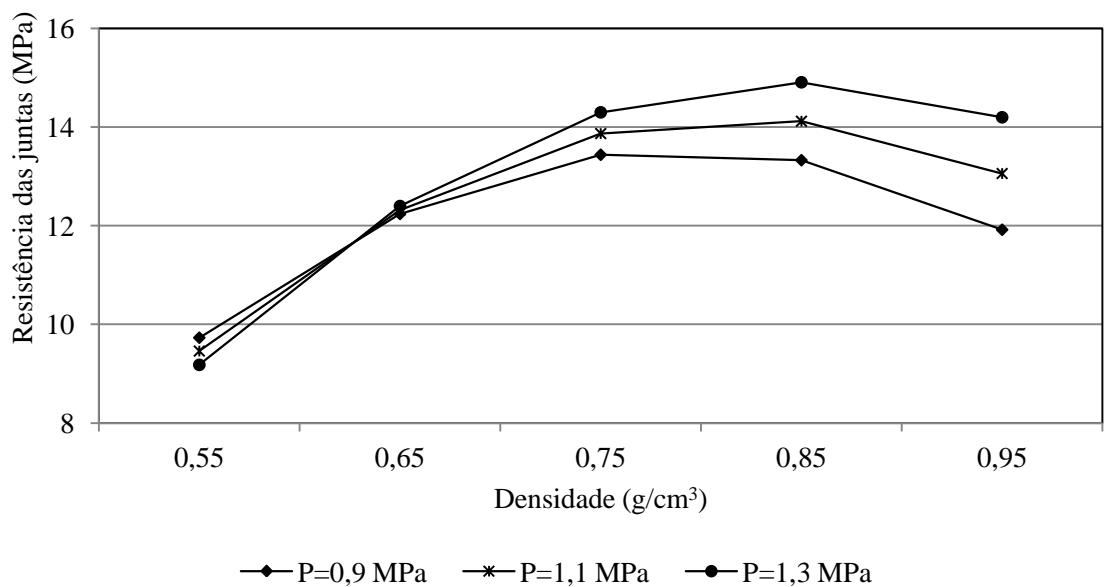


Figura 20 – Resistência estimada das juntas coladas por níveis de pressão de colagem, em função da densidade.

Observa-se, na Figura 20, que em geral, para um valor fixo de densidade, as estimativas das resistências aumentaram com o incremento da pressão de colagem. Como observado, também, no Quadro 6, as estimativas da densidade para obtenção dos maiores valores de resistências encontram-se dentro do domínio estudado, variando entre 0,79 e 0,85 g/cm³. De modo geral, as estimativas da resistência indicaram valores superiores aos obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira sólida, de 11,18 MPa. Para a classe de densidade 1, cujo ponto central é de 0,55 g/cm³, independentemente da pressão de colagem, para os níveis estudados, as estimativas de resistência das juntas foram inferiores ao valor de 11,18 MPa.

Interessante o fato que todas as curvas, independentemente dos níveis de pressão, interceptaram-se no ponto correspondente à densidade de 0,63 g/cm³, cuja estimativa da resistência foi de 11,84 MPa.

4.3.1.2. Falha na madeira em juntas coladas com resorcinol formaldeído

Buscou-se um modelo matemático, utilizando análise de regressão das médias dos valores obtidos, que relacionasse o comportamento da variável dependente: falha na madeira, com as variáveis independentes estudadas. O modelo de regressão é apresentado na equação 6. Foi aplicado o teste t para testar a significância dos coeficientes da regressão.

$$\hat{Y} = 159,602 - 12,732^* D - 0,216^* Q - 43,094^* P + 0,181^* Q \times P \quad \text{eq. 6}$$

(R² = 0,37), para 200 ≤ Q ≤ 300 (g/m²), 0,9 ≤ P ≤ 1,3 MPa e 0,5 ≤ D ≤ 1 g/cm³

*: significativo pelo teste t (P < 0,05)

em que:

- Q = quantidade de adesivo, (g/m²);
- P = pressão de colagem, (MPa);
- D = densidade aparente (g/cm³);
- \hat{Y} = estimativa do percentual de falha na madeira das juntas (%).

Uma das vantagens da regressão é a proposição de um modelo matemático que possa ser usado para prever novos valores da variável dependente, dentro da faixa das condições experimentais utilizadas das variáveis independentes.

O modelo de regressão apresentado na equação 6 pode ser aceito, de acordo com o teste F, para um nível de significância de 0,05. Entretanto, o resultado da análise de regressão mostrou, pelo valor de R^2 , que as três variáveis explicaram apenas 37% da variabilidade da estimativa do percentual de falha na madeira das juntas. Nesse caso, a utilização do modelo não permitiria obter uma boa estimativa pontual do percentual de falha. A equação de regressão, no entanto, permitiria a obtenção de uma estimativa de intervalo para o valor previsto de y, ou seja, a determinação de um intervalo de previsão.

O intervalo de previsão enfatiza que as previsões não podem ser tidas como valores perfeitos. Assim sendo, um intervalo de previsão corresponde ao intervalo que irá conter o valor previsto de y, com probabilidade $(1 - \alpha)$.

O estabelecimento de um dado intervalo de previsão é função dos valores assumidos para as variáveis independentes do modelo de regressão. Portanto, no caso em estudo, os limites do intervalo que contenha o valor previsto da estimativa do percentual de falha na madeira é função dos valores assumidos para a quantidade de adesivo, pressão de colagem e densidade aparente.

4.3.1.3. Avaliação das melhores combinações para resorcinol

A NBR 7190/97 admite o uso de juntas coladas desde que a resistência das juntas seja, no mínimo, igual à resistência ao cisalhamento paralelo à grã da madeira sólida. A ASTM D-2559 estabelece como critérios de aceitação que, além da necessidade da resistência das juntas ser, no mínimo, igual à da madeira sólida, elas devem apresentar, em média, um percentual mínimo de 75% de falha na madeira. As duas normas referem-se aos valores de resistência para a umidade padrão de 12%.

O valor obtido para a resistência da madeira sólida, utilizado como referência para o julgamento das juntas, considerou o desempenho de 35 corpos de prova, ensaiados ao cisalhamento, pelos critérios da NBR 7190/97, apresentado no Quadro 3. Tal valor, corrigido para o teor de umidade de 12%, foi de 9,72 MPa para a resistência característica e de 11,18 MPa, para a média da resistência ao cisalhamento paralelo à grã da madeira.

Buscando atender tanto a NBR 7190/97 quanto a ASTM D-2559, estabeleceu-se, como critérios de aceitação de uma determinada combinação, que a resistência média das juntas fosse, no mínimo, igual à da madeira sólida, e que apresentasse, em média, um percentual mínimo de 75% de falha na madeira. Contudo, tais critérios foram atendidos por várias das combinações avaliadas.

A necessidade de selecionar uma única combinação considerou que, além de satisfazer aos critérios anteriormente impostos, fosse priorizada a estimativa máxima da resistência média ao cisalhamento, seguida da estimativa máxima do percentual de falha na madeira. Para se estabelecer os valores de pressão e quantidade de adesivo, deveriam ser considerados os valores estimados obtidos para as cinco classes de densidade, visto que, na prática, seria inviável utilizar, exclusivamente, madeira cuja densidade apresentasse um valor fixo.

Considerando a equação 5 e os valores apresentados no Quadro 5, os maiores valores da estimativa da resistência média ao cisalhamento das juntas foram obtidos para o nível de pressão de 1,3 MPa, independentemente das classes de densidade, com exceção do valor correspondente à classe de densidade cujo ponto central foi 0,55 g/m³.

Estabelecido o valor da pressão de colagem, buscou-se o conhecimento dos limites dos intervalos que, com probabilidade de 95%, contivessem o valor previsto da estimativa do percentual de falha na madeira, considerando os níveis das demais variáveis estudadas. Além disso, considerado o critério de seleção estipulado de buscar os maiores valores para a estimativa do percentual de falha na madeira, para cada intervalo calculou-se a probabilidade da estimativa da falha apresentar valor superior a 95%. Os resultados podem ser observados no Quadro 7.

Consideradas as classes de densidade 1, 2 e 3, a probabilidade do valor estimado do percentual de falha ser superior a 95% foi de, aproximadamente, 100%, independentemente da quantidade de adesivo.

Para a classe de densidade 4, a probabilidade do valor estimado do percentual de falha ser superior a 95% foi de, praticamente, 100% para as quantidades de adesivo de 250 e 300 g/m², e de 89%, para a quantidade de 200 g/m².

Com relação à classe de densidade 5, a probabilidade do valor estimado do percentual de falha ser superior a 95% foi de 93,87% para a quantidade de adesivo de 300 g/m²; 88,43 %, para a quantidade de 250 g/m² e, de apenas, 59,27%, para a quantidade de 200 g/m².

Quadro 7 – Intervalos de previsão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, utilizando resorcinol

Quantidade de adesivo (g/m ²)	Pressão (MPa)	Ponto central da classe de densidade (g/cm ³)	Intervalo de previsão		P (Y > 95) (%)
			Limite inferior (%)	Limite superior (%)	
200	1,3	0,55	93	108	99,99
200	1,3	0,65	92	106	99,92
200	1,3	0,75	91	105	98,95
200	1,3	0,85	89	104	88,61
200	1,3	0,95	88	103	59,27
250	1,3	0,55	94	109	100
250	1,3	0,65	93	107	100
250	1,3	0,75	92	106	100
250	1,3	0,85	91	105	99,93
250	1,3	0,95	89	103	88,43
300	1,3	0,55	95	110	100
300	1,3	0,65	94	108	100
300	1,3	0,75	93	107	99,99
300	1,3	0,85	91	106	99,68
300	1,3	0,95	90	105	93,87

Visando à obtenção de elevados valores do percentual de falha na madeira e o aspecto econômico, as combinações que utilizaram a quantidade de adesivo de 250 g/m² mostraram-se satisfatórias.

De acordo com as análises das estimativas médias da resistência e do percentual de falha na madeira das juntas coladas, a combinação que pareceu ser a mais adequada, para ser utilizada na construção dos pórticos em madeira laminada colada, empregando o adesivo resorcinol, foi a de quantidade de adesivo de 250 g/m² e pressão de colagem de 1,3 MPa; tal situação considerou o emprego de peças de distintas classes de densidade, com exceção daquelas pertencentes à classe de densidade 1.

Resultados similares foram obtidos em pesquisas anteriores. Couri Petruski (1999), estudando o comportamento da adesão de juntas coladas de *Eucalyptus citriodora*, utilizando adesivo resorcinol formaldeído, verificou que as estimativas da quantidade de adesivo para obtenção dos valores de resistências máximas variaram entre 270 e 300 g/m², sendo decrescentes com o aumento da pressão de colagem. As estimativas das resistências máximas indicaram valores superiores aos obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira sólida.

Petruski (2000), avaliando o desempenho de juntas coladas, utilizando madeira de *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen RS 216 M, obteve como estimativa da máxima resistência o valor de 15 MPa, associada a uma quantidade de adesivo de 263 g/m² e a uma pressão de colagem de 1,14 MPa.

4.3.2. Juntas coladas utilizando adesivo à base de óleo de mamona

4.3.2.1. Resistência das juntas coladas com óleo de mamona

De modo similar ao que ocorreu com a avaliação da resistência de juntas coladas com adesivo resorcinol formaldeído, a análise preliminar demonstrou haver uma variação entre as classes de densidade nas resistências obtidas, para um nível de 5% de probabilidade. Os efeitos principais estudados foram a proporção entre os componentes isocianato e polioliol, quantidade de adesivo, pressão de colagem e classe de densidade.

Buscou-se a geração de um modelo matemático que relacionasse o comportamento da variável dependente: resistência, com as variáveis independentes estudadas. Foi aplicado o teste t para testar a significância dos coeficientes da regressão.

Consideradas as variáveis estudadas e seus respectivos níveis, a estimativa da resistência ao cisalhamento das juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona poderia ser obtida a partir do seguinte modelo de regressão:

$$\hat{Y} = -19,85 - 12,05^* P + 46,32^* D - 27,69^* D^2 + 29,60^* PR - 16,41^* PR^2 + 10,61^* PR \times P$$

eq. 7

(R²= 0,38) para 1:1 ≤ PR ≤ 1:1,5; 0,9 ≤ P ≤ 1,3 MPa e 0,5 ≤ D ≤ 1 g/cm³

*: significativo pelo teste t (P < 0,05)

em que:

- PR = Proporção entre os componentes isocianato e polioliol, em massa;
- P = pressão de colagem, (MPa);
- D = densidade aparente (g/cm^3);
- \hat{Y} = estimativa da resistência das juntas (MPa).

Analogamente ao que ocorreu com as juntas coladas com resorcinol, a quantidade de adesivo não apresentou efeito significativo sobre a resistência das juntas, para os níveis avaliados.

De acordo com o coeficiente de determinação da equação 7, somente 38% da variação dos valores da resistência das juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona é explicada pelo modelo de regressão. O restante é atribuído à ausência de outras variáveis, erros de mensuração das variáveis e ao erro aleatório. Nesse sentido, o baixo poder de explicação obtido para a variável resposta poderia estar associado à complexidade do fenômeno físico-químico de adesão da madeira.

A equação 7 demonstrou que a resistência foi influenciada ($P < 0,05$) pela densidade. Do ponto de vista prático, no entanto, seria muito difícil adotar um valor fixo para a variável densidade, em função da variabilidade apresentada por essa característica física da madeira. Não sendo a densidade uma variável de controle, as equações de regressão seriam as apresentadas no Quadro 8, para cada classe de densidade, representadas por seus pontos centrais.

Independentemente da classe de densidade, os efeitos da proporção entre os componentes e da pressão de colagem sobre a resistência das juntas são os mesmos. Tais efeitos, no entanto, ocorrem em intervalos diferentes de resistência das juntas. Assim, poderiam ser utilizados valores diferentes de proporção e pressão para distintas classes de densidade, de modo a obter a mesma estimativa de resistência. Na prática, no entanto, tal estratégia não compensa. As determinações de proporção entre os componentes e a pressão de colagem foram adotadas como sendo as mesmas para todas as classes de densidade.

Para as distintas classes de densidade, considerados os níveis de pressão e proporção estudados, foram obtidas as equações e valores de resistências apresentados no Quadro 9, que permitem avaliar a interação entre as variáveis estudadas.

Quadro 8 – Equações de regressão da resistência das juntas coladas, por classe de densidade

Classe de densidade	Ponto central (g/cm ³)	Equações da resistência das juntas	
1	0,55	$\hat{Y} = -2,75 - 12,05P + 29,60PR - 16,41PR^2 + 10,61PR \times P$	
2	0,65	$\hat{Y} = -1,44 - 12,05P + 29,60PR - 16,41PR^2 + 10,61PR \times P$	
3	0,75	$\hat{Y} = -0,69 - 12,05P + 29,60PR - 16,41PR^2 + 10,61PR \times P$	
4	0,85	$\hat{Y} = -0,48 - 12,05P + 29,60PR - 16,41PR^2 + 10,61PR \times P$	
5	0,95	$\hat{Y} = -0,84 - 12,05P + 29,60PR - 16,41PR^2 + 10,61PR \times P$	

Quadro 9 – Equações de regressão da resistência das juntas coladas para as classes de densidade, por níveis de pressão de colagem e em função da proporção entre os componentes isocianato e polioliol

Pressão (MPa)	Equações de regressão	PR _{máx} (em massa)	Ponto central das classes de densidade (g/cm ³)				
			0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
0,9	$\hat{Y} = 39,149 - 32,82PR$	1:1,19	9,75	11,06	11,82	12,02	11,67
1,1	$\hat{Y} = 41,271 - 32,82PR$	1:1,26	9,94	11,25	12,01	12,21	11,86
1,3	$\hat{Y} = 43,393 - 32,82PR$	1:1,32	10,27	11,58	12,34	12,54	12,18

Considerados os níveis de pressão de 0,9; 1,1 e 1,3 MPa, as estimativas das proporções entre os componentes isocianato e polioliol, em massa, para obtenção das resistências máximas das juntas coladas foram, respectivamente, 1:1,19 ; 1:1,26 e 1:1,32. Os resultados obtidos permitem verificar que, para os níveis das variáveis estudadas, a proporção para a obtenção da resistência máxima aumentou com o incremento da pressão de colagem.

Utilizando-se as proporções que permitem obter as máximas resistências, de acordo com cada nível de pressão, verifica-se que, para todas as classes de densidade, as resistências foram crescentes com o incremento da pressão. Percebe-se, também, que para quaisquer níveis de pressão, o maior valor da resistência foi obtido para a classe de densidade 4, ou seja para $0,80 \leq D \leq 0,89 \text{ g/cm}^3$.

Consideradas as possíveis combinações entre os níveis das variáveis estudadas, verifica-se que, para a maioria das combinações, as estimativas da resistência indicaram valores superiores aos obtidos para a resistência média ao cisalhamento da madeira sólida, de 11,18 MPa.

4.3.2.2. Falha na madeira em juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona

Utilizando a análise de regressão das médias dos valores obtidos, gerou-se um modelo matemático, objetivando a relação do comportamento da variável dependente: falha na madeira, com as variáveis independentes estudadas. Aplicou-se o teste t para avaliação da significância dos coeficientes da regressão. A estimativa da falha na madeira das juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona, consideradas as variáveis estudadas e seus respectivos níveis, poderia ser obtida a partir do seguinte modelo de regressão:

$$\hat{Y} = 11,379 + 0,111^* Q - 283,922^* D + 153,469^* D^2 + 284,958^* PR - 118,498^* PR^2 \quad \text{eq. 8}$$

($R^2 = 0,31$) para $1:1 \leq PR \leq 1:1,5$; $200 \leq Q \leq 300 \text{ g/m}^2$ e $0,5 \leq D \leq 1 \text{ g/cm}^3$

*: significativo pelo teste t ($P < 0,05$)

em que:

- PR = proporção entre os componentes isocianato e poliols, em massa;
- Q = quantidade de adesivo, (g/m^2);
- D = densidade aparente (g/cm^3);
- \hat{Y} = estimativa do percentual de falha na madeira das juntas (%).

A pressão de colagem não apresentou efeito significativo sobre a estimativa da falha na madeira das juntas coladas, para os níveis avaliados. Como a densidade não foi considerada uma variável de controle, as equações de regressão do percentual de falha na madeira das juntas, para cada uma das classes de densidade, representadas por seus pontos centrais, são apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10 – Equações de regressão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, por classe de densidade

Classe de densidade	Ponto central (g/cm ³)	Equações do percentual de falha na madeira das juntas
1	0,55	$\hat{Y} = -98,36 + 0,111Q + 284,958PR - 118,498PR^2$
2	0,65	$\hat{Y} = -108,33 + 0,111Q + 284,958PR - 118,498PR^2$
3	0,75	$\hat{Y} = -115,24 + 0,111Q + 284,958PR - 118,498PR^2$
4	0,85	$\hat{Y} = -119,07 + 0,111Q + 284,958PR - 118,498PR^2$
5	0,95	$\hat{Y} = -119,84 + 0,111Q + 284,958PR - 118,498PR^2$

Analogamente ao que ocorreu em relação à estimativa da resistência, independentemente da classe de densidade, os efeitos da proporção entre componentes e da quantidade de adesivo sobre o percentual de falha na madeira das juntas são os mesmos. Tais efeitos apenas ocorrem em intervalos distintos do percentual de falha. Embora o interesse em obter elevadas estimativas de percentual de falha na madeira, para a construção dos pórticos as determinações de proporção entre os componentes e quantidade de adesivo foram as mesmas para todas as classes de densidade.

4.3.2.3. Avaliação das melhores combinações para adesivo à base de óleo de mamona

De modo similar à avaliação das melhores combinações para resorcinol, , estabeleceu-se, como critérios de aceitação de uma combinação, que a resistência média das juntas fosse, no mínimo, igual à resistência média ao cisalhamento paralelo à grã da madeira sólida, e que apresentasse, em média, um percentual mínimo de 75% de falha

na madeira. Para auxiliar a investigação das combinações que atenderiam ao critério estabelecido para a resistência, que deveria apresentar como limite inferior o valor de 11,18 MPa, foram traçadas curvas, utilizando a equação de regressão 7, ilustradas nas Figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

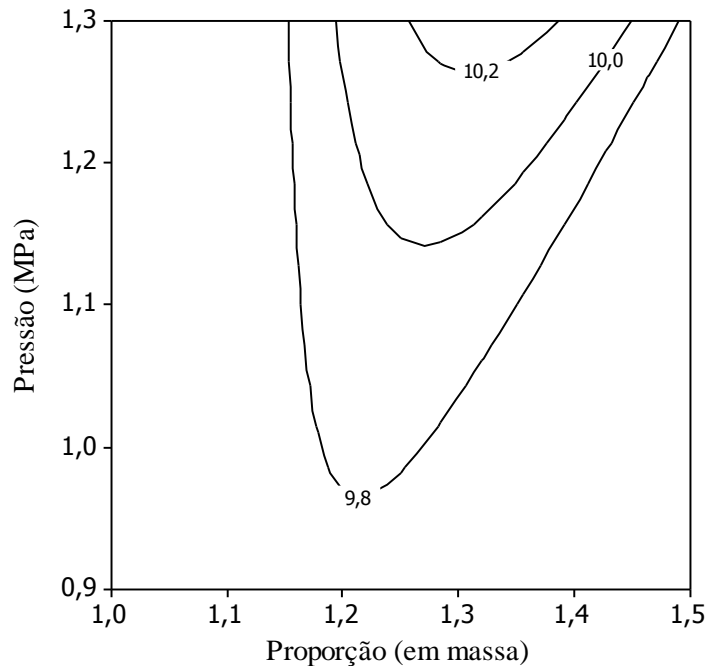


Figura 21 – Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de 0,55 g/cm³.

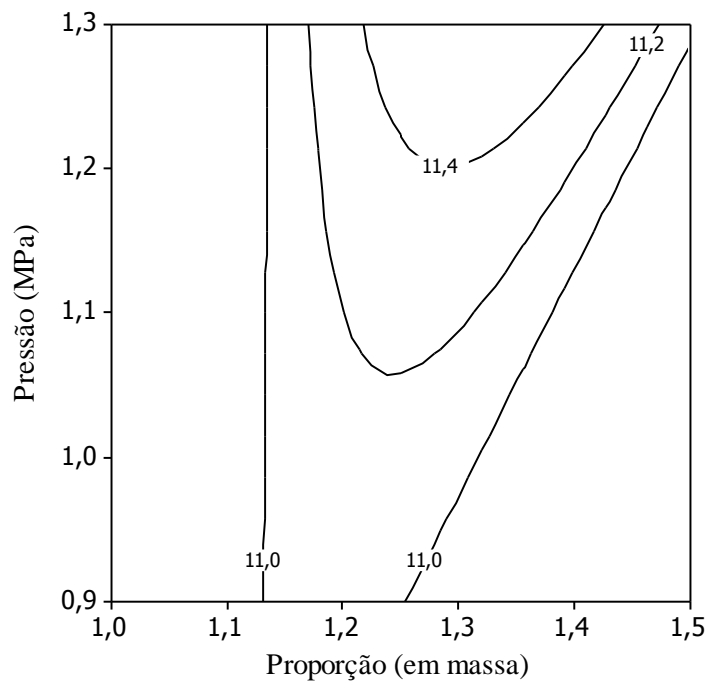


Figura 22 – Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de 0,65 g/cm³.

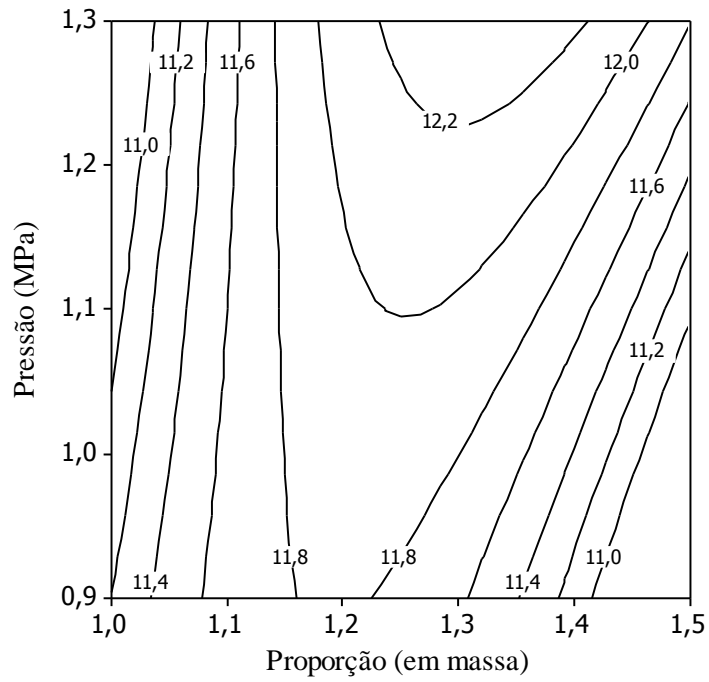


Figura 23 – Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de 0,75 g/cm³.

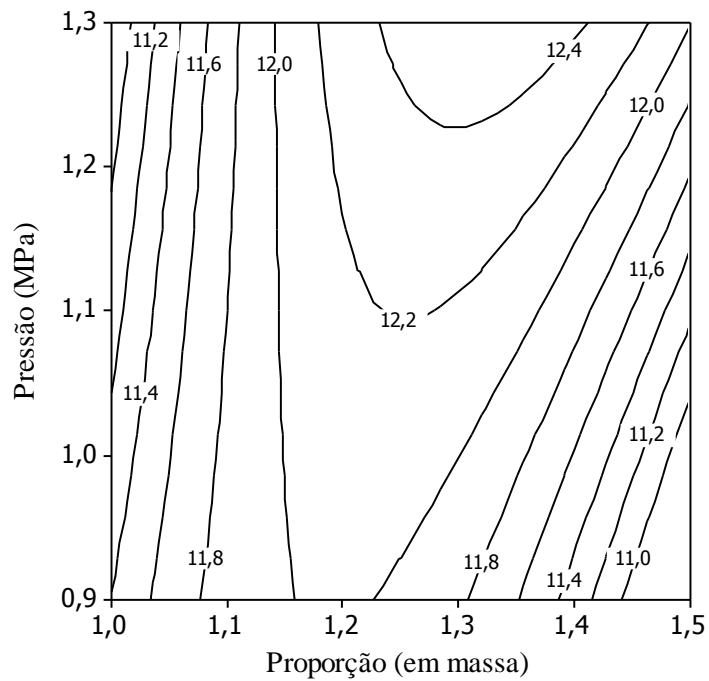


Figura 24 – Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de 0,85 g/cm³.

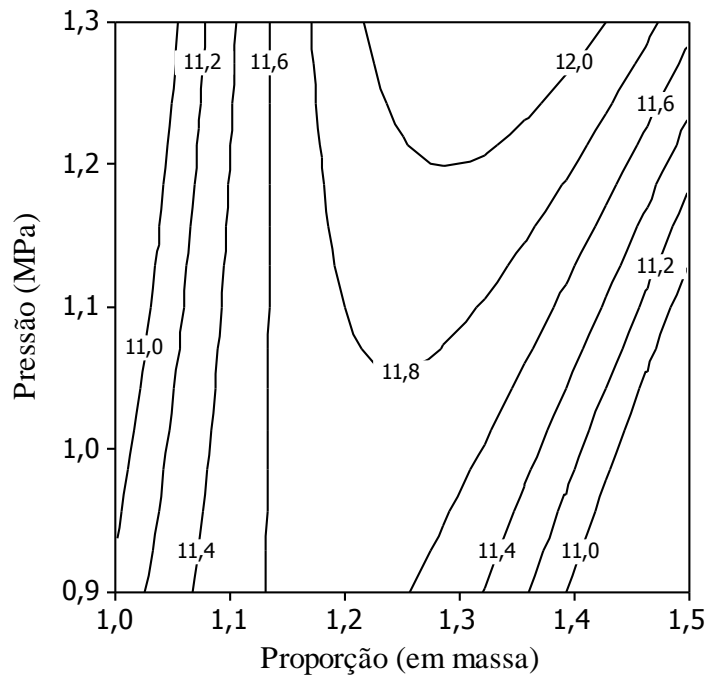


Figura 25 – Estimativa da resistência das juntas coladas, em função da proporção e pressão de colagem, para a densidade de $0,95 \text{ g/cm}^3$.

Para a classe de densidade 1, cujo ponto central é de $0,55 \text{ g/cm}^3$, independentemente da combinação de valores da proporção entre componentes e pressão de colagem, para os níveis estudados, as estimativas de resistência das juntas foram inferiores ao valor de 11,18 MPa.

Várias combinações atenderiam ao critério de resistência. De modo geral, independentemente da classe de densidade considerada, representada pelo valor de seu ponto central, fixado um valor para a proporção, os valores das estimativas de resistência aumentaram com o incremento da pressão de colagem. Confirmando os valores apresentados no Quadro 9, os maiores valores das estimativas de resistência foram obtidos para a proporção entre componentes de 1,32 e pressão de colagem de 1,3 MPa. Essa proporção entre os componentes assemelha-se ao valor obtido por Favaro (2004), pesquisando o adesivo de poliuretana, derivado do óleo de mamona, para utilização em metais. O autor obteve resultados que mostraram que o adesivo preparado na proporção de 1:1,4 de pré-polímero e polioliol foi o que apresentou melhor desempenho nas colagens.

Para as distintas classes de densidade, representadas por seus pontos centrais, foram traçadas as curvas da estimativa do percentual de falha na madeira, utilizando a Equação 8 de regressão. Considerando que o percentual de falha estimado deveria

apresentar, como limite inferior, o valor de 75%, foram traçadas isolinhas a partir do valor de 70%, com incremento de 5%. Tais curvas são apresentadas nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30.

Com relação ao percentual de falha, verificou-se que, para um determinado par de valores de proporção e quantidade de adesivo, quanto menor o valor do ponto central da classe de densidade maior a estimativa do percentual de falha na madeira. Independentemente da classe de densidade, fixado um valor para a proporção, quanto maior a quantidade de adesivo, maior o percentual de falha na madeira. Desse modo, os maiores valores do percentual de falha foram obtidos para combinações que utilizaram quantidade de adesivo de 300 g/m^2 . Ressalta-se que várias combinações satisfariam o critério estabelecido para o percentual mínimo de falha na madeira.

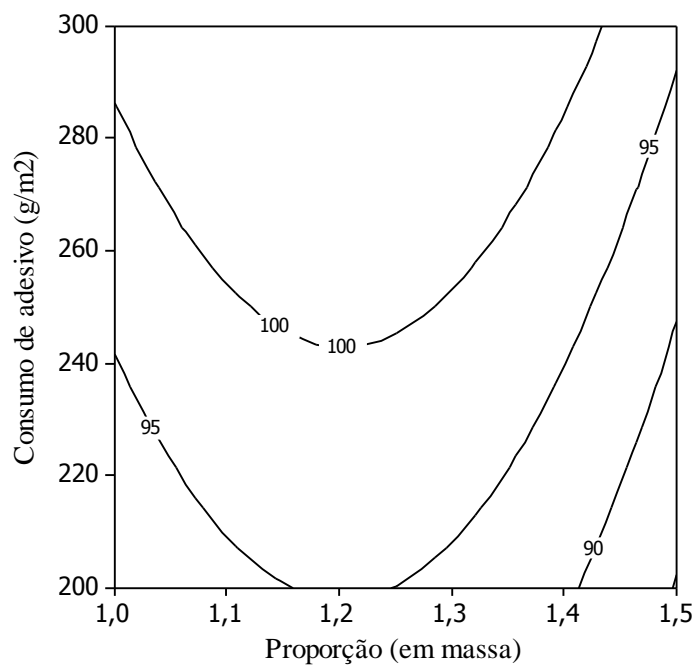


Figura 26 – Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$.

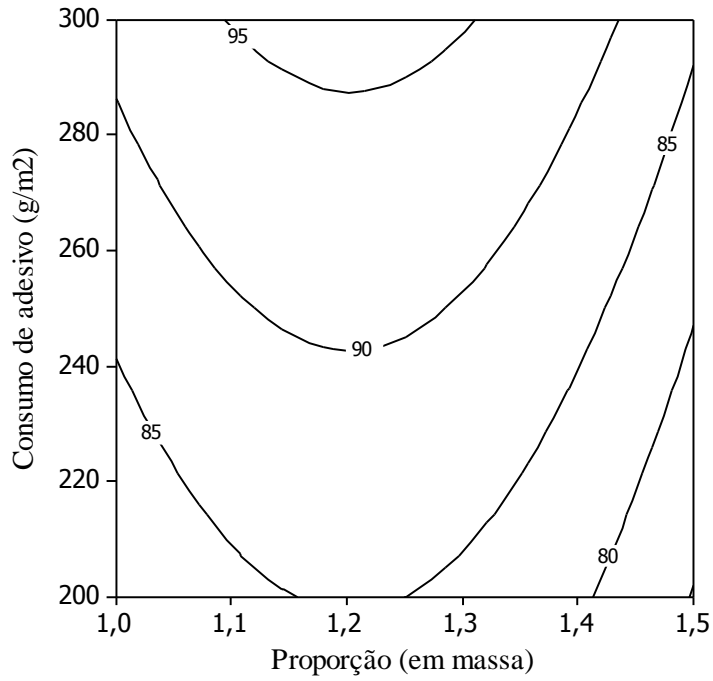


Figura 27 – Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$.

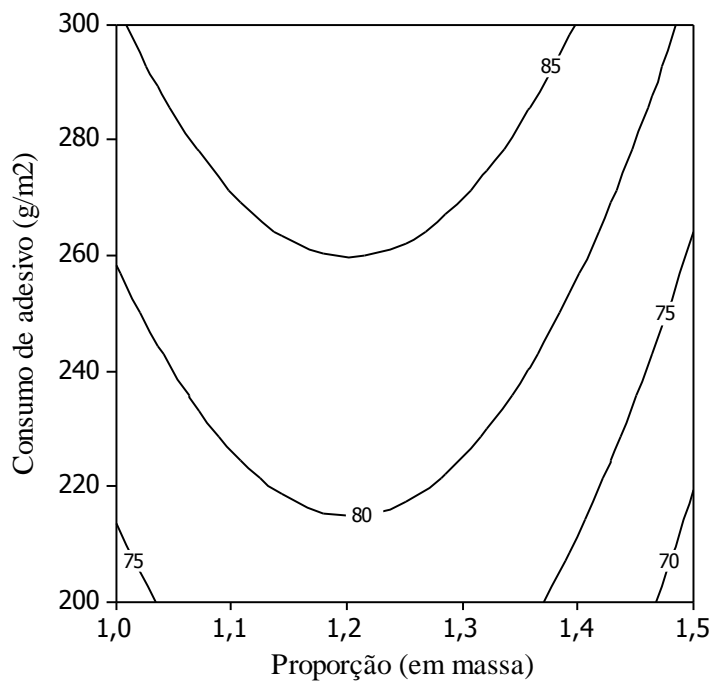


Figura 28 – Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,75 \text{ g/cm}^3$.

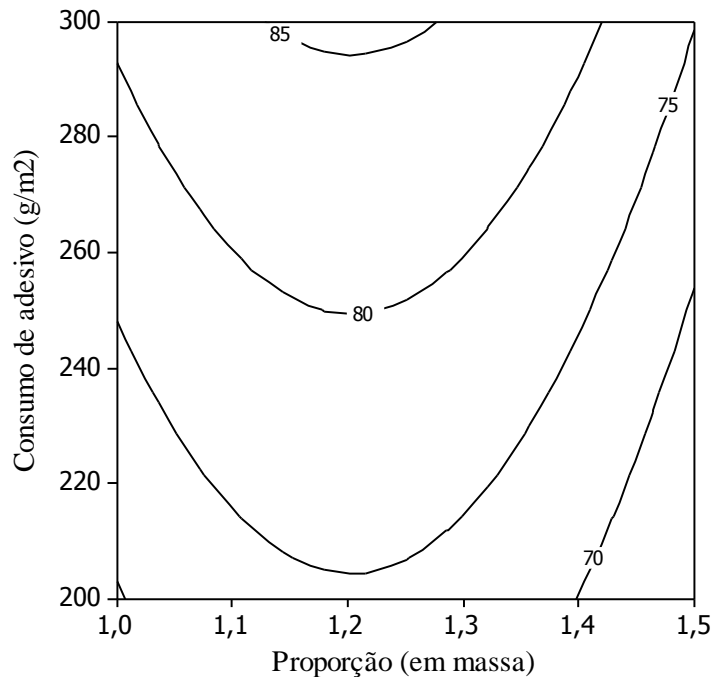


Figura 29 – Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,85 \text{ g/cm}^3$.

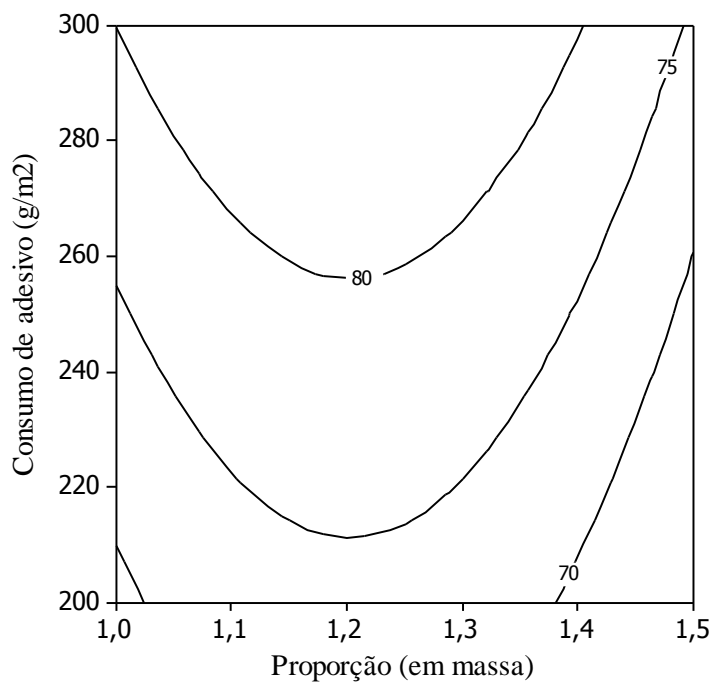


Figura 30 – Estimativa do percentual de falha na madeira das juntas coladas, em função da proporção e quantidade de adesivo, para a densidade de $0,95 \text{ g/cm}^3$.

Para a escolha de uma das combinações propostas foi conduzido o mesmo procedimento adotado para a avaliação da melhor combinação, utilizando o adesivo resorcinol, ou seja, priorizou-se a estimativa máxima da resistência média ao cisalhamento, seguida da estimativa máxima do percentual de falha na madeira. Para o estabelecimento dos valores de proporção, pressão e quantidade de adesivo, foram considerados os valores estimados obtidos para as cinco classes de densidade.

Foram obtidas as estimativas de intervalos, com nível de confiança de 95% para os valores previstos da resistência média ao cisalhamento e do percentual de falha na madeira, apresentados, respectivamente, nos Quadros 11 e 12.

Objetivando obter elevados valores para a resistência média ao cisalhamento, os intervalos de previsão foram estimados considerando a proporção entre os componentes de 1,32 e pressão de colagem, de 1,3 MPa.

Quadro 11 – Intervalos de previsão da resistência ao cisalhamento das juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona

Proporção (em massa)	Pressão (MPa)	Ponto central da classe de densidade (g/cm ³)	Estimativa da resistência (MPa)	Intervalo de previsão		P (Y<11,18) (%)
				Limite inferior (MPa)	Limite superior (MPa)	
1,32	1,3	0,55	10,27	7,44	13,10	99,37
1,32	1,3	0,65	11,58	8,80	14,36	8,38
1,32	1,3	0,75	12,34	9,55	15,12	0,00
1,32	1,3	0,85	12,54	9,75	15,32	0,00
1,32	1,3	0,95	12,18	9,27	15,10	3,03

De acordo com os valores apresentados no Quadro 11, as estimativas da resistência foram superiores ao valor limite de 11,18 MPa, exceto para a classe de densidade 1, cujo ponto central é de 0,55 g/cm³. A probabilidade que o valor previsto fosse menor que 11,18 MPa foi nula para as classes de densidade 3 e 4; de 3,03 %, para a classe de densidade 5; de 8,38 %, para a classe de densidade 2, e de 99,37 %, para a classe de densidade 1. Desse modo, considerados as variáveis estudadas e seus respectivos níveis, não se recomenda o emprego de peças de madeira pertencentes à

classe de densidade 1 para a confecção de pórticos colados utilizando adesivo de óleo de mamona.

A grande variação dos valores, em relação à estimativa, sugere que existem possibilidades de ocorrer melhorias na resistência, uma vez que a mesma pode atingir o valor máximo do intervalo de previsão.

As estimativas de intervalos indicaram que, para a proporção de 1,32 e consideradas as distintas classes de densidade, os maiores valores previstos para o percentual de falha na madeira ocorreram para a quantidade de adesivo de 300 g/m², a qual também se associou as maiores probabilidades de que as estimativas do percentual de falha fossem superiores a 75%.

Quadro 12 – Intervalos de previsão do percentual de falha na madeira das juntas coladas, utilizando óleo de mamona

Proporção (em massa)	Quantidade de adesivo (g/m ²)	Ponto central da classe de densidade (g/cm ³)	Estimativa do percentual de falha (%)	Intervalo de previsão		P (Y > 75) (%)
				Limite inferior	Limite superior	
1,32	200	0,55	93,52	61,43	125,61	89,48
1,32	200	0,65	83,54	52,21	114,87	92,37
1,32	200	0,75	76,64	45,29	107,99	100
1,32	200	0,85	72,80	41,48	104,12	100
1,32	200	0,95	72,03	40,67	103,40	100
1,32	250	0,55	99,07	67,88	130,26	100
1,32	250	0,65	89,09	57,94	120,25	100
1,32	250	0,75	82,19	51,00	113,37	99,61
1,32	250	0,85	78,35	47,17	109,53	89,48
1,32	250	0,95	77,58	46,15	109,01	77,95
1,32	300	0,55	104,62	72,79	136,45	100
1,32	300	0,65	94,64	63,32	125,97	100
1,32	300	0,75	87,74	56,38	119,10	100
1,32	300	0,85	83,90	52,55	115,25	99,77
1,32	300	0,95	83,13	50,22	116,04	91,39

De acordo com as estimativas médias da resistência e do percentual de falha na madeira das juntas coladas, a combinação que demonstrou ser a mais adequada para ser utilizada na construção dos pórticos em madeira laminada colada, empregando o adesivo à base de óleo de mamona, foi a de proporção entre componentes de 1,32; quantidade de adesivo de 300 g/m² e pressão de colagem de 1,3 MPa, considerada a possibilidade de emprego de peças, pertencentes às distintas classes de densidade, com exceção daquelas pertencentes à classe de densidade 1.

4.4. Validade do modelo de Hankinson para análise de juntas coladas

4.4.1. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído

Os valores médios para a resistência ao cisalhamento na compressão das juntas, coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, estão apresentados no Quadro 13. Foram feitas determinações do teor de umidade de todos os corpos de prova, rompidos ao cisalhamento na compressão. O valor obtido para o teor de umidade médio foi de 11,23% com desvio-padrão de 0,71. Os resultados apresentados no Quadro 13 estão corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Quadro 13 – Desempenho ao cisalhamento das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo resorcinol formaldeído

Ângulo (graus)	Resistência (MPa)		Densidade (g/cm ³)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
0	14,84	1,40	0,81	0,05
15	12,72	1,50	0,83	0,06
30	11,05	1,93	0,80	0,05
45	8,37	0,98	0,81	0,07
60	7,48	1,29	0,83	0,05
75	6,88	1,50	0,80	0,07
90	6,15	0,83	0,81	0,06

Observa-se que as resistências médias decresceram com o aumento do ângulo de colagem entre as fibras da madeira. Para todos os ângulos de colagem, a distribuição de densidade das peças de madeira foi tal que conduziu, aproximadamente, ao valor de $0,81 \text{ g/cm}^3$.

Para testar a validade do modelo de Hankinson, como estimador da resistência das juntas coladas sob diferentes ângulos, utilizaram-se os valores das resistências características para os ângulos de 0° e 90° , como dados de entrada, no modelo indicado a seguir:

$$f_{v\alpha,k} = \frac{f_{v0,k} \times f_{v90,k}}{f_{v0,k} \times \text{sen}^2 \alpha + f_{v90,k} \times \text{cos}^2 \alpha} \quad \text{eq. 9}$$

em que:

- $f_{v\alpha,k}$ = estimativa da resistência característica ao cisalhamento das juntas coladas, com ângulo α entre as fibras, dada pelo modelo de Hankinson;
- $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento das juntas coladas paralelamente às fibras ($\alpha = 0^\circ$);
- $f_{v90,k}$ = resistência característica ao cisalhamento das juntas coladas normalmente às fibras ($\alpha = 90^\circ$);
- α = ângulo entre a direção das fibras das juntas coladas.

Os valores das resistências características para as juntas coladas a 0° e a 90° entre as fibras foram de 13,72 MPa e 5,65 MPa, respectivamente, já corrigidos para o teor de umidade de 12%.

A representação gráfica do modelo é apresentada na Figura 31, juntamente com os resultados médios de resistência, obtidos experimentalmente.

Note-se que as curvas plotadas na Figura 31 apresentam a mesma tendência. Comparado aos resultados experimentais, o uso do modelo de Hankinson conduz a estimativas ligeiramente menores para a resistência das juntas. Portanto, na predição da resistência, a adoção deste modelo é a favor da segurança.

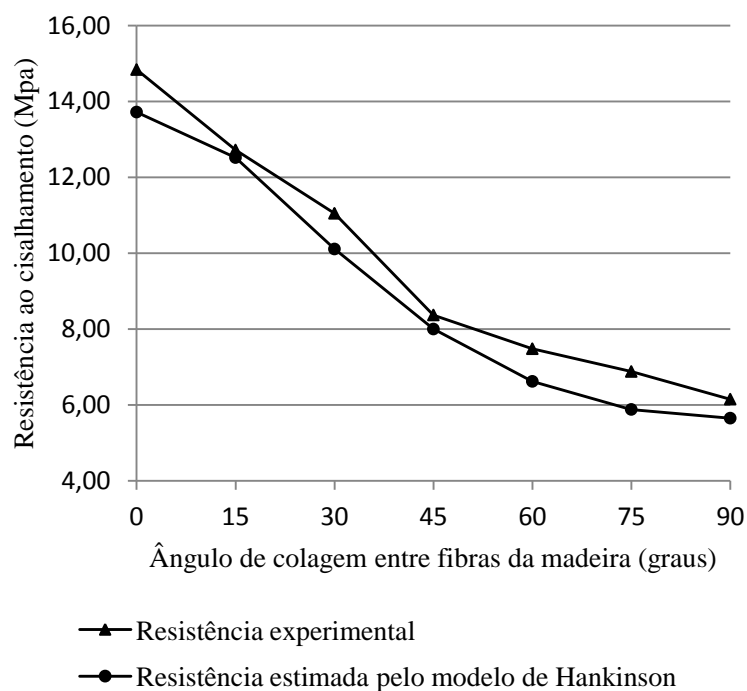


Figura 31 – Representação gráfica dos resultados experimentais e do modelo de Hankinson como estimador das resistências de juntas coladas sob diferentes ângulos.

Tendo em vista os resultados obtidos, verificou-se que é possível usar o modelo de Hankinson como estimador da resistência de juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira, usando a madeira de *Eucalyptus sp.* como substrato e adesivo resorcinol formaldeído.

4.4.2. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona

O Quadro 14 apresenta os valores médios para a resistência ao cisalhamento na compressão das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras. As determinações do teor de umidade de todos os corpos de prova, rompidos ao cisalhamento na compressão, permitiram a obtenção do valor médio de 11,04%, com desvio-padrão de 0,48. Os resultados apresentados no Quadro 14 estão corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Observa-se que a distribuição de densidade das peças de madeira conduziu a valores próximos de $0,80 \text{ g/cm}^3$ para todos os ângulos de colagem. As resistências médias decresceram com o aumento do ângulo de colagem entre as fibras da madeira.

Quadro 14 – Desempenho ao cisalhamento das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo à base de óleo de mamona

Ângulo (graus)	Resistência (MPa)		Densidade (g/cm ³)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
0	13,05	1,22	0,80	0,03
15	12,27	1,94	0,80	0,03
30	9,44	1,75	0,80	0,05
45	7,74	1,68	0,82	0,06
60	6,28	1,66	0,81	0,05
75	5,98	1,16	0,79	0,03
90	5,66	0,77	0,81	0,05

Objetivando o uso do modelo de Hankinson, calcularam-se as resistências características, de acordo com o que prescreve a norma NBR 7190/97. Os valores das resistências características obtidas para juntas coladas a 0° e a 90° entre as fibras foram de 12,19 MPa e 4,97 MPa, respectivamente, já corrigidos para o teor de umidade de 12%. De acordo com os resultados, o modelo de Hankinson foi utilizado conforme a seguinte equação:

$$f_{v\alpha,k} = \frac{f_{v0,k} \times f_{v90,k}}{f_{v0,k} \times \text{sen}^2 \alpha + f_{v90,k} \times \text{cos}^2 \alpha} = \frac{12,19 \times 4,97}{12,19 \times \text{sen}^2 \alpha + 4,97 \times \text{cos}^2 \alpha} \quad \text{eq. 10}$$

A representação gráfica da equação 10 é apresentada na Figura 32 juntamente com os valores observados no experimento. Pode-se observar que as resistências médias experimentais e as resistências estimadas pelo modelo de Hankinson apresentaram tendências similares, em função do ângulo de colagem entre as fibras da madeira.

As resistências experimentais foram ligeiramente superiores às estimadas pelo modelo. Considerando os valores estimados pelo modelo de Hankinson, adotados em projeto para as chamadas resistências características, o dimensionamento e/ou a verificação de estruturas de madeira seriam conduzidos utilizando valores de resistência inferiores aos resultados experimentais. Como os projetos são sempre realizados sob condições de incertezas, tanto pelas ações, quanto pela resistência, as estruturas sempre são projetadas para resistir a ações maiores do que aquelas realmente esperadas. Assim

sendo, a segurança estrutural é entendida como o processo de majorar as ações e reduzir as resistências, com a tentativa de evitar que a estrutura atinja seus estados limites, últimos ou de serviço, durante a sua vida útil.

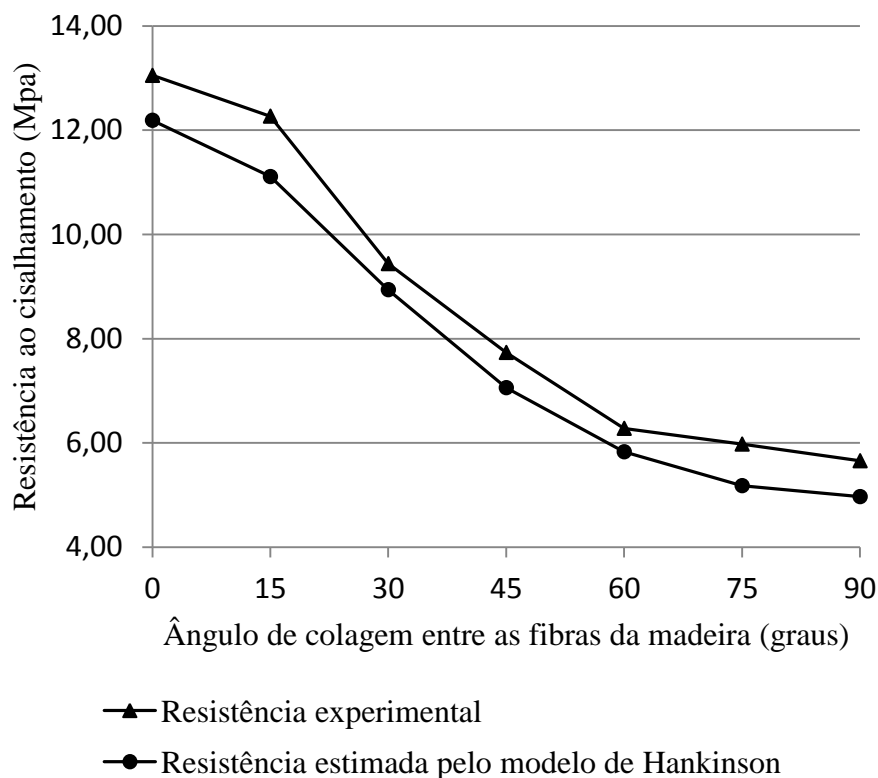


Figura 32 – Representação gráfica do modelo de Hankinson e dos resultados experimentais de juntas coladas sob diferentes ângulos.

Tendo em vista os resultados obtidos, concluiu-se pela validade do modelo de Hankinson na predição da resistência de juntas coladas, usando madeira de *Eucalyptus sp.* como substrato e adesivo à base de óleo de mamona.

Outros pesquisadores obtiveram resultados similares. De Paula (1983) atestou a validade do modelo de Hankinson na avaliação da resistência de juntas coladas, usando peroba rosa como substrato. Mantilla Carrasco (1986) também sugeriu o uso de tal modelo para estimativa da resistência das juntas coladas sob diferentes ângulos, propondo uma modificação nos coeficientes dos seno e coseno da expressão.

Petrauski (2000) conduziu experimento para testar a validade do modelo de Hankinson como estimador da resistência de juntas de madeira de *Eucalyptus grandis*, coladas com resorcinol formaldeído. Foram feitas juntas coladas com ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90° entre as fibras das partes envolvidas. Submetidas à ruptura

por cisalhamento na compressão, com corpos de prova e metodologia da ASTM D 905 (1994), os resultados foram utilizados para testar o modelo, tendo-se concluído pela sua validade.

Serrano (2009) estudou a resistência ao cisalhamento no plano de cola, segundo seu ângulo de inclinação em relação às fibras, desde 0 até 90° nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Os corpos de prova foram colados com os adesivos ADESPEC e CASCOREZ. Independentemente da madeira e do adesivo utilizados, os valores experimentais demonstraram que a resistência ao cisalhamento, no plano de cola, decresceu com seu ângulo de inclinação em relação à orientação das fibras. Os resultados de resistência ao cisalhamento, em função do ângulo, apresentaram tendência similar à curva oriunda do emprego do modelo de Hankinson como preditor dessa resistência.

4.5. Resistência ao cisalhamento na torção para diferentes ângulos de colagem entre fibras da madeira

As juntas foram confeccionadas a partir de dois tipos básicos de tábuas, coladas com ângulos de 0° a 90° entre as fibras da madeira, conforme Figura 33. Observa-se que, de cada tábua colada sobre outra foi possível gerar dois corpos de prova; um a ser ensaiado ao cisalhamento na compressão e outro, ao cisalhamento na torção. Os formatos dos corpos de prova podem ser observados na Figura 34.

O aparato desenvolvido para o teste da resistência ao cisalhamento na torção é composto por duas partes simétricas, unidas pelo corpo de prova, e que simula uma viga “biapoiada” carregada, simetricamente, em dois pontos. O aparato dispõe de um conjunto de parafusos para o ajuste do corpo de prova, na parte central.

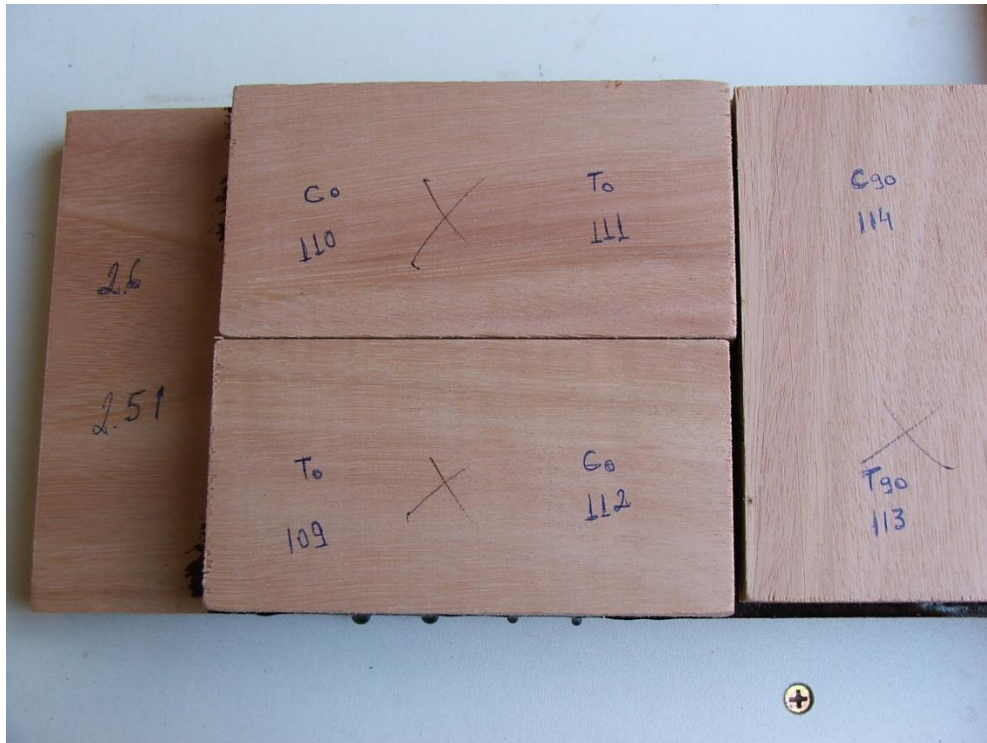


Figura 33 – Juntas coladas para obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados ao cisalhamento.



Figura 34 – Corpos de prova a serem ensaiados ao cisalhamento na compressão e na torção.

4.5.1. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído

Os valores médios para a resistência à torção das juntas, coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, estão apresentados no Quadro 15. Foram feitas determinações do teor de umidade de todos os corpos de prova rompidos, com o valor médio de 11,23% e desvio-padrão de 0,74%. Os valores apresentados no Quadro 15 estão corrigidos para o teor de umidade de 12%. Observa-se que, com o aumento do ângulo de colagem entre as fibras da madeira, as resistências médias apresentaram valores crescentes para ângulos variando de 0° a, aproximadamente, 30° e, na sequência, valores decrescentes.

Considerados os resultados experimentais, a resistência obtida para o ângulo de 90° correspondeu a 97% do valor da resistência para o ângulo de 0°. Isso indica uma tendência de comportamento da resistência à torção distinta daquela associada à resistência ao cisalhamento, obtida para o esforço normal de compressão.

Os valores das resistências características para as juntas coladas a 0° e a 90° entre as fibras foram 9 MPa e 10,06 MPa, respectivamente, já corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Quadro 15 – Desempenho à torção das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo resorcinol formaldeído

Ângulo (graus)	Resistência (MPa)		Densidade (g/cm ³)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
0	10,43	1,41	0,81	0,05
15	10,85	1,57	0,82	0,06
30	11,33	1,96	0,81	0,06
45	11,09	1,34	0,80	0,06
60	10,58	1,51	0,82	0,06
75	10,77	1,00	0,81	0,07
90	10,13	0,60	0,80	0,05

Realizou-se a análise de regressão, considerando a resistência ao cisalhamento à compressão como uma variável preditora da resistência ao cisalhamento na torção. A equação ajustada é apresentada a seguir:

$$f_{torçã,\alpha} = 5,582 + 1,068^* \times f_{v\alpha,média} - 0,05025^* \times (f_{v\alpha,média})^2 \quad \text{eq. 11}$$

($R^2 = 0,85$)

*: significativo pelo teste t ($P < 0,05$)

em que:

- $f_{torçã,\alpha}$ = estimativa da resistência ao cisalhamento na torção, das juntas coladas com ângulo α entre as fibras da madeira, (MPa);
- $f_{v\alpha,média}$ = resistência média ao cisalhamento na compressão, das juntas coladas, com ângulo α entre as fibras da madeira, (MPa).

De acordo com o coeficiente de determinação, 85% da variação observada na estimativa da resistência à torção das juntas coladas são explicadas por sua relação quadrática com os valores observados da resistência média ao cisalhamento das juntas coladas com ângulo α entre as fibras da madeira. A representação gráfica do modelo de regressão é apresentada na Figura 35, juntamente com os valores médios das resistências ao cisalhamento e à torção, obtidos experimentalmente.

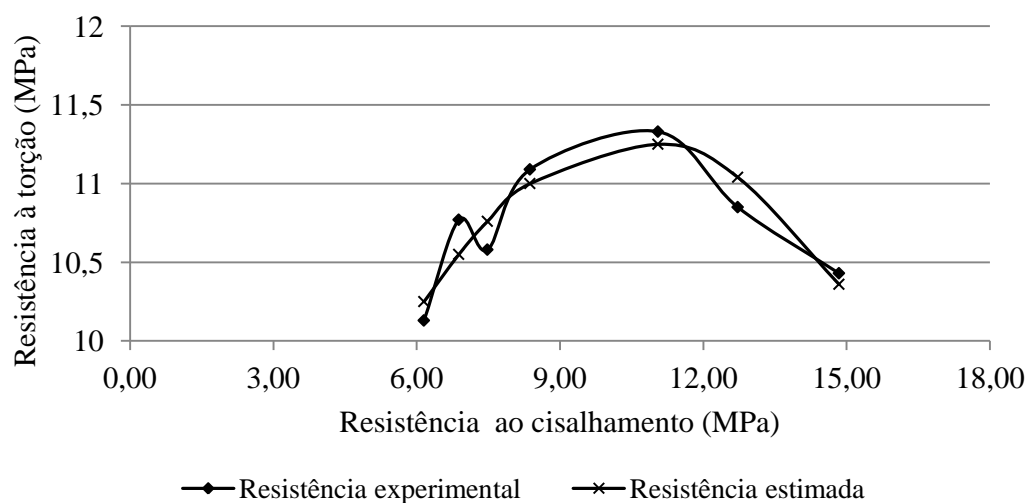


Figura 35 – Representação gráfica do modelo de regressão para estimar a resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com resorcinol formaldeído.

Com o propósito de verificar a precisão do modelo, encontrado por meio da regressão, utilizou-se o polinômio para executar a previsão da resistência à torção, comparando, em seguida, com a resistência obtida experimentalmente. A comparação entre os valores previstos e os valores experimentais pode ser observada na Figura 36.

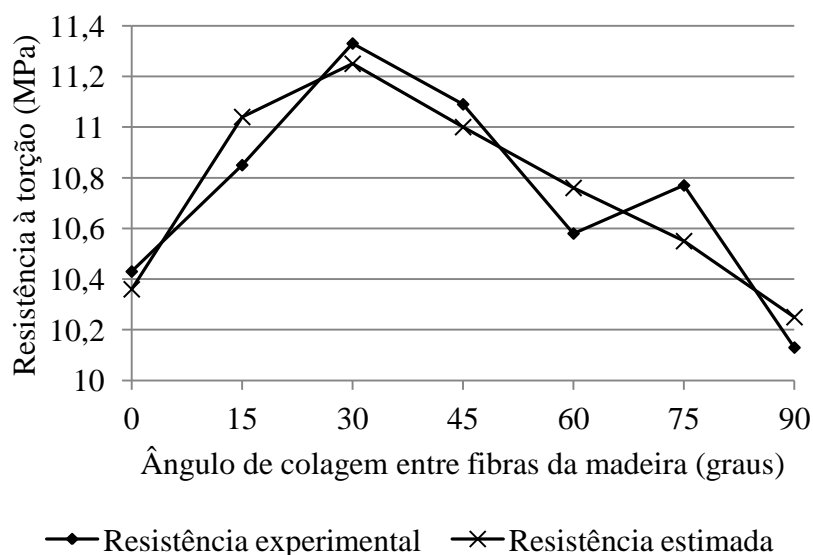


Figura 36 – Valores experimentais e estimados da resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com adesivo resorcinol formaldeído.

De modo geral, o uso do modelo de regressão conduziu a estimativas ligeiramente menores para a resistência à torção das juntas. Portanto, na predição da resistência, a adoção deste modelo é a favor da segurança.

4.5.2. Ensaio de juntas coladas, utilizando adesivo à base de óleo de mamona

O Quadro 16 apresenta os valores médios para a resistência à torção das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras. As determinações do teor de umidade de todos os corpos de prova rompidos permitiram a obtenção do valor médio de 11,13%, com desvio-padrão de 1,22. Os valores apresentados no Quadro 16 estão corrigidos para o teor de umidade de 12%.

De modo similar ao que ocorreu com os resultados obtidos para a resistência à torção de juntas coladas com o adesivo resorcinol formaldeído, percebeu-se que, dentro do intervalo de valores estudados, a resistência à torção apresentou um valor máximo que se encontrava associado a um ângulo de colagem de 30°, aproximadamente.

A resistência obtida para o ângulo de 90° correspondeu a 84% do valor da resistência para o ângulo de 0°.

Quadro 16 – Desempenho à torção das juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras, utilizando adesivo à base de óleo de mamona

Ângulo (graus)	Resistência (MPa)		Densidade (g/cm ³)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
0	9,77	1,45	0,79	0,04
15	10,22	0,84	0,78	0,04
30	10,32	1,71	0,80	0,03
45	10,27	1,29	0,82	0,07
60	8,82	1,33	0,80	0,03
75	8,81	1,13	0,79	0,03
90	8,20	1,06	0,81	0,04

Os resultados experimentais confirmam a distinção de comportamento entre a resistência à torção e a resistência ao cisalhamento.

Os valores das resistências características para as juntas coladas a 0° e a 90° entre as fibras foram 8,29 MPa e 7,49 MPa, respectivamente, já corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Foi conduzida a análise de regressão, buscando descrever o comportamento da variável resistência à torção, em função da variável de referência, resistência ao cisalhamento na compressão. A relação obtida pode ser verificada no seguinte modelo matemático:

$$f_{torção,\alpha} = -0,889 + 2,256^* \times f_{va,média} - 0,1104^* \times (f_{va,média})^2 \quad \text{eq. 12}$$

(R² = 0,95)

* : significativo pelo teste t (P < 0,05)

em que:

- $f_{torção,\alpha}$ = estimativa da resistência ao cisalhamento na torção, das juntas coladas com ângulo α entre as fibras da madeira, (MPa);

- $f_{va,média}$ = resistência média ao cisalhamento na compressão, das juntas coladas com ângulo α entre as fibras da madeira, (MPa).

O valor do coeficiente de determinação indicou que 95% da variância da variável resposta, resistência à torção das juntas coladas, foi explicada pela variância da variável explicativa, resistência média ao cisalhamento das juntas coladas.

Os valores médios das resistências ao cisalhamento e à torção, obtidos experimentalmente, e a curva da resistência estimada, polinômio de segunda ordem, obtido da regressão, podem ser observados na Figura 37.

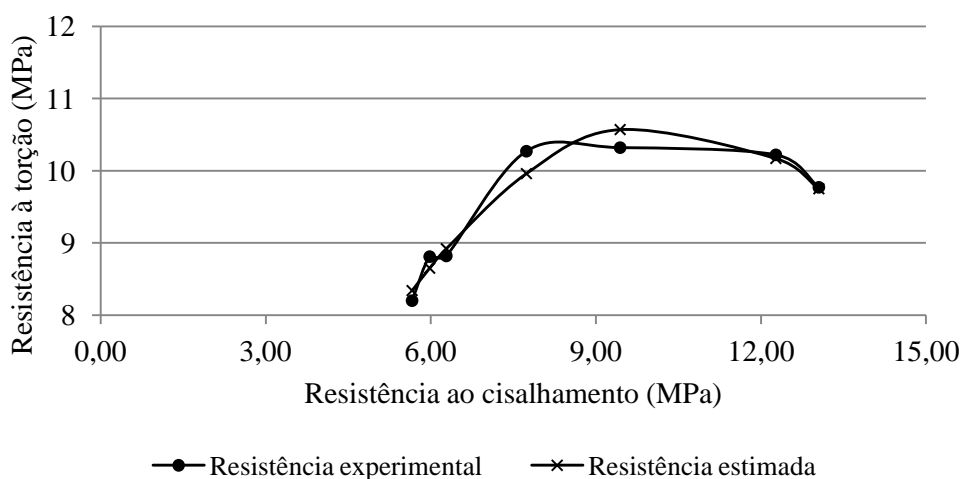


Figura 37 – Representação gráfica do modelo de regressão para estimar a resistência à torção de juntas coladas, com adesivo à base de óleo de mamona.

Visando auxiliar a comparação entre os valores de resistência, obtidos experimentalmente, e os calculados, utilizando a equação de regressão, foram plotadas as curvas correspondentes, conforme a Figura 38. As pequenas diferenças entre as médias dos valores experimentais e previstos mostram que o modelo foi capaz de prever, com boa precisão, os valores experimentais.

De acordo com os resultados obtidos, considerados os experimentos com os adesivos resorcinol formaldeído e derivado de óleo de mamona, a utilização do aparato de teste e metodologia proposta para a obtenção da resistência à torção de juntas, coladas sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira demonstrou-se satisfatória.

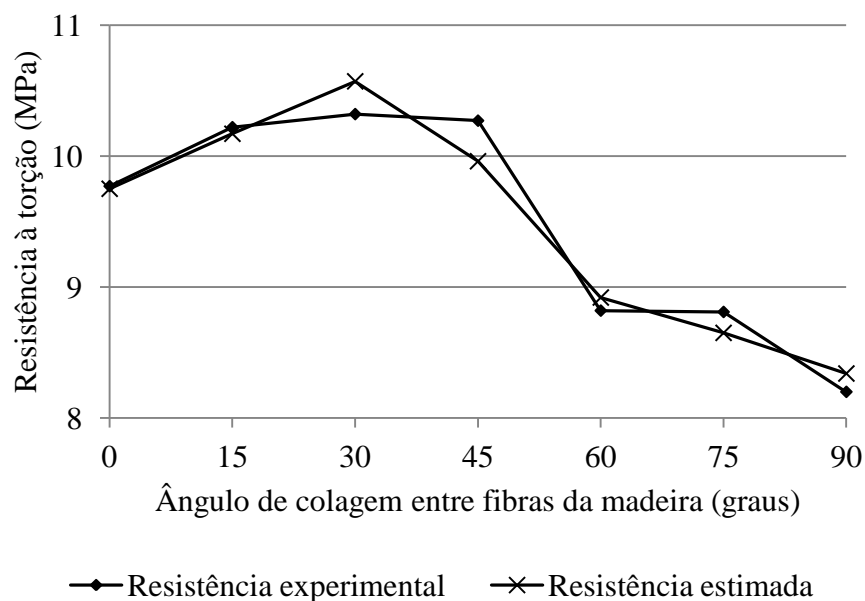


Figura 38 – Valores experimentais e estimados da resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas, com adesivo à base de óleo de mamona.

Verificou-se que as variáveis, resistência à torção e resistência ao cisalhamento de juntas coladas, estavam relacionadas. Para expressar esta relação foi estabelecido um modelo de regressão quadrático, com uma variável independente. Esta modelagem permitiu perceber que o comportamento da variável resistência ao cisalhamento na torção está relacionado com a resistência ao cisalhamento na compressão.

4.6. Verificação da estrutura

Analisadas as diferentes hipóteses de carregamento e as combinações previstas na NBR 7190/97, o conjunto de valores, considerados como correspondentes aos esforços mais desfavoráveis à estrutura, foram os utilizados na verificação. A carga permanente associada às telhas cerâmicas e à trama de madeira foi assumida como concentrada e aplicada por cinco terças sobre o pórtico. A carga permanente relativa ao peso próprio do pórtico foi interpretada como uniformemente distribuída. A hipótese mais desfavorável para o vento foi a que considerou a ação de carga lateral, perpendicular à parede, uniformemente distribuída. No caso da sobrecarga, estabeleceu-se a aplicação da carga concentrada de 1 kN na cumeeira.

4.6.1. Estrutura a ser construída, utilizando adesivo resorcinol formaldeído

O Quadro 17 apresenta os resultados obtidos para os valores de cálculo dos esforços utilizados na verificação da estrutura confeccionada, empregando adesivo resorcinol formaldeído. A notação dos esforços é apresentada a seguir:

- M_d = momento fletor de cálculo;
- N_d = esforço normal de cálculo;
- Q_d = esforço cortante de cálculo;
- $M_{g,d}$ = momento fletor de cálculo, devido à carga permanente;
- $N_{g,d}$ = esforço normal de cálculo, devido à carga permanente;
- $N_{g,k}$ = esforço normal característico, devido à carga permanente;
- $N_{q,k}$ = esforço normal característico, devido às cargas acidentais.

Quadro 17 – Resumo dos esforços calculados para a estrutura feita com adesivo resorcinol formaldeído

Barra	Ponto	M_d (kN.m)	N_d (kN)	Q_d (kN)	$M_{g,d}$ (kN.m)	$N_{g,d}$ (kN)	$N_{g,k}$ (kN)	$N_{q,k}$ (kN)
AB e DE	A = E	0	-9,77	1,26	0	-8,29	-5,92	-1,36
	B = D	9,58	-9,77	1,26	5,86	-8,29	-5,92	-1,36
BC e CD	B = D	9,58	-4,66	5,08	5,86	-4	-2,86	-0,76
	C	0	-4,66	5,08	0	-4	-2,86	-0,76

Consideradas as ações atuantes e as combinações estabelecidas pela NBR 7190/97, a carga de projeto para o pórtico construído, empregando adesivo resorcinol formaldeído, foi de 14810 N.

As características geométricas do pórtico, os coeficientes adotados da NBR 7190/97 e alguns resultados experimentais, utilizados na condução dos cálculos de verificação da estrutura, são apresentados a seguir:

- $n = 4$, número de faces coladas numa dada ligação;
- $n_1 = 2$, número de lâminas da ligação oriundas do pilar;
- $n_2 = 3$, número de lâminas da ligação oriundas do banzo superior;
- $e = 0,028$ m, espessura das lâminas;

- $\alpha = 64^\circ$, ângulo entre a direção das fibras das peças de madeira, envolvidas na ligação;
- $h_1 = 0,21$ m, altura da peça do pilar;
- $h_2 = 0,17$ m, altura da peça da viga;
- $k_{mod1} = 0,7$, coeficiente de modificação, em função da classe de carregamento (considerado de longa duração) e do tipo de madeira (considerada madeira laminada colada);
- $k_{mod2} = 1$, coeficiente de modificação, em função da classe de umidade (considerada a umidade de equilíbrio de 15%) e do tipo de madeira (considerada madeira laminada colada);
- $k_{mod3} = 0,8$, coeficiente de modificação, em função da categoria da madeira, considerada como de segunda categoria;
- $\gamma_v = \gamma_t = 1,8$, coeficiente de minoração da resistência da madeira ao cisalhamento;
- $\gamma_c = 1,4$; coeficiente de minoração da resistência da madeira à compressão;
- $f_{c0,k} = 57,50$ MPa, resistência característica à compressão paralela às fibras;
- $f_{v0,k} = 9,7$ MPa, resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras;
- $f_{v0,k} = 13,72$ MPa, resistência característica ao cisalhamento das juntas coladas paralelamente às fibras;
- $f_{v90,k} = 5,65$ MPa, resistência característica ao cisalhamento das juntas coladas normalmente às fibras;
- $f_{tor90,k} = 10,06$ MPa, resistência característica à torção de juntas coladas normais entre si.

4.6.1.1. Verificação da ligação colada

Procedeu-se à verificação da área necessária para resistir às tensões impostas à ligação. A área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do momento de torção, e o raio a ela associado foram obtidos a partir da fórmula a seguir:

$$f_{tor90,d} = \frac{k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3}}{\gamma_{tor}} \times f_{tor90,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,8} \times 10,06 = 3,12 \text{ MPa}$$

$$r = \left(\frac{2 \times M_{id}}{n \times \pi \times f_{tor90,d}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{2 \times 9,58}{4 \times \pi \times 3,12 \times 1000} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0788 \text{ m}$$

$$r = 7,88 \text{ cm}$$

$$A_M = \pi \times r^2 = \pi \times 0,0788^2 = 0,019533 \text{ m}^2$$

$$A_M = 195,33 \text{ cm}^2$$

O cálculo da área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do esforço normal, considerou que, como as peças seriam ligadas de modo a formarem um ângulo α entre si, as tensões médias deveriam ser limitadas à resistência ao cisalhamento inclinado de cálculo da junta colada, $f_{v\alpha,d}$. Tal valor foi obtido pelo uso do modelo de Hankinson, conhecidos os valores de $f_{v0,d}$ e $f_{v90,d}$.

$$f_{v\alpha,k} = \frac{f_{v0,k} \times f_{v90,k}}{f_{v0,k} \times \text{sen}^2 \alpha + f_{v90,k} \times \text{cos}^2 \alpha} = \frac{13,72 \times 5,65}{13,72 \times \text{sen}^2(64) + 5,65 \times \text{cos}^2(64)} = 6,36 \text{ MPa}$$

$$f_{v\alpha,d} = \frac{k_{\text{mod}1} \times k_{\text{mod}2} \times k_{\text{mod}3}}{\gamma_v} \times f_{v\alpha,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,8} \times 6,36 = 1,98 \text{ MPa}$$

$$A_N = \frac{N_d}{n \times f_{v\alpha,d}} = \frac{9,77}{4 \times 1,98 \times 1000} = 1,23 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_N = 12,33 \text{ cm}^2$$

A área necessária para resistir às tensões de cisalhamento provenientes do esforço cortante foi obtida conforme a fórmula a seguir:

$$f_{v90,d} = \frac{k_{\text{mod}1} \times k_{\text{mod}2} \times k_{\text{mod}3}}{\gamma_v} \times f_{v90,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,8} \times 5,65 = 1,76 \text{ MPa}$$

$$A_Q = \frac{Q_d}{n \times f_{v90,d}} = \frac{5,08}{4 \times 1,76 \times 1000} = 7,22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_Q = 7,22 \text{ cm}^2$$

Desse modo, a área total necessária para resistir às tensões impostas à ligação foi obtida pelo somatório das áreas, conforme a fórmula a seguir:

$$A_{necessária} = A_M + A_N + A_Q = 195,33 + 12,33 + 7,22$$

$$A_{necessária} = 214,88 \text{ cm}^2$$

A área colada A_c de uma face da ligação, no caso do paralelogramo da Figura 6, é obtida pela expressão:

$$A_c = \frac{(h_1 \times h_2)}{\text{sen}\alpha}$$

em que:

- h_1 = altura da peça do pilar;
- h_2 = altura da peça da viga;
- α = ângulo formado entre as peças coladas.

De acordo com o método proposto, a ligação permanecerá estável se a soma das áreas necessárias à absorção dos esforços atuantes for inferior à área colada. Assim sendo, calculou-se:

$$A_c = \frac{(h_1 \times h_2)}{\text{sen}\alpha} = \frac{(0,21 \times 0,17)}{\text{sen}(64)} = 0,039719 \text{ m}^2$$

$$A_c = 397,19 \text{ cm}^2$$

$$A_M + A_N + A_Q \leq A_c \quad \therefore \quad A_{necessária} \leq A_c$$

$$214,88 < 397,19 \quad \therefore \quad \text{condição satisfeita}$$

O maior círculo inscrito no paralelogramo teria, como raio, o menor entre os valores das alturas das peças. Logo:

$$r_{disponível} = \frac{d}{2} = \frac{0,17}{2} = 0,085 \text{ m}$$

$$r_{disponível} = 8,5 \text{ cm}$$

Foram obtidas as seguintes relações entre as áreas e os raios:

$$\frac{\text{Área}_{necessária}}{\text{Área}_{disponível}} = \frac{214,88}{397,19} = 0,54 \therefore \text{condição satisfeita}$$

$$\frac{\text{raio}_{necessário}}{\text{raio}_{disponível}} = \frac{7,88}{8,5} = 0,93 \therefore \text{condição satisfeita}$$

A verificação das áreas para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do momento de torção de cálculo M_{td} , do esforço normal de cálculo N_d , e do esforço cortante de cálculo Q_d , indicou que a área colada disponível é superior à área necessária das ligações. Poderia ter ocorrido que, mesmo sendo satisfeita tal condição, a área necessária para resistir ao momento de torção exigisse uma área circular de raio superior ao disponível na ligação. Assim sendo, é sempre importante verificar se a geometria da ligação permite a inserção do raio mínimo necessário. No caso da ligação em análise, embora a área necessária tenha representado 54% da área disponível, o raio necessário representou 93% do raio disponível, ou seja, um valor próximo ao limite. Desse modo, as alterações nas alturas das peças, que buscassem elevar o valor da relação entre áreas coladas, poderiam conduzir à não satisfação da relação entre os raios da área circular, necessária para resistir ao momento de torção.

Além da verificação da área colada, necessária para absorver as tensões oriundas dos esforços solicitantes, o método proposto também envolve a verificação da resistência da seção transversal, das lâminas que compõem a ligação, em relação às ações impostas. A verificação da resistência da seção transversal foi realizada conforme a norma NBR 7190/97, sendo todas as peças consideradas curtas.

Com relação à verificação das barras da ligação sob flexo-compressão, obteve-se:

- Barras AB e ED:

$$f_{c0,d} = \frac{k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3}}{\gamma_c} \times f_{c0,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,4} \times 57,50 = 23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_d}{A_c} = \frac{9,77}{2 \times 0,028 \times 0,21} = 830 \frac{kN}{m^2} = 0,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mf,d} = \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} = \frac{6 \times 9,58}{2 \times 0,028 \times 0,21^2} = 23275 \frac{kN}{m^2} = 23,28 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mf,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,83}{23} \right)^2 + \frac{23,28}{23} \leq 1 \quad \therefore 1,01 > 1 \quad \therefore \text{condição não satisfeita}$$

- Barras BC e DC:

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_d}{A_c} = \frac{4,66}{3 \times 0,028 \times 0,17} = 326 \frac{kN}{m^2} = 0,326 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mf,d} = \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} = \frac{6 \times 9,58}{3 \times 0,028 \times 0,17^2} = 23677 \frac{kN}{m^2} = 23,68 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mf,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,326}{23} \right)^2 + \frac{23,68}{23} \leq 1 \quad \therefore 1,03 > 1 \quad \therefore \text{condição não satisfeita}$$

Procedeu-se à verificação da borda tracionada das barras da ligação:

- Barras AB e ED:

Na falta da determinação experimental, a NBR 7190/97 permite adotar a seguinte relação para os valores característicos das resistências:

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad \therefore f_{t0,k} = \frac{f_{c0,k}}{0,77} = \frac{57,50}{0,77} = 74,67 \text{ MPa}$$

$$f_{t0,d} = \frac{k_{\text{mod1}} \times k_{\text{mod2}} \times k_{\text{mod3}}}{\gamma_t} \times f_{c0,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,8} \times 74,67 = 23,23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_d}{A_c} = \frac{9,77}{2 \times 0,028 \times 0,21} = 830 \frac{kN}{m^2} = 0,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mf,d} = \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} = \frac{6 \times 9,58}{2 \times 0,028 \times 0,21^2} = 23275 \frac{kN}{m^2} = 23,28 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{t0,d}} \right) + \frac{\sigma_{Mf,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,83}{23,23} \right) + \frac{23,28}{23,23} \leq 1 \quad \therefore 1,04 = 1 \quad \therefore \text{condição não satisfeita}$$

- Barras BC e DC:

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_d}{A_c} = \frac{4,66}{3 \times 0,028 \times 0,17} = 326 \frac{kN}{m^2} = 0,326 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mf,d} = \frac{6 \times M_d}{b \times h^2} = \frac{6 \times 9,58}{3 \times 0,028 \times 0,17^2} = 23677 \frac{kN}{m^2} = 23,68 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{t0,d}} \right) + \frac{\sigma_{Mf,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,326}{23,23} \right) + \frac{23,68}{23,23} \leq 1 \quad \therefore 1,03 > 1 \quad \therefore \text{condição não satisfeita}$$

A verificação das barras da ligação ao cisalhamento foi conduzida conforme a fórmula a seguir:

- Barras AB e ED:

$$f_{v0,d} = \frac{k_{\text{mod}1} \times k_{\text{mod}2} \times k_{\text{mod}3}}{\gamma_v} \times f_{v0,k} = \frac{0,7 \times 1 \times 0,8}{1,8} \times 9,7 = 3,02 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad \therefore \frac{3 \times Q_d}{2 \times b \times h} \leq f_{v0,d}$$

$$\frac{3 \times 1,26}{2 \times 2 \times 0,028 \times 0,21 \times 1000} \leq 3,02 \quad \therefore 0,16 < 3,02 \quad \therefore \text{condição satisfeita}$$

- Barras BC e DC:

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad \therefore \frac{3 \times Q_d}{2 \times b \times h} \leq f_{v0,d}$$

$$\frac{3 \times 5,08}{2 \times 3 \times 0,028 \times 0,17 \times 1000} \leq 3,02 \quad \therefore 0,53 < 3,02 \quad \therefore \text{condição satisfeita}$$

A verificação da resistência das barras da ligação às solicitações impostas demonstrou que todas as barras apresentaram área de madeira suficiente para atender satisfatoriamente aos esforços de cisalhamento. A análise da resistência das barras da ligação, quando solicitadas à flexo-compressão e em relação à borda tracionada, permitiu constatar que a magnitude das solicitações impostas foi, no máximo, 3% superior ao limite unitário, imposto como condição de segurança. Assim sendo, decidiu-se por não corrigir tal deficiência, através do aumento da seção resistente, considerando que a variabilidade das medições geométricas das lâminas, bem como das cargas atuantes, anulariam tal diferença.

4.6.1.2. Verificação das barras

As barras da estrutura foram verificadas sob flexo-compressão e resistência aos esforços de cisalhamento atuantes, seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 7190/97.

As peças AB e ED, correspondentes aos pilares e verificadas a flexo-compressão, são esbeltas na direção x e, medianamente esbeltas, na direção y. A verificação da estabilidade das peças na direção x, assumida como correspondente à altura (21 cm), haja vista a possibilidade de deslocamento considerada, conduziu a obtenção de um valor abaixo do máximo permitido, conforme apresentado a seguir:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \therefore \quad \frac{0,332}{23} + \frac{8,768}{23} \leq 1 \quad \therefore \quad 0,39 < 1 \quad \therefore \quad \text{condição satisfeita}$$

Na direção y, o valor obtido pode ser considerado como insignificante. No referente à resistência da seção transversal, o valor obtido indicou que as solicitações impostas foram inferiores à capacidade de resistência das peças, conforme apresentado a seguir:

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \therefore \quad \left(\frac{0,332}{23} \right)^2 + \frac{9,314}{23} + 0,5 \frac{0,00}{23} \leq 1$$

$$0,41 < 1 \quad \text{condição satisfeita}$$

As barras BC e DC, correspondentes aos banzos superiores, na parte considerada interna à estrutura, também se encontravam submetidas à flexo-compressão. A verificação da estabilidade das peças, consideradas como esbeltas na direção x e, medianamente esbeltas, na direção y, conduziu a um valor insignificante na direção y. A verificação da estabilidade das peças na direção x, assumida como correspondente à altura (17 cm), conduziu ao seguinte valor:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \therefore \quad \frac{0,196}{23} + \frac{13,652}{23} \leq 1 \quad \therefore \quad 0,60 < 1 \quad \therefore \quad \text{condição satisfeita}$$

Com relação à resistência da seção transversal, o valor obtido foi, praticamente, o mesmo valor calculado, considerado o critério da estabilidade, conforme expresso a seguir. Nesse caso, os critérios relacionados à estabilidade e à resistência apresentaram o mesmo rigor.

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \therefore \quad \left(\frac{0,196}{23} \right)^2 + \frac{14,212}{23} + 0,5 \frac{0,00}{23} \leq 1$$

$0,62 < 1$ *condição satisfeita*

Com relação aos esforços de cisalhamento, todas as barras atendem às solicitações impostas, conforme demonstrado a seguir:

- Barras AB e ED:

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad \therefore \quad \frac{3 \times Q_d}{2 \times b \times h} \leq f_{v0,d}$$

$$\frac{3 \times 1,26}{2 \times 5 \times 0,028 \times 0,21 \times 1000} \leq 3,02 \quad \therefore \quad 0,064 < 3,02 \quad \therefore \quad \text{condição satisfeita}$$

- Barras BC e DC:

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad \therefore \quad \frac{3 \times Q_d}{2 \times b \times h} \leq f_{v0,d}$$

$$\frac{3 \times 5,08}{2 \times 5 \times 0,028 \times 0,17 \times 1000} \leq 3,02 \quad \therefore \quad 0,32 < 3,02 \quad \therefore \quad \text{condição satisfeita}$$

Considerando como fixa a espessura das lâminas utilizadas na composição das peças, a condução dos cálculos, alterando o número de lâminas componentes das peças, permitiu verificar que a utilização de apenas três lâminas conduziria à satisfação dos critérios de estabilidade e resistência da seção transversal, tanto para o pilar, quanto para o banzo superior. Com relação aos esforços de cisalhamento, todas as barras atenderiam às solicitações impostas com a utilização de apenas uma lâmina.

O objetivo de avaliar o comportamento da ligação colada tornou interessante o fato de as peças se encontrarem submetidas a esforços menores que suas capacidades de resistência. Quando submetida ao teste de carga, a estrutura tenderia a atingir o limite de resistência aos esforços na ligação colada, antes que fosse atingido o limite de resistência da seção transversal do pilarete ou do banzo superior. Portanto, embora sob o ponto de vista econômico, a utilização de três lâminas fosse satisfatória, optou-se por confeccionar as estruturas, utilizando cinco lâminas, como inicialmente previsto.

4.6.1.3. Verificação da articulação no ponto C

Com relação às verificações relativas ao pino metálico, o cálculo do raio mínimo conduziu ao valor de 3 mm. A NBR 7190/97 estabelece que o diâmetro mínimo a ser adotado para pinos metálicos, utilizados em ligações com função estrutura, é de 10 mm e esse valor passou a ser o considerado. A resistência oferecida pelo pino foi superior ao esforço normal solicitante e indicou a ocorrência de embutimento na madeira em detrimento da flexão do pino. Situação similar ocorreu em relação à verificação da resistência do pino ao esforço cortante.

A verificação da resistência à compressão localizada, ou resistência de embutimento da madeira, demonstrou que os esforços solicitantes foram menores que a capacidade de resistência do material, considerados o esforço normal e o cortante.

4.6.2. Estrutura a ser construída utilizando adesivo à base de óleo de mamona

O procedimento de verificação da estrutura a ser construída com adesivo derivado de óleo de mamona foi conduzido do mesmo modo que o realizado para

estruturas construídas com adesivo resorcinol formaldeído. As diferenças entre os valores obtidos se devem às resistências características das juntas coladas, distintas para os adesivos e utilizadas nos cálculos.

Todas as barras da estrutura, verificadas à flexo-compressão e à resistência aos esforços de cisalhamento atuantes, satisfizeram os critérios estabelecidos, seguindo os preceitos contidos na NBR 7190/97. A verificação da ligação, no entanto, demonstrou que a área necessária para resistir às tensões impostas foi superior à área disponível na ligação.

Objetivando atender aos critérios normativos, as soluções propostas deveriam aumentar a área colada, aumentando a área de madeira na ligação, necessária para resistir aos esforços atuantes e/ou minorar a magnitude das ações impostas às peças.

Enquanto o aumento da área de madeira das peças componentes da ligação na região do ponto B e, de modo similar, na região do ponto D, uma solução possível seria o aumento do número de lâminas na região da ligação, mantendo-se constantes todos os demais valores adotados, tais como espessura e altura das lâminas, espaçamento entre pórticos, dentre outros. Outra solução seria a variação da altura das lâminas, mantendo-se constantes todos os demais valores. Poderia ser admitida, ainda, a variação da seção transversal das peças nas regiões de ligação, pontos B e D.

Dentre as soluções que consideram a minoração da magnitude das ações, uma possibilidade seria a diminuição do espaçamento entre os pórticos, mantendo-se constantes todos demais valores adotados. Os valores obtidos de cálculo indicaram que o espaçamento entre os pórticos deveria ser de, no máximo, 2,0 m, para satisfazer os critérios impostos.

Essa solução, viável sob o ponto de vista da engenharia, também poderia demonstrar ser vantajosa sob o aspecto econômico. No caso em estudo, a cada 10 m de comprimento seria necessário o emprego de uma estrutura a mais para vencer os esforços impostos. Embora esse fato concorra para o aumento de custos com materiais e mão de obra, as soluções que propõem um aumento de área de madeira, também, apresentam um aumento de custos com materiais, além de outros, associados a um maior número de peças processadas e coladas, o que também implica em custos de mão de obra. Assim sendo, seria interessante a condução de uma análise econômica comparativa mais criteriosa.

Examinadas as alternativas, optou-se por adotar a que considerou o espaçamento máximo entre os pórticos de 2,0 m mantendo-se constantes todos os demais valores

adotados. Essa escolha mostrou-se a solução mais simples, enquanto execução das estruturas, e conduziu ao pleno atendimento dos critérios impostos, sob o ponto de vista estrutural.

Consideradas as ações atuantes e as combinações estabelecidas pela NBR 7190/97, a carga de projeto obtida para o pórtico construído foi de 11840 N, empregando adesivo à base de óleo de mamona.

4.7. Desempenho das estruturas

O tempo necessário para a preparação do ensaio de cada estrutura foi de 12 horas, aproximadamente. Essa preparação incluiu a união das duas partes da estrutura, formando o pórtico, a instalação dos equipamentos de aplicação de carga e de leitura de deslocamentos, além da montagem/ajuste dos aparatos de contenção da estrutura.

O tempo médio de condução dos ensaios foi de 76 minutos, até a ruptura dos pórticos.

4.7.1. Resistência apresentada pelas estruturas

Todas as estruturas construídas foram levadas à ruptura. Os locais das falhas, cargas de projeto, ruptura e o quociente entre as cargas de ruptura e de projeto estão indicados no Quadro 18. As três estruturas construídas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído foram denominadas, respectivamente, de R1, R2 e R3; aquelas que empregaram óleo de mamona, M1 e M2.

Os quocientes entre as cargas de ruptura e de projeto são um indicativo da segurança das estruturas. Os valores médios, obtidos para as estruturas construídas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído e derivado de de óleo de mamona, foram 4,63 e 4,42, respectivamente. Esses quocientes podem ser considerados muito satisfatórios, quando comparados aos resultados obtidos em testes de estruturas similares (CARVALHO FILHO, 1984; WILKINSON, 1984; BARACHO JÚNIOR, 1990; PETRAUSKI, 1991; COURI PETRAUSKI, 1999; PETRAUSKI, 2000).

Verificou-se que todas as rupturas ocorreram nas regiões de ligação. Isso já era esperado, tendo em vista que nas verificações realizadas o raio da área circular para combater o momento de torção representou 93% do raio disponível. A verificação da resistência da seção transversal das lâminas componentes da ligação, quando solicitadas

à flexo-compressão e em relação à borda tracionada, permitiu constatar que a magnitude das solicitações impostas foi, no máximo, 3% superior ao limite unitário, imposto como condição de segurança. Nesse sentido, a fratura parece ter sido uma ocorrência normal nessa região.

Embora as rupturas tenham ocorrido em regiões de ligação, nenhuma delas pôde ser atribuída à falha da ligação e pareciam estar relacionadas com a perda da capacidade resistente da madeira.

Quadro 18 – Desempenho das estruturas testadas, em termos de resistência

Estrutura	Local de ruptura	Carga de ruptura (kN)	Carga de projeto (kN)	Quociente entre carga de ruptura e carga de projeto
Resorcinol 1 (R1)	Nó B	69,40	14,81	4,68
Resorcinol 2 (R2)	Nó D	83,18	14,81	5,62
Resorcinol 3 (R3)	Nó B	53,12	14,81	3,59
Mamona 1 (M1)	Nó B	68,42	11,84	5,78
Mamona 2 (M2)	Nó B	36,31	11,84	3,07

Todas as estruturas testadas apresentaram fraturas típicas de tração perpendicular às fibras da madeira e cisalhamento do plano colado. Na estrutura R2, notou-se, ainda, a ocorrência de tração paralela às fibras da madeira. Os pórticos R3 e M1 apresentaram, também, fratura de compressão, com visível esmagamento das fibras.

As falhas de compressão que ocorreram na região da ligação, observadas nos pórticos R3 e M1, apresentaram-se em concordância com o sentido indicado para os momentos fletores. A verificação à flexo-compressão, considerando duas ou três lâminas resistentes na região da ligação, havia demonstrado não ser satisfatória. Desse modo, era esperado que fosse esgotada sua capacidade resistente, para elevadas magnitudes de carga, muito além da carga de projeto.

O modo de ruptura das ligações demonstrou que nessa área todas as solicitações foram transmitidas por tensões de cisalhamento, agindo nos planos colados. Observou-se que o momento fletor agiu como um momento de torção na região da ligação. As considerações teóricas do método proposto de verificação da ligação colada parecem compatíveis com o comportamento da ligação, quando em serviço.

As rupturas não apresentaram um caráter frágil, como poderia se esperar de estruturas inteiramente coladas. Ao contrário, as fraturas ocorreram de modo gradativo, com liberação gradual de energia, exceção feita para o final do processo. Observações similares foram feitas por Couri Petruski (1999) e Petruski (2000), ambos avaliando o modo de ruptura de tesouras para telhados, feitas inteiramente em madeira laminada colada.

As Figuras a seguir ilustram os modos de ruptura apresentados para cada estrutura testada.



Figura 39 - Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura M1.

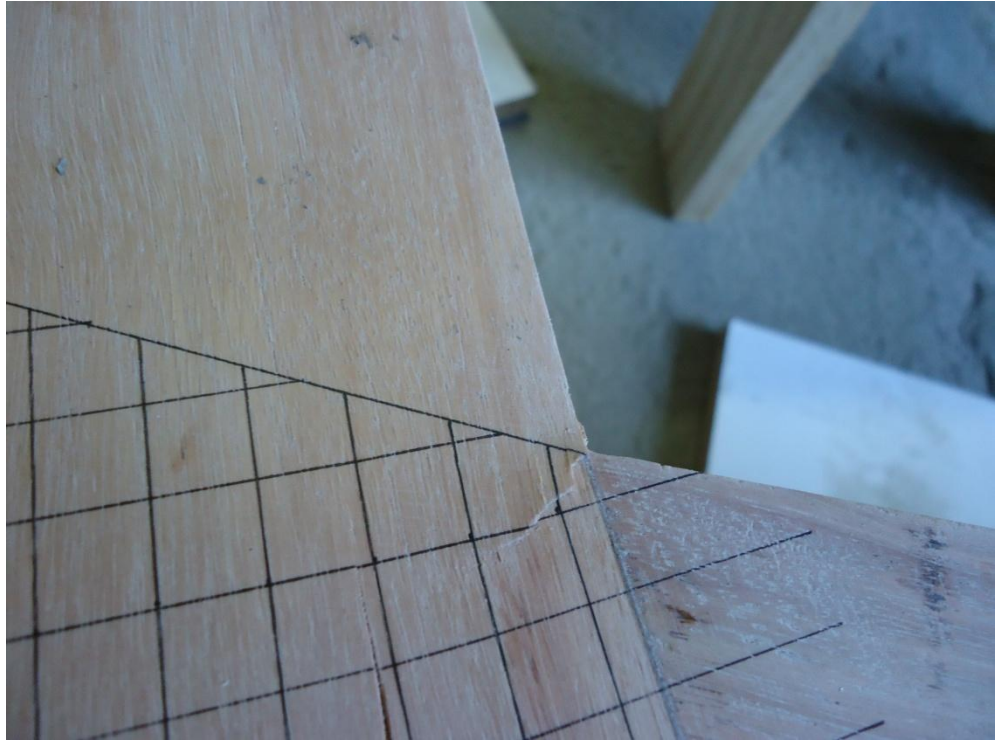


Figura 40 - Detalhe da fratura de compressão ocorrida no nó B da estrutura M1.



Figura 41 - Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura M2.



Figura 42 - Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura R1.



Figura 43 - Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó D da estrutura R2.



Figura 44 - Detalhe da ruptura ocorrida na região do nó B da estrutura R3.



Figura 45 - Detalhe da fratura de compressão ocorrida no nó B da estrutura R3.

4.7.2. Rigidez apresentada pelas estruturas

Os deslocamentos apresentados pelas estruturas, quando sob a ação de carga, foram acompanhados por relógios comparadores, instalados em pontos específicos do pórtico, conforme ilustrado na Figura 46. Os valores observados para os relógios instalados nos centros dos vãos dos banzos superiores, relógios REL2 e REL3, foram interpretados pela média.

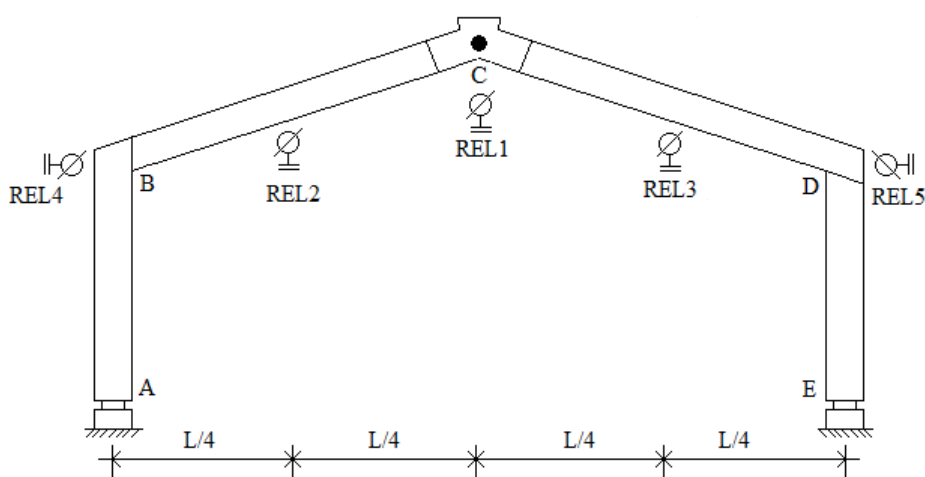


Figura 46 – Posição de instalação dos relógios comparadores na estrutura.

Devido ao interesse em conhecer o comportamento do pórtico inteiramente colado, quando em serviço, conduziu-se, inicialmente, a avaliação das deformações, devido à ação da carga de projeto sobre as estruturas. Durante a fase de dimensionamento, verificou-se que a combinação das ações que conduzia ao maior nível de solicitação da estrutura era a que considerava a carga de vento lateral, ou seja, o vento atuando, perpendicularmente, às paredes da edificação. Assim sendo, buscou-se aplicar a carga de projeto, de modo que a parcela devida ao vento agisse na face lateral do pilarete, conforme ilustrado na Figura 47. A instalação dos relógios REL4 e REL5 objetivou conhecer o deslocamento horizontal da estrutura.

A aplicação de carga na lateral do pilarete gerou uma tendência de rotação da estrutura. Em função disso, optou-se por iniciar o carregamento aplicando-se uma fração das cargas verticais, na sequência, toda carga horizontal, por fim, a fração restante das cargas verticais, totalizando a carga de projeto.

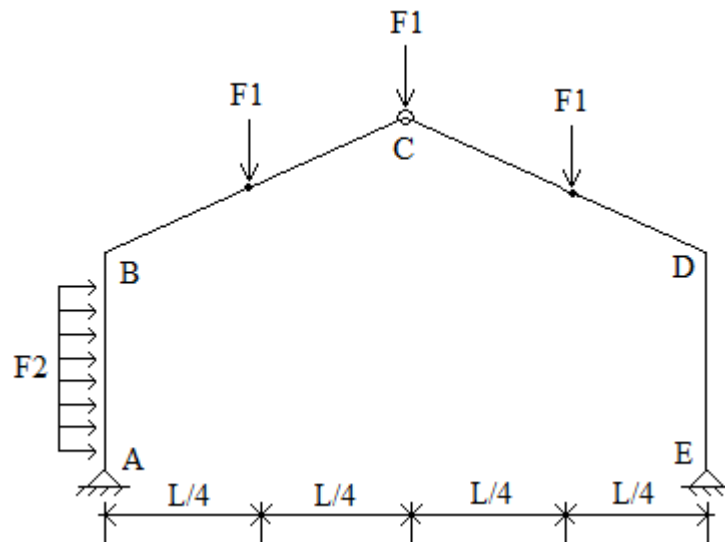


Figura 47 – Esquema de carregamento com ação de vento lateral na estrutura.

Com relação às deformações, todas as estruturas testadas mostraram a mesma tendência de comportamento. A aplicação da carga horizontal gerou uma inversão do momento fletor no nó B. Essa inversão refletiu-se na leitura dos deslocamentos.

O carregamento da fração inicial das cargas verticais conduziu à observação de deslocamentos verticais, de cima para baixo, acompanhados pelos relógios REL1, REL2 e REL3, e deslocamentos horizontais, de dentro para fora da estrutura, acompanhados pelos relógios REL4 e REL5. Após a aplicação da carga de vento, os relógios REL1 e REL2 indicavam deslocamentos maiores que os anteriormente observados, indicando que a carga de vento causou deslocamentos de cima para baixo naqueles pontos da estrutura. Fenômeno inverso ocorreu com as leituras do REL3, indicando que a ação da carga de vento provocou, naquele ponto, um deslocamento vertical de baixo para cima. As leituras dos relógios REL4 e REL5 mostraram que a ação da carga de vento provocou deslocamentos horizontais de fora para dentro da estrutura no nó B e, de dentro para fora, no nó D. A aplicação da fração final do carregamento vertical, totalizando a carga de projeto, conduziu a deslocamentos verticais, de cima para baixo, nos pontos acompanhados pelos relógios REL1, REL2 e REL3 e, ainda, deslocamentos horizontais, de dentro para fora da estrutura, nos pontos acompanhados pelos relógios REL4 e REL5. O Quadro 19 apresenta os deslocamentos finais de cada estrutura testada. A Figura 48 ilustra a “deformada” das estruturas testadas nas condições acima expostas.

Quadro 19 – Deslocamentos finais após a aplicação da carga de projeto, incluindo vento lateral

Estrutura	REL1 (mm)	REL2 (mm)	REL3 (mm)	REL4 (mm)	REL5 (mm)
Resorcinol 1 (R1)	0,91	5,15	0,05	13,18	10,99
Resorcinol 2 (R2)	4,42	5,79	0,25	12,91	11,13
Resorcinol 3 (R3)	1,21	4,87	0,61	9,39	8,72
Mamona 1 (M1)	0,71	4,99	0,83	11,77	10,99
Mamona 2 (M2)	4,00	5,59	0,22	11,38	11,88

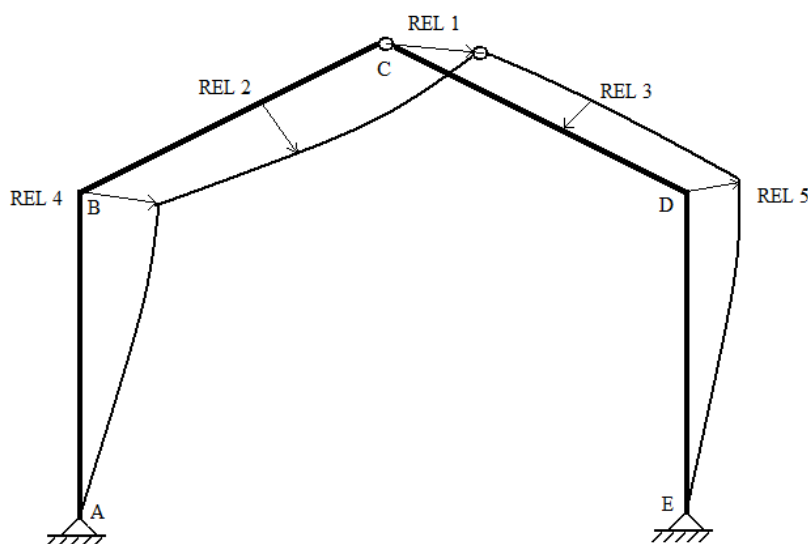


Figura 48 - Aspecto da deformada da estrutura, considerada a ação da carga de projeto, com a aplicação da carga de vento lateral.

Após a aplicação da carga de projeto, incluindo a ação do vento lateral, retirou-se todo o carregamento do pórtico e iniciou-se nova fase de ensaio, aplicando-se cargas verticais até a ruptura da estrutura.

Os resultados obtidos nessa última fase indicaram um comportamento linear no diagrama força x deformação, mesmo para os mais altos níveis de carga. Deste modo, optou-se por representar os diagramas utilizando equações de regressão, que são apresentadas no Quadro 20. As funções lineares que apresentaram os melhores ajustes foram aquelas que continham a origem do sistema de eixos.

Quadro 20 – Equações de regressão para os diagramas força x deslocamento

Estrutura	Relógios	Equação*	R ²
Resorcinol 1 (R1)	REL1	Y = 0,9114 X	0,99
Resorcinol 1 (R1)	REL2 e REL3	Y = 2,4433 X	0,99
Resorcinol 2 (R2)	REL1	Y = 1,3013 X	0,88
Resorcinol 2 (R2)	REL2 e REL3	Y = 2,3612 X	0,99
Resorcinol 3 (R3)	REL1	Y = 1,5676 X	0,98
Resorcinol 3 (R3)	REL2 e REL3	Y = 2,6738 X	0,99
Mamona 1 (M1)	REL1	Y = 1,0758 X	0,98
Mamona 1 (M1)	REL2 e REL3	Y = 2,4862 X	0,99
Mamona 2 (M2)	REL1	Y = 0,8799 X	0,99
Mamona 2 (M2)	REL2 e REL3	Y = 2,2562 X	0,99

*Y expresso em kN; X expresso em mm.

O comportamento linear da deformação de estruturas feitas inteiramente coladas já fora observado anteriormente por Couri Petrauski (1999) e Petrauski (2000). Essa, com certeza, pode ser uma característica positiva desse tipo de estrutura.

As Figuras 49, 50, 51 e 52 ilustram os diagramas obtidos e indicam o nível de carga de projeto das estruturas testadas.

De acordo com a NBR 7190/97, no caso de construções correntes, como o pórtico em estudo, deve ser verificada a segurança em relação ao estado limite de deformações excessivas, que possam afetar a utilização normal da construção ou seu aspecto estético. Para tanto, deve-se considerar apenas as combinações de ações de longa duração, levando-se em conta a rigidez efetiva definida pelo módulo de elasticidade efetivo, $E_{c0,ef}$. Nesse caso, as combinações de longa duração equivalem à soma das cargas permanentes e 20% da sobrecarga. A utilização do módulo de elasticidade efetivo da madeira tem por objetivo considerar os efeitos da umidade e da duração do carregamento, que serão mantidas durante a vida útil da construção, na determinação das deformações da estrutura.

Consideradas as combinações de ações, os níveis de carga de projeto para verificação dos deslocamentos das estruturas coladas com resorcinol formaldeído e adesivo derivado de óleo de mamona foram, respectivamente, 9,45 kN e 7,55 kN.

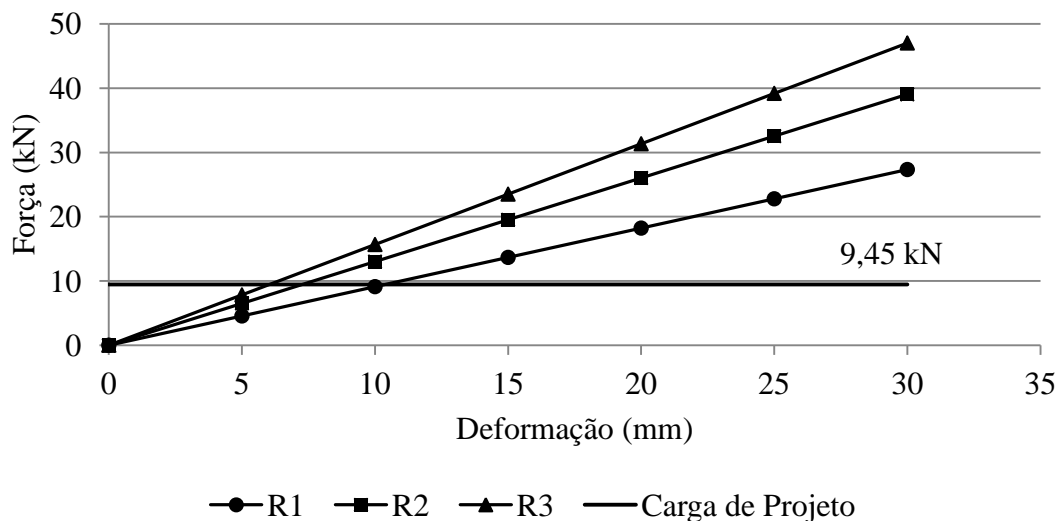


Figura 49 – Diagrama força x deformação para os deslocamentos da cumeeira das estruturas, coladas com adesivo resorcinol formaldeído.

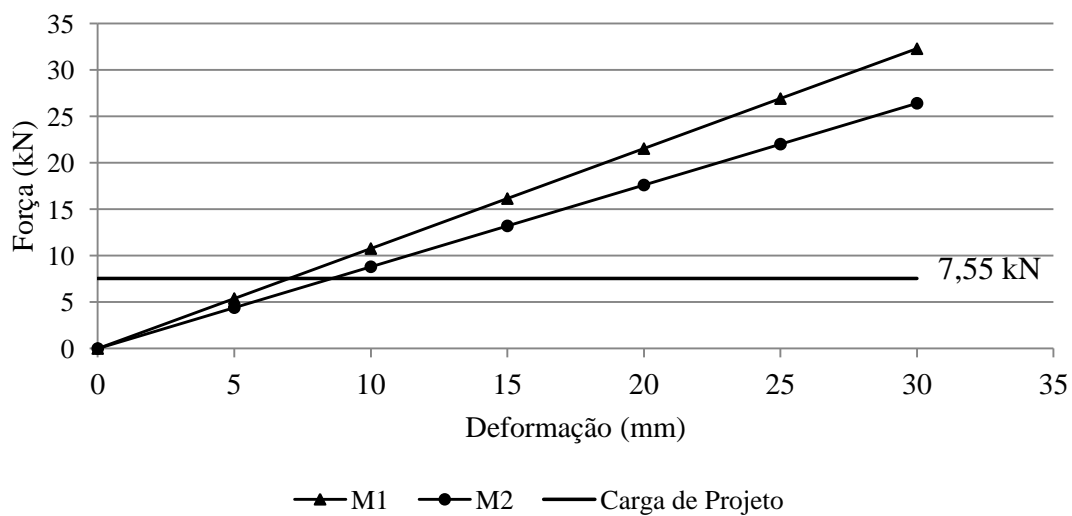


Figura 50 – Diagrama força x deformação para os deslocamentos da cumeeira das estruturas, coladas com adesivo derivado de óleo de mamona.

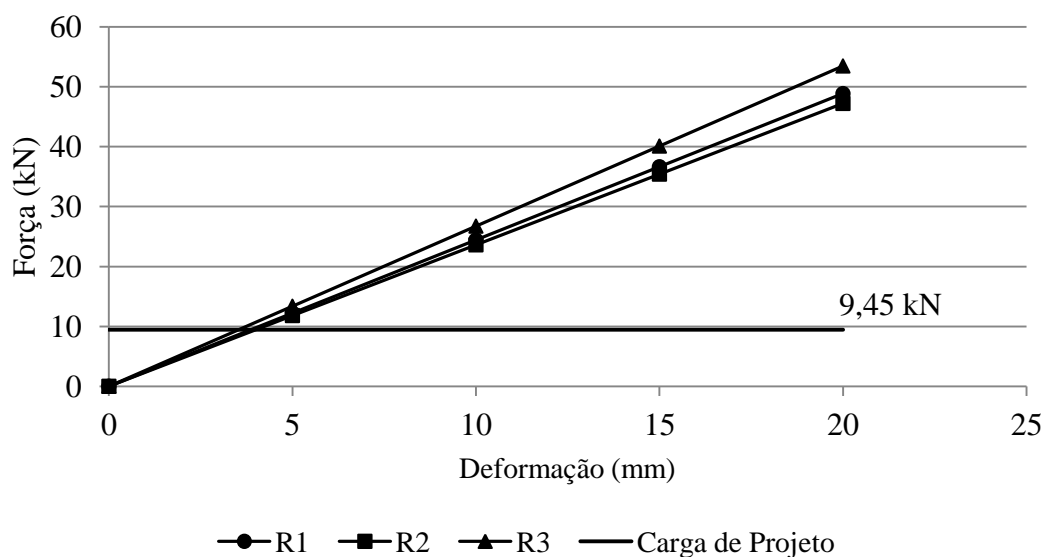


Figura 51 – Diagrama força x deformação para os deslocamentos médios dos trechos centrais dos banzos superiores das estruturas, coladas com adesivo resorcinol formaldeído.

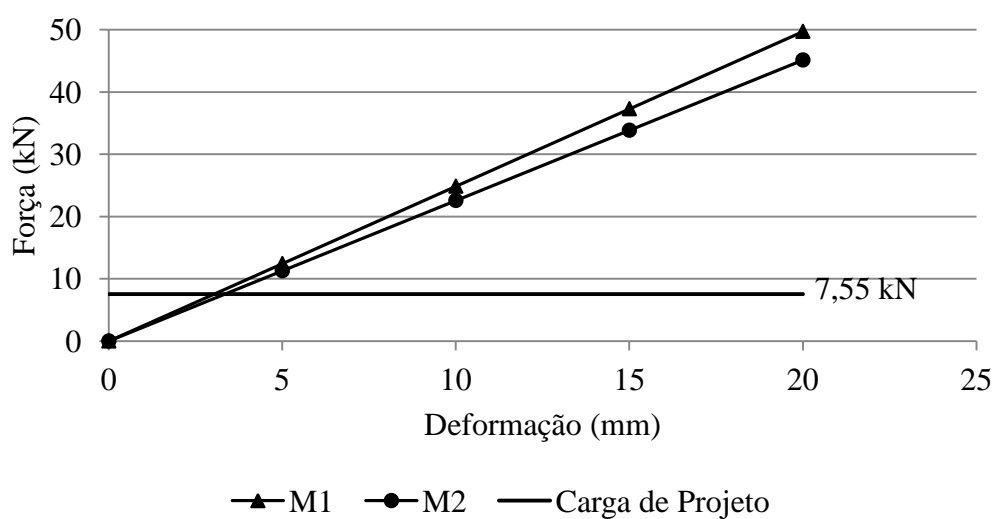


Figura 52 – Diagrama força x deformação para os deslocamentos médios dos trechos centrais dos banzos superiores das estruturas, coladas com adesivo derivado de óleo de mamona.

A norma brasileira estabelece alguns critérios para a limitação das deformações das estruturas. No caso de construções correntes, a flecha efetiva, determinada pela soma das parcelas devidas à carga permanente e à carga acidental, não pode superar $1/200$ dos vãos. Em balanços, o limite é o quociente entre o comprimento do balanço e o valor 100. Para as estruturas em estudo, isso representa um deslocamento vertical máximo admissível de 25 milímetros para um carregamento total equivalente a 9,45 kN

para pórticos colados com resorcinol formaldeído e 7,55 kN, para aqueles que utilizaram adesivo derivado de óleo de mamona.

A Figura 53 ilustra a deformada teórica da estrutura. Nota-se que o maior deslocamento vertical ocorre na cumeeira. Desse modo, os valores associados ao relógio instalado na cumeeira, REL1, foram os utilizados para a condução da análise de deslocamento máximo.

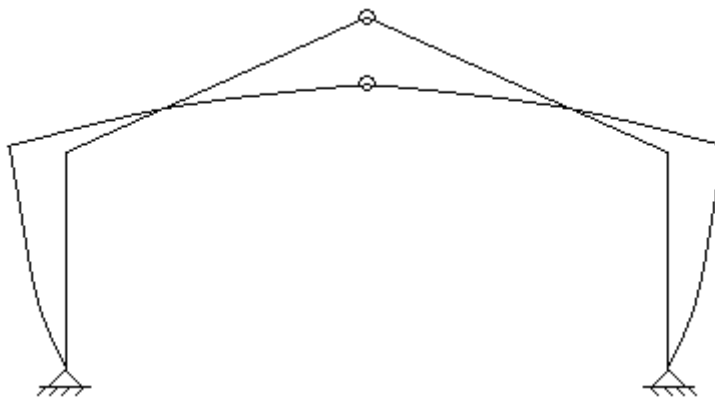


Figura 53 - Aspecto da deformada da estrutura.

Como pode ser observado nas Figuras 49 e 50, para os níveis de carga de projeto, as deformações ocorridas nas estruturas não atingiram o valor limite estabelecido.

Para estruturas confeccionadas com adesivo resorcinol formaldeído, a flecha efetiva, ou calculada, foi de 8,25 mm. Considerada a carga de projeto, os valores experimentais obtidos para os deslocamentos máximos, que ocorreram na cumeeira das estruturas denominadas R1, R2 e R3, foram, respectivamente, 10,37 mm, 7,26 mm e 6,03 mm. Para tais estruturas, a média do deslocamento na cumeeira foi de 7,89 mm. A proximidade entre o valor do deslocamento teórico e a média experimental do deslocamento indicou uma boa precisão da verificação teórica. Uma provável explicação para tal precisão pode ser o fato que quando se utiliza o adesivo resorcinol formaldeído o comportamento da ligação colada em serviço tenha, de fato, a rigidez considerada no cálculo teórico da deformação.

A flecha efetiva para as estruturas construídas, utilizando adesivo derivado de óleo de mamona, foi de 6,60 mm. Para a carga de projeto, os valores experimentais obtidos para os deslocamentos na cumeeira foram de 7,02 mm e 8,58 mm para as

estruturas denominadas M1 e M2, respectivamente. Para tais estruturas, a média experimental para o deslocamento máximo foi de 7,80 mm. Apesar da proximidade de valores, a média experimental foi superior ao valor teórico do deslocamento, provavelmente devido a uma maior flexibilidade da ligação colada, fazendo com que o deslocamento apresentado pela estrutura em serviço tenda a ser superior ao teórico, que considera a rigidez da ligação.

Com relação à reprodução de um carregamento de longa duração, Wilkinson (1984) e Carvalho Filho (1984) atestaram que o deslocamento final de uma estrutura pode ser de até três vezes seu deslocamento inicial, em função do tipo de ligação. Considerando que para que fosse atingido o deslocamento máximo admissível de 25 mm seria necessária a aplicação de um nível de carga equivalente a 3,3 vezes a carga de projeto, independentemente do adesivo utilizado, as deformações das estruturas seriam, ainda, satisfatórias.

Conforme apresentado, os pórticos construídos em *Eucalyptus sp.*, feitos inteiramente colados, utilizando adesivo resorcinol formaldeído ou adesivo à base de óleo de mamona, apresentaram excelente desempenho, em termos de resistência e rigidez. A consideração teórica da rigidez da ligação colada conduziu a resultados compatíveis com os apresentados pelas estruturas, o que é um indicativo da adequação da análise conduzida. Tecnicamente, a construção de pórticos inteiramente colados, utilizando adesivo resorcinol formaldeído ou adesivo à base de óleo de mamona, mostrou-se plenamente viável, inclusive quanto às soluções propostas para a verificação e execução das ligações coladas.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos, acerca do desenvolvimento e avaliação de pórticos inteiramente colados, construídos com lâminas de madeira de eucalipto, utilizando adesivo resorcinol formaldeído e adesivo à base de óleo de mamona, pode-se concluir que:

- A resistência ao cisalhamento das juntas coladas utilizando adesivo resorcinol formaldeído foi afetada pelas variáveis pressão de colagem e densidade da madeira, efeito significativo para a interação pressão x densidade.
- A quantidade de adesivo resorcinol formaldeído não apresentou efeito significativo sobre a estimativa da resistência das juntas coladas.
- Consideradas as classes de densidade estudadas das juntas confeccionadas com resorcinol formaldeído, as estimativas das resistências foram crescentes com o incremento da pressão, ocorrendo fenômeno inverso para a classe de menor densidade.
- Para as juntas coladas com adesivo resorcinol formaldeído, consideradas as possíveis combinações entre os níveis das variáveis pressão de colagem e densidade da madeira, em geral, as menores estimativas para resistência indicaram valores superiores aos médios obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira sólida.
- O percentual de falha na madeira das juntas coladas com resorcinol formaldeído foi afetado pelas variáveis pressão de colagem, densidade da madeira e quantidade de adesivo, havendo efeito significativo da interação quantidade de adesivo x pressão.

- De acordo com as análises das estimativas médias da resistência e do percentual de falha na madeira das juntas coladas com resorcinol formaldeído, a combinação que pareceu ser a mais adequada para ser utilizada na construção dos pórticos em madeira laminada colada foi a de quantidade de adesivo de 250 g/m² e pressão de colagem de 1,3 MPa, não se recomendando o emprego de peças pertencentes à classe de densidade 1.
- A resistência das juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona, avaliada por cisalhamento na compressão, recebeu influência significativa das variáveis proporção entre os componentes isocianato e polioliol, pressão de colagem e densidade da madeira. Ocorreu interação significativa entre pressão de colagem e proporção entre componentes.
- A quantidade de adesivo não apresentou efeito significativo sobre a resistência das juntas coladas com adesivo à base de óleo de mamona.
- A proporção entre os componentes isocianato e polioliol, para a obtenção da resistência máxima, aumentou com o incremento da pressão de colagem.
- Consideradas as classes de densidade estudadas das juntas confeccionadas com adesivo à base de óleo de mamona, as estimativas das resistências foram crescentes com o incremento da pressão.
- O percentual de falha na madeira das juntas confeccionadas com adesivo à base de óleo de mamona foi influenciado por todas as variáveis em estudo, exceto pela pressão de colagem. Várias combinações satisfizeram o critério imposto para o percentual de falha na madeira.
- De acordo com as estimativas médias da resistência e do percentual de falha na madeira das juntas coladas, a combinação que pareceu ser a mais adequada para ser utilizada na construção dos pórticos em madeira laminada colada empregando o adesivo à base de óleo de mamona foi a de proporção entre componentes de 1,32; quantidade de adesivo de 300 g/m² e pressão de colagem de 1,3 MPa, considerada a possibilidade de emprego de peças pertencentes às distintas classes de densidade, com exceção daquelas pertencentes à classe de densidade 1.
- As evidências experimentais indicam que, de modo geral, havendo controle do processo, o *Eucalyptus sp.*, associado à resina resorcinol formaldeído ou ao adesivo à base de óleo de mamona, pode produzir juntas coladas com desempenho estrutural satisfatório.

- O modelo de Hankinson pode ser usado como estimador da resistência ao cisalhamento na compressão de juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira.
- Há a possibilidade de utilização do aparato de teste e metodologia proposta para a obtenção da resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira.
- Há uma relação entre a resistência ao cisalhamento na compressão e a resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira.
- O desempenho dos pórticos, considerado o critério da resistência, foi satisfatório.
- As rupturas não podem ser interpretadas como frágeis e nem atribuídas à perda de desempenho das ligações. Embora as falhas tenham ocorrido nas regiões de ligação, pareceram estar relacionadas à perda de capacidade resistente pela madeira.
- Os resultados obtidos indicaram um comportamento linear no diagrama força x deformação, mesmo para os mais elevados níveis de carga.
- As deformações não atingiram, nos níveis de carga de projeto, os valores limites estabelecidos pela norma brasileira, mesmo prevendo-se um deslocamento final da ordem de três vezes o inicial, de modo a reproduzir a ação de um carregamento de longa duração. As estimativas para os deslocamentos teóricos foram compatíveis com os observados, inclusive quanto à configuração deformada.
- O adesivo à base de óleo de mamona demonstrou ter potencial para uso estrutural.
- A metodologia proposta para verificação das ligações coladas mostrou-se adequada, tendo em vista o desempenho das estruturas.
- A técnica proposta para a feitura das estruturas mostrou-se plenamente viável e com desempenho muito satisfatório, considerados os resultados obtidos para os critérios de resistência e rigidez.

Com base nos estudos e conclusões deste trabalho, recomendam-se:

- Estudar o desempenho de estruturas de madeira laminada colada que exijam a colagem sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira.
- Avaliar outros níveis dos fatores estudados, inerentes ao processo de colagem, objetivando elevar o valor da resistência ao cisalhamento das juntas coladas com adesivo derivado de óleo de mamona.

- Avaliar o efeito de ciclos de umidade relativa e temperatura do ar na resistência de juntas de madeira de *Eucalyptus sp.* coladas com adesivo à base de óleo de mamona.
- Desenvolver estudos de viabilidade econômica da execução de pórticos laminados colados, empregando madeira de *Eucalyptus sp.* e os adesivos resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona, visando criar alternativas para a indústria da construção civil.
- Ampliar a base de informações sobre as possibilidades de utilização do adesivo à base de óleo de mamona na feitura de estruturas de madeira laminada colada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, G.G., NEOGI, A.N. Fiber surface modification. Part VIII. The mechanism of adhesion of phenol-formaldehyde resins to cellulosic and lignocellulosic substrates. **Jornal of Adhesion**, v.3, n.1, p.13-18, 1971.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of A.S.T.M.** Philadelphia: A.S.T.M., 1994. 608p. (Standards, 4.10, wood).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of A.S.T.M.** Philadelphia: A.S.T.M., 1994. 478p. (Standards, 15.06, Adhesives).

ARAÚJO, L.C.R. **Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos.** São Carlos, 1992. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física e Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – NBR 6120.** Rio de Janeiro, 1980. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Forças devidas ao vento em edificações – NBR 6123.** Rio de Janeiro, 1988. 66p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de estruturas de madeira – NBR 7190.** Rio de Janeiro, 1997. 107p.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona.** Curitiba, 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

BARACHO JUNIOR, E. **Desenvolvimento e teste de uma tesoura de madeira com barras duplas e chapas-pregos, para telhados.** Viçosa, 1990. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.

BARALDI, L. T.; CALIL JÚNIOR, C. Critérios de dimensionamento para treliças executadas com chapas com dentes estampados. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 6. **Anais...** Florianópolis, SC. 1998. v.2. p. 101 a 122.

BERALDO, D. D., DIAS, A. A. Avaliação do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona sob diferentes condições de umidade em ensaios de resistência de emendas dentadas. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 11. **Anais...** Londrina, PR. 2008. CD-ROM.

BEZ, R. M., SZÜCS, C. P. Composição de peças estruturais de seções comerciais em madeira laminada colada: Um estudo comparativo. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 7. **Anais...** São Carlos, SP. 2000. CD-ROM.

BONO, C. T. **Madeira laminada colada na arquitetura: Sistematização de obras executadas no Brasil.** São Carlos, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BONO, C.T., INO, A. Madeira laminada colada na arquitetura: sistematização de obras executadas pelo parque produtor do Brasil. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 6. **Anais...** Florianópolis: UFSC-LEE, 1998. v.1, p.233-246.

BREUER, H. Estruturas pré-fabricadas de madeira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1. **Anais...** São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 1983. v.4, 25p.

CARVALHO FILHO, W. **Desenvolvimento de estruturas pré-fabricadas de madeira tipo “trussed-rafters”.** São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 1984. 59p.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos.** São Carlos, 1997. Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CONNER, A. H. Wood : adhesives. **Encyclopedia of materials : science and technology.** Amsterdam ; New York : Elsevier Science, Ltd.. 2001.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis* laminada e colada.** Viçosa, 1999. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

DAMIANO, A. G. R.; SALES, A. Racionalização de estruturas de cobertura para habitação de interesse social utilizando madeira de reflorestamento. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 9. **Anais...** Cuiabá, MT. 2004. CD-ROM.

DE PAULA, E. V. C. M. Ligação colada entre peças de madeira submetida a momento torçor na lâmina de cola. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1. **Anais...** São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 1983. v.2, 33p.

DESAI, S.D., PATEL, J.V., SINHA, V.K. Polyurethane adhesive system from biomaterial-based polyol for bonding wood. **International Journal of Adhesion & Adhesives**. (2003) 23:393-399.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. São Carlos, 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Física e Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

DIAS, A. A., BERALDO, D. D. Avaliação da resistência e da rigidez de protótipos de vigas de madeira laminada colada com adesivo à base de óleo de mamona. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 11. **Anais...** Londrina, PR. 2008. CD-ROM.

DIAS, A. A., AZAMBUJA, M., OLIVEIRA JÚNIOR, S. F. **Análise estatística comparativa entre adesivos poliuretanos frente ao resorcinol-formaldeído aplicados em emenda dentada estrutural para espécie *Eucalyptus grandis***. In: XVII CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.

FAVARO, J. H. B. **Caracterização química e mecânica de um adesivo poliuretano para utilização em metais**. São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

FOLLRICH, J. et al. Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat grain joints of defect-free softwood timber. **The Journal Wood Science and Technology**. (2007) 41: 501–509.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWEL, R. **Wood Chemistry and Wood Composites**. New York: CRC Press, 2005. pg. 215-278.

FRIHART, C. R. Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. **Journal of Adhesion Science and Technology**. (2009) 23: 601–617.

GALEMBECK, F.; GANDUR, M. C. "Cientistas explicam o fenômeno da adesão". **Química e Derivados**. v. 393, p. 24-32. 2001.

GENT, A.N.; HAMED, G.R. **Handbook of Adhesives**. Irving Skeist, ed., Van Nostrand Reinhold Co. New York, NY. 3 ed. 1990.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos, 2000. 106p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

KAMKE, F. A., LEE, J.N. Adhesive Penetration of Wood - A Review. **The Journal Wood and Fiber Science**. (2007) 39(2): 205–220.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Jerônimo Monteiro: Suprema, 2007. 420p.

KONNERTH, J., GINDL, W. Mechanical characterisation of wood-adhesive interphase cell walls by nanoindentation. *Holzforschung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*. (2006) 60: 429–433.

MANTILLA CARRASCO, E. V. M. Dimensionamento de ligação de peças estruturais de madeira por adesivos. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 1. *Anais...* São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 1983. v.4, p. 111-129.

MANTILLA CARRASCO, E. V., PAOLIELLO, C. Potencial plástico da madeira laminada colada. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 6. *Anais...* Florianópolis: UFSC - LEE, 1998. v.1, p.247-256.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MELO, A. V., CARRASCO, E. V. M. Análise de adesivos em madeira laminada colada. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 9. *Anais...* Cuiabá, MT. 2004. CD-ROM.

MOODY, R. C., HERNANDEZ, R., LIU, J. Y. Plywood-Capítulo 11. In: **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. U.S. Department of Agriculture, rev. 1987, 466 p.

NIEMZ, P. et al. Untersuchung zur Verteilung des Klebstoffes im Bereich der Leimfuge mittels Neutronenradiographie und Mikroskopie. **European Journal of Wood and Wood Products**. (2004) 62:424–432.

PETERSON, R.W. **Wood adhesives**. Ottawa, Forest Products Research Branch, n. 1055. 1964.

PETRAUSKI, A. **Estudo da madeira da Pindaíba (*Xilopia sericea* St. Hil.) para confecção de tesouras de telhado, com ligações de chapas e pregos**. Viçosa, 1991. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.

PETRAUSKI, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado com madeira de *Eucalyptus grandis***. Viçosa, 2000. 128 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

PETRAUSKI, A. **Metodologia e aparato de teste de resistência ao cisalhamento na torção de corpos de prova colados sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira**. Viçosa, 2012. 10 p. (Não publicado)

PIZZI, A. **Wood adhesives – chemistry and technology**. New York: MarCel Dekker, 1983. 364p.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcell Deckker, 1994. 289 p.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Deckker, 1994. 680 p.

PLEPIS, A.M.G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona**. São Carlos, 1992. Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

RHUDE, A. J. Structural glued laminated timber: history of its origins and early development. **Forest products journal**. Madison, 1996. v.46, n.1, p.15-22.

SCANAVACA JUNIOR, L. **Caracterização, silvicultural, botânica e tecnológica de *Eucalyptus Urophylla* S.T. Blake e de seu potencial para uso em serraria**. Piracicaba, 2001. 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994. p.19-32

SERRANO, L. J. P. **Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas**. Piracicaba, 2009. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SILVA, B. B. R. **Desenvolvimento de adesivos de poliuretano a base de óleo de mamona**. Porto Alegre, 2006. 67p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SKEIST, I. **Handbook of adhesives**. 2.ed. New York: Van Nostrand Reinhold. 1977. 921p.

TARGA, L. A., BALLARIN, A. W., BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, Agosto 2005, vol.25, no.2, p.291-299.

TROUGHTON, G.E. Accelerated aging of glue-wood bonds. **Wood Science**, v.1, n.3, p.172-176, 1968.

VALE, I. M. R. do; INO, A. O sistema de cobertura VPL – vigas laminadas pregadas. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 11. **Anais...** Londrina, PR. 2008. CD-ROM.

VALLE, A. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. São Paulo, 1999. 169p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

VICK, C.B. Adhesive bonding of wood materials. **Wood handbook – wood as an engineering material**. Gen.Tech.Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Serv., Forest Prod. Lab. Madison, WI. 1999. Chapter 9:pp 9/1–9/25.

VILAR, W. D. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**, 3^a ed., Vilar Consultoria, 2002. Disponível em: <http://www.poliuretanos.com.br/> Acesso em: 25/09/2012.

WILKINSON, T. L. **Longtime performance of trussed rafters with different connection systems**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1984. 19p. (Research. paper, FPL 444).

WU, S., PAUL, C.W. **Moisture curing, liquid polyurethane adhesive for structural wood bonding applications**. Forest Products Society, Wood Adhesives 2005. Disponível em: <http://www.forestprod.org/adhesives05powerpoints.html/> Acesso em: 11/10/2012.