

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MAGDA LORENA CHILITO AMAYA

**Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças
de madeira**

São Carlos - SP
2013

MAGDA LORENA CHILITO AMAYA

**Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças
de madeira**

Dissertação apresentada ao Departamento
de Engenharia de Estruturas da EESC-USP
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil – Área Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

VERSÃO CORRIGIDA
A versão original encontra-se na
Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos - SP
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C537r Chilito Amaya, Magda Lorena
Reforço de emendas dentadas com compósitos de
fibras em peças de madeira / Magda Lorena Chilito
Amaya; orientador Antonio Alves Dias. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Compósitos. 2. Fibras naturais. 3. Sisal. 4.
Curauá. 5. Fibra de vidro. 6. Reforço de emendas
dentadas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MAGDA LORENA CHILITO AMAYA**.

Título da dissertação: "Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira".

Data da defesa: 19/08/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Titular **Carlito Calil Junior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Tit. **Nilson Tadeu Máscia**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Aos motores de minha vida com todo meu amor e admiração: meus pais, César Augusto e Blanca Lilia; meus irmãos, Natalia Eugenia, Jimena e César Fernando; e a minha sobrinha Isabella.

Aos meus cunhados José Andrés, Carlos Andrés e Maria Isabel pelo carinho e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família.

À Jesús Daniel pelo seu carinho e apoio incondicional e sua família.

Ao professor Dr. Antonio Alves Dias pela excelente orientação na realização da minha pesquisa.

Aos professores, funcionários e colegas do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira – LaMEM, em especial Diego pela sua amizade, Marcio e Marília pelo companheirismo.

Aos técnicos, Douglas e João, do Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística - USP, pela realização dos ensaios mecânicos da caracterização das fibras.

À Pematec Triangel, pela doação das fibras de *curauá*, e ao professor Dr. Ricardo Carvalho da UFBA e a toda sua equipe pelo tecido de sisal.

A meus amigos colombianos no Brasil e Colômbia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudos.

A todas as demais pessoas que de alguma ou de outra forma contribuíram na realização de minha pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Siglas	v
Lista de Símbolos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Compósitos de fibras	5
2.1.1 Propriedades mecânicas à tração dos compósitos	8
2.2 Utilização de compósitos no reforço da madeira laminada colada	9
2.2.1 Modos de ruptura em ensaios de tração paralela em emendas dentadas	12
2.2.2 Utilização de fibras no reforço das emendas dentadas	13
2.2.3 Vigas de madeira reforçadas com fibras	14
2.3 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3 - MATERIAS E MÉTODOS	17
3.1 MATERIAIS	17
3.1.1 Fibras naturais e fibra sintética	18
3.1.2 Adesivos	19
3.1.3 Madeira	19
3.2 MÉTODOS	20
3.2.1 Caracterização mecânica de compósitos de fibras e resina epóxi.	20
3.2.1.1 Confecção dos compósitos com fibras e resina epóxi	21
3.2.1.2 Ensaio de tração	24
3.2.1.3 Resistência à tração dos compósitos	25
3.2.2 Classificação da madeira	26
3.2.2.1 Classificação visual	26
3.2.2.2 Classificação mecânica	27
Flexão estática	27

Vibração transversal	28
3.2.3 Resistência à tração paralela nas lâminas com dimensão estrutural	29
3.2.3.1 Confecção das emendas dentadas	30
3.2.3.2 Reforço das emendas dentadas com fibras	32
3.2.3.3 Colagem do reforço nas emendas dentadas com fibras	33
3.2.3.4 Ensaio de tração paralela em peças estruturais	35
3.2.4 Resistência à tração das emendas dentadas em corpos de prova isentos de defeitos.....	35
3.2.4.1 Confecção das emendas dentadas	36
3.2.4.2 Reforço das emendas dentadas com fibras.....	37
3.2.4.3 Colagem do reforço nas emendas dentadas com fibras	37
3.2.4.4 Ensaio de tração paralela em corpos de prova isentos de defeitos	39
4 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Caracterização mecânica de compósitos de fibras e resina epóxi.	41
4.1.1 Influência da trama.....	42
4.1.2 Caracterização dos tecidos de sisal e vidro com a resina epóxi	47
4.2 Classificação da madeira.....	50
4.2.1 Classificação visual	50
4.2.2 Classificação mecânica.....	51
4.3 Resistência à tração paralela nas lâminas com dimensão estrutural	54
4.4 Resistência à tração das emendas dentadas em corpos de prova isentos de defeitos	57
5 - CONCLUSÕES.....	65
6 - REFERÊNCIAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parâmetros geométricos das emendas dentadas. Fonte: Jokerst (1981).	10
Figura 2.2 - Emendas dentadas.	10
Figura 2.3 - Emenda dentada com comprimento 25 mm. Fonte: YINGCHENG et al., 2009.....	13
Figura 2.4 - Vigas MLC sem emenda dentada (a), com emenda dentada (b), comprimento e posição do reforço FRP (c). Fonte: YINGCHENG et al., 2009.	14
Figura 2.5 - Esquema de carregamento das vigas reforçadas à flexão quatro pontos.	15
Figura 3.1 - Fibras de <i>curauá</i> (a) e sisal (b); tecido de fibras de sisal (c) e fibra de vidro (d).....	18
Figura 3.2 - Empilhamento para secagem ao ar da madeira <i>Pinus sp</i> e controle da umidade.	19
Figura 3.3 - Costura total -CT (a), costura parcial -CP (b) e sem costura -SC (c)...	21
Figura 3.4 - União das abas nos extremos dos corpos de prova com fita adesiva...22	
Figura 3.5 - Resina epóxi AR-300 e o endurecedor AH-30 (a); aplicação do adesivo com pincel no corpo de prova, na ilustração fibra de vidro (b).....	22
Figura 3.6 - Rolo utilizado nos compósitos: fibras de <i>curauá</i> (a), tecido de fibras de sisal (b) e fibras de sisal (c).....	23
Figura 3.7 - Corte dos compósitos de tecido de fibras de sisal com serra de mão (a), comprimento inicial 320 mm (b) e comprimento final 250 mm (c).....	23
Figura 3.8 - Máquina universal de ensaio EMIC e detalhe do <i>clip-gage</i> com o corpo de prova com fibra de vidro.....	24
Figura 3.9 - Esquema do ensaio de flexão estática.	28
Figura 3.10 - Esquema do ensaio de vibração transversal	29
Figura 3.11 - Confecção da emenda dentada e detalhe das facas assas.....	30
Figura 3.12 - Aplicação do adesivo Cascophen nas emendas (a), equipamento utilizado para prensagem (b) e detalhe da emenda dentada prensada no equipamento (c).	31
Figura 3.13 - Esquema geral de uma peça com emenda dentada e reforço.....	32
Figura 3.14 - Aplicação da resina epóxi à madeira (a), primeira camada de fibra de vidro (b), retiro do ar e excesso de resina com rolo (c) e 2 camadas de fibra de vidro e aplicação da última camada de resina (d).	34
Figura 3.15 - Comprimento de 15 cm (a) e 25 cm (b), para o reforço do tratamento 3.	34
Figura 3.16 - Máquina para ensaio de tração horizontal - Metriguard.....	35
Figura 3.17 - Detalhe da emenda dentada com Cascophen (a) e corpos de prova isentos de defeitos com emenda para ensaio de tração após da usinagem (b).	36
Figura 3.18 - Aplicação da resina epóxi à madeira (a), colocação da primeira camada do reforço e aplicação da resina (b), colocação da 4ª camada (c) e detalhe da espessura das 8 camadas, 4 acima e 4 embaixo (d).....	38

Figura 3.19 - Corpos de prova isentos de defeitos sem reforço e com reforço de fibra de vidro e de sisal.	39
Figura 3.20 - Máquina universal de ensaios, AMSLER.	39
Figura 4.1 - Curva tensão deformação dos compósitos de fibras de <i>curauá</i> com resina epóxi.	43
Figura 4.2 - Curva tensão deformação dos compósitos de fibras de sisal com resina epóxi.	44
Figura 4.3 - Resistência média na tração dos compostos de fibras de sisal e <i>curauá</i>	45
Figura 4.4 - Módulo de elasticidade médio na tração dos compostos de fibras sisal e <i>curauá</i>	45
Figura 4.5 - Modos de ruptura dos compósitos de fibras naturais de <i>curauá</i> com epóxi.	46
Figura 4.6 - Modos de ruptura dos compósitos de fibras naturais de sisal com epóxi.	46
Figura 4.7 - Curva tensão deformação dos compósitos do tecido de sisal com resina epóxi.	48
Figura 4.8 - Curva tensão deformação dos compósitos da fibra de vidro com resina epóxi.	48
Figura 4.9 - Modos de ruptura dos compósitos dos tecidos de sisal.	49
Figura 4.10 - Modos de ruptura dos compósitos das fibras de vidro.	49
Figura 4.11 - Diagrama de dispersão e reta ajustada dos MOE estático e dinâmico.	52
Figura 4.12 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE estático.	52
Figura 4.13 - Diagrama de dispersão e reta ajustada dos MOE estático e dinâmico.	53
Figura 4.14 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE estático.	53
Figura 4.15 - Resistência média à tração- dimensão estrutural.	57
Figura 4.16 - Formas de ruptura à tração: na região da emenda reforçada (1 e 3) e fora da região da emenda reforçada - corpos de prova isentos de defeitos (preliminar).	58
Figura 4.17 - Resistência média à tração - corpos de prova isentos de defeitos.	61
Figura 4.18 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados - corpos de prova isentos de defeitos.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modos de ruptura em ensaios de tração paralela. Fonte: ASTM D 4688: 1999.....	12
Tabela 3.1 - Geometrias recomendadas para os corpos de prova à tração.	20
Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova confeccionados com fibras de sisal, <i>curauá</i> e vidro com resina epóxi.....	24
Tabela 3.3 - Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó. Fonte: Carreira e Dias (2006).....	26
Tabela 3.4 - Classes de densidades definidas pela norma ASTM D245: 1993.	27
Tabela 3.5 - Parâmetros geométricos das emendas dentadas (<i>fingers joints</i>) perfil vertical. Fonte: Adotado de Hernández (1998).	30
Tabela 4.1 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para os compósitos de fibras de <i>curauá</i>	42
Tabela 4.2 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para os compósitos de fibras de sisal.	42
Tabela 4.3 - Resultados da ANOVA para as tramas dos compósitos de fibras <i>curauá</i> e sisal.....	45
Tabela 4.4 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para o tecido de sisal.	47
Tabela 4.5 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para as fibras de vidro.....	47
Tabela 4.6 - Distribuição das lâminas dos grupos em cada tratamento.	50
Tabela 4.7 - Distribuição das 13 peças para ensaios preliminares.....	50
Tabela 4.8 - Resultados dos módulos de elasticidade: estático e dinâmico.	51
Tabela 4.9 - Estatística descritiva dos MOE estático (E) e dinâmico (D) para as 61 peças.	51
Tabela 4.10 - Resultados da ANOVA do modelo de regressão.	54
Tabela 4.11 - Resultados da resistência à tração - dimensão estrutural.	56
Tabela 4.12 - Resultados da resistência à tração - corpos de prova isentos de defeitos.	59
Tabela 4.13 - Resultados da ANOVA para os tratamentos T1, T2 e T3.....	62
Tabela 4.14 - Resultados do teste Tukey para os tratamentos T1, T2 e T3.....	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEAPAC	Centro de Apoio a Projetos de Ação Comunitária
DIN	Instituto Alemão para Normalização
FRP	Polímeros reforçados com fibras
LaMEM	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras
MLC	Madeira Laminada Colada
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{fibra}	Área da seção transversal das fibras
$A_{\text{gt},0}$	Área do trecho da emenda dentada
c	Comprimento das fibras
ρ	Densidade da fibra
$f_{\text{gt},0}$	Resistência à tração paralela às fibras das emendas dentadas
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
$F_{t0,\text{Max}}$	Força máxima de tração aplicada ao corpo de prova durante o ensaio
m	Massa inicial das fibras
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura

RESUMO

AMAYA, M. L. C. **Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira.** 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o uso de compósitos de fibras e resina epóxi no reforço de emendas dentadas em peças de madeira. Inicialmente, foi avaliada a influência da trama das fibras de sisal e de curauá sem tratamento nenhum nas propriedades mecânicas à tração dos compósitos com resina epóxi. Igualmente, foram caracterizados na tração compósitos de fibras de vidro e tecidos de sisal. Posteriormente, foi avaliada a resistência à tração paralela às fibras de peças de madeira *Pinus sp* em tamanho estrutural para três tipos de tratamentos: (1) peças sem emendas e sem reforço, (2) peças com emendas e sem reforço e (3) peças com emendas reforçadas por compósitos de fibras de vidro e resina epóxi. Também foram realizados testes de tração em corpos de prova isentos de defeitos com emendas dentadas usando madeira Lyptus® para três casos: (1) sem reforço na emenda, (2) reforço na emenda com fibra de vidro e (3) reforço na emenda com tecido de sisal. Os resultados da influência da trama das fibras de sisal e curauá com a resina epóxi nos testes de tração mostraram que o tipo de trama não influenciou significativamente na resistência e no módulo de elasticidade. Na caracterização dos compósitos poliméricos, a resistência do tecido de sisal foi cerca de 44% da resistência da fibra de vidro. Nas peças estruturais, devido à baixa resistência da madeira de *Pinus sp* utilizada, não se justificou a utilização do reforço. Nos corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus® com emendas dentadas, a eficácia do reforço foi evidenciado, com aumento de 37% na resistência à tração com reforço de fibra de vidro e de 40% com reforço de tecido de sisal, em relação aos corpos de prova isentos de defeitos sem reforço.

Palavras-chave: compósitos, fibras naturais, sisal, curauá, fibra de vidro, reforço de emendas dentadas.

ABSTRACT

AMAYA, M. L. C. **Reinforcement finger joints with fibers composites in pieces of wood.** 2013. 95 p. Master Dissertation - São Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, 2013.

The present research evaluate the reinforcing of finger joints in timber pieces with composite fiber and epoxy. Initially, the influence of the weft in the tensile mechanical properties of composites using sisal fibers and curaua without any treatment was evaluated. The characterization of composites made with sisal fibers and glass fibers were also carried out. Additionally, the tensile strength parallel to the grain for pieces of *Pinus sp* in structural sizes for three types of treatments: (1) pieces without finger joints, (2) pieces unreinforced finger joints and (3) pieces reinforced finger joints with composite fiberglass and epoxy resin, was evaluated. Also, was evaluated the tensile strength of the finger joint test specimens Lyptus® wood for three cases: (1) unreinforced finger joint, (2) reinforced finger jointed with fiberglass and (3) reinforced finger jointed with fabric sisal. The results of influence of the weft sisal fibers and curaua with epoxy resin of tensile test showed that the weft did not significantly influence the strength and the modulus of elasticity. The characterization of polymeric composites, the strength of sisal fabric was about 44% of the fiber glass strength. The structural size pieces, the use of reinforcement it is not justified due to the low strength of the *Pinus sp* wood used. The test specimens of Lyptus® wood with finger joints, the efficacy of the reinforcement was evident, with 37% increase in tensile strength with glass fiber reinforcement and 40% with reinforcement sisal fabric, compared to specimens without reinforcement.

Keywords: composites, natural fibers, sisal, curaua, fiberglass, reinforcement of finger joints.

1 – INTRODUÇÃO

O uso de compósitos reforçados com fibras destaca-se por melhorar as propriedades mecânicas de resistência e de rigidez, sendo utilizados principalmente na recuperação do elemento, impedindo a propagação ou ocorrência de novas fissuras; ou como reforço aumentando a capacidade de carga ou diminuição da deformação quando comparados com elementos não reforçados.

Nas vigas de Madeira Laminada Colada (MLC), na maioria das vezes a falha ocorre na região tracionada, em local de menor resistência da peça, geralmente com defeito ou emenda dentada.

Uma das formas de melhorar o desempenho de elementos solicitados por flexão é aumentar a resistência das emendas dentadas, o que pode ser conseguido

com o reforço com fibras, utilizando-se lâminas com emendas reforçadas apenas nas regiões com maior solicitação por tração, por razões de economia.

As fibras naturais são uma boa alternativa para essa finalidade por apresentarem baixo custo, por serem leves, biodegradáveis, não poluentes, e por apresentar boas propriedades mecânicas na tração.

O interesse de utilizar fibras naturais como reforço de elementos estruturais de madeira surgiu da necessidade de empregar materiais de fontes naturais e renováveis preservando assim o meio ambiente, além de incentivar a futuras pesquisas o uso de novas fibras naturais como materiais de reforço.

O presente estudo avaliou a utilização de fibras de sisal, de *curauá* e de vidro no reforço de emendas dentadas em peças de madeira, por meio da caracterização mecânica de compósitos de fibras com resina epóxi, e de testes de tração em peças de madeira em tamanho estrutural e em corpos de prova isentos de defeitos, possuindo emendas com e sem reforço.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o uso de compósitos poliméricos constituídos de fibras naturais e de vidro no reforço de emendas dentadas em peças destinadas à produção de madeira laminada colada.

Os objetivos específicos foram:

- determinar a influência da trama das fibras de sisal e *curauá* nas propriedades mecânicas dos compósitos com resina epóxi;

- avaliar a resistência à tração dos compósitos de fibras de tecido de sisal e de fibra de vidro com resina epóxi;
- comparar a resistência à tração de lâminas com dimensão estrutural; sem emendas dentadas e sem reforço, com emendas dentadas e sem reforço, e com emendas dentadas com reforço de compósitos de fibras e resina epóxi;
- comparar, em corpos de prova isentos de defeitos, a influência do reforço de fibras de tecido de sisal e de fibra de vidro, na resistência à tração.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item apresenta uma revisão da bibliografia referente a compósitos poliméricos reforçados com fibras, propriedades mecânicas à tração dos compósitos, utilização de compósitos no reforço da madeira laminada colada, modos de ruptura em ensaios de tração paralela em emendas dentadas, utilização de fibras no reforço das emendas e vigas de madeira reforçadas com fibras.

2.1 COMPÓSITOS DE FIBRAS

Os materiais reforçados com fibras (compósitos) têm como finalidade melhorar as propriedades mecânicas do material, que por si só não seria adequado para o uso na engenharia (AGOPYAN, 1988).

As fibras naturais vêm sendo utilizadas como reforço de compósitos por apresentarem baixo custo; baixa densidade da ordem de 1100 kg/m^3 a 1500 kg/m^3 se comparado com a densidade da fibra de vidro de 2500 kg/m^3 (Spinacé et al., 2009, 2011), por serem recicláveis e biodegradáveis. Estas vantagens fazem das fibras naturais um potencial de substituição das fibras de vidro em materiais compósitos (LI; TABILI; PANIGRAHI, 2007).

As propriedades das fibras naturais variam de acordo com a região, clima e a idade da planta (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

Os componentes básicos das fibras são: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é o componente essencial das fibras das plantas. De acordo com Bledzki e Gassan (1999) a quantidade de celulose contribui nas propriedades mecânicas das fibras naturais.

Entre as fibras naturais que são utilizadas como material de reforço se destacam o sisal e *curauá* por apresentar propriedades mecânicas adequadas em relação a outras fibras naturais como rami, coco e algodão (SPINACÉ et al., 2009, 2011).

A fibra de *curauá* (*Ananas erectifolius*) é extraída das folhas através de uma máquina desfibriladora que uma vez tirada, possui uma coloração verde. A aparência do *curauá* é semelhante à da planta abacaxi. As folhas do *curauá* medem cerca de 5 cm de largura e até 1,5 m de comprimento (CEAPAC, 2010).

As propriedades das fibras de *curauá* são: densidade 1100 kg/m^3 , alongamento na ruptura 3,0%, resistência à tração 509 MPa e módulo de elasticidade 19000 MPa (SPINACÉ et al., 2009).

A fibra de sisal (*Agave sisalana*) é extraída das folhas, que possuem de 8 cm a 10 cm de largura e de 1,50 m a 2,0 m de comprimento. As fibras de sisal se

apresentam na forma de tecido, cordas, fios, etc., e correspondem a cerca de 70% da produção comercial brasileira (Martin et al., 2009; Spinacé et al., 2011).

As propriedades das fibras de sisal são: densidade 1370 kg/m^3 , alongamento na ruptura 4,9% a 5,4%, resistência à tração 347 MPa a 378 MPa e módulo de elasticidade 15200 MPa (SAVASTANO; DANTAS; AGOPYAN, 1994).

Outra fibra amplamente utilizada para reforço de compósitos poliméricos são as fibras de vidro por apresentarem alta resistência à tração. Segundo Mallick (2008) as fibras de vidro do tipo E (*electrical*) e S (*high tensile strength*) são as mais utilizadas como reforço, outro tipo são as fibras de vidro C (*chemical*). As fibras de vidro E apresentam baixo custo comercialmente. As fibras de vidro S originalmente desenvolvidas para componentes de aviões e carcaças de mísseis tem a maior resistência à tração.

As propriedades das fibras de vidro E são: densidade 2550 kg/m^3 , resistência à tração 900 MPa e módulo de elasticidade 76000 MPa (FIORELLI, 2002).

As fibras utilizadas como reforço precisam de um material que envolva o feixe de filamentos, que penetre em cada fibra, e que façam delas prontas para usar. O material referido é a matriz. As matrizes poliméricas geralmente são chamadas de resinas e segundo Hyer (1998) e Mallick (2008) suas funções são as de manter as fibras no lugar e de transferir as tensões entre as fibras.

Há dois tipos básicos de resinas, as termofixas e termoplásticas. As resinas termofixas sofrem uma transformação química irreversível quando são aquecidos, chamado de cura; se elas são aquecidas após terem sido curadas, elas não se derretem, elas mantêm sua forma até que começam a decompor-se termicamente a temperaturas elevadas. Segundo Mendonça (2001) as resinas epóxi e poliéster são

as mais usadas por serem menos afetadas pela variação de temperatura. As resinas termoplásticas sofrem uma transformação química reversível, derretem quando aquecidos e solidificam quando esfriada.

2.1.1 Propriedades mecânicas à tração dos compósitos

Nos ensaios à tração são determinadas a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Fiorelli (2002) avaliou as propriedades mecânicas de tração dos compósitos de fibras de vidro e de carbono com adesivos à base de mamona, Cascophen e epóxi; variando o número de camadas. Os resultados indicaram melhor comportamento para o adesivo epóxi e concluiu que o uso de 1 camada de fibra de carbono equivale ao uso de 3 camadas de fibra de vidro.

Silva (2003) desenvolveu compósitos de fibras de sisal e de coco com resina poliuretana de óleo de mamona na tração, obtendo o melhor desempenho mecânico para os compósitos com fibras de sisal.

Carvalho (2005) avaliou as propriedades mecânicas de tração de compósitos de tecidos de sisal com resina epóxi e poliuretana derivada do óleo de mamona. Os resultados mostraram o melhor desempenho para os compósitos com resina epóxi.

Fiorelli (2005) comparou as propriedades mecânicas de tração de compósitos de fibras de vidro com resina epóxi para dois tipos de tecidos: UF-0900 e UF-0076. Os resultados obtidos mostraram que o tecido UF-0900 apresentava resistência à tração superior de 12% e módulo de elasticidade inferior de 21% quando comparado com o tecido UF-0076.

Fortes e Dias (2011), avaliaram na tração compósitos poliméricos de fibras longas de sisal, piaçava e *curauá* com resina epóxi. Os autores concluíram que os compósitos de fibra de sisal e *curauá* apresentaram desempenho muito superior às fibras de piaçava.

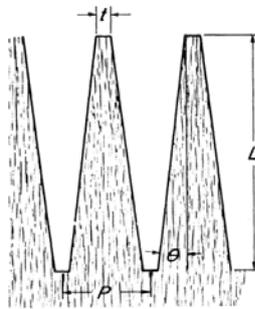
2.2 UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS NO REFORÇO DA MADEIRA LAMINADA COLADA

O uso de Madeira Laminada Colada (MLC) é uma boa alternativa para construções com as mais variadas formas estéticas e estruturais, por ter boas propriedades físicas, resistência e rigidez se torna um material estrutural versátil, além de ter a grande vantagem de poder utilizar madeira de reflorestamento e de ser facilmente trabalhável.

A MLC é constituída por lâminas de madeira dispostas com as fibras paralelas ao eixo da peça, unidas entre si por meio de um adesivo, formando desta maneira peças com diferentes formas e dimensões. Na confecção das vigas MLC, a versão em implementação da norma ABNT NBR 7190 (Projeto de estruturas de madeira, 2011), recomenda utilizar peças com densidade aparente entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$, dimensão da lâmina com comprimento superior a 100 cm e espessura máxima de 5 cm. Quanto à qualidade da madeira, considera necessária a classificação das peças estruturais pelo método visual e mecânico. De acordo com Dias, Calil e Rocco (2009), na produção das peças de MLC são utilizadas lâminas de melhor resistência nas zonas onde ocorrem as máximas tensões de compressão e de tração.

Na união longitudinal da lâmina são utilizadas emendas dentadas. De acordo com Jokerst (1981), as emendas dentadas podem ser utilizadas para remoção de defeitos que limitam a resistência e rigidez da madeira.

A Figura 2.1 apresenta os parâmetros geométricos da emenda dentada.



Parâmetro

L = comprimento.

P = largura do dente.

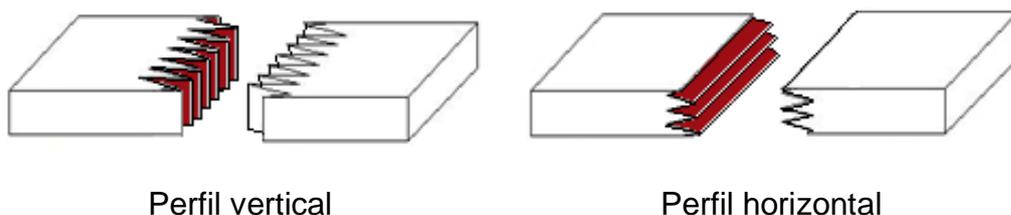
t = largura da ponta do dente.

θ = inclinação.

Figura 2.1 - Parâmetros geométricos das emendas dentadas. Fonte: Jokerst (1981).

Pesquisas desenvolvidas utilizaram diferentes comprimentos de emendas dentadas, sendo o comprimento do dente igual a 28,27 mm o mais usado na produção de MLC na América do Norte (Hernandez, 1998); o comprimento do dente de 20 mm da norma DIN 68140 (*Keilzinkenverbindungen von Holz*, 1971) é adequado para aplicação em MLC (Macêdo, 1996); e os comprimentos de 21 mm e de 28 mm de acordo com a versão em implementação da norma ABNT NBR 7190: 2011, são recomendados nas peças de MLC.

Existem duas geometrias para as emendas dentadas, o perfil vertical e o perfil horizontal, como ilustrado na Figura 2.2.



Perfil vertical

Perfil horizontal

Figura 2.2 - Emendas dentadas.

Um dos fatores que pode afetar a resistência da emenda é a geometria, Jokerst (1981) e Carrasco (1989). Outros fatores podem ser o corte da emenda, a cura do adesivo, a pressão, a umidade e densidade da madeira, entre outros (CARRASCO, 1989).

Na fabricação das emendas dentadas Jokerst (1981) descreve cinco passos básicos: 1) seleção e preparação do material; 2) formação da emenda dentada; 3) aplicação do adesivo; 4) montagem da emenda e 5) cura do adesivo.

A madeira a ser utilizada para a emenda dentada deve estar seca até um teor de umidade adequado para colagem, segundo a versão em implementação da norma ABNT NBR 7190: 2011, no momento da colagem as tábuas empregadas na fabricação da MLC deverão estar secas e com no máximo 18% de teor de umidade.

Na formação da emenda o método mais comum é utilizar ferramentas de corte (JOKERST, 1981).

Os adesivos aplicados a emendas dentadas, a versão em implementação da norma ABNT NBR 7190: 2011 recomenda que seja adesivo estrutural. A norma NBR 7190: 1997 recomenda adesivos a prova d'água e à base de fenol-formaldeído sob pressão.

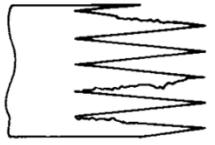
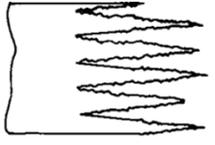
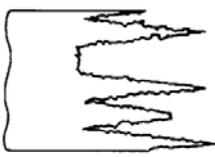
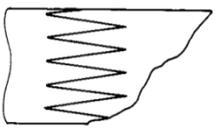
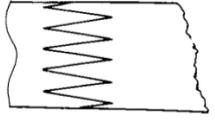
Para a confecção da emenda, após a aplicação do adesivo, o próximo passo é o alinhamento da junta e aplicação da pressão. A versão em implementação da norma ABNT NBR 7190: 2011, recomenda pressão mínima de 0,7 MPa para madeiras de densidade inferior ou igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$, e 1,2 MPa para madeiras de densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$.

O passo final é a cura do adesivo, normalmente realizada à temperatura ambiente.

2.2.1 Modos de ruptura em ensaios de tração paralela em emendas dentadas

A norma ASTM D 4688 (*Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*, 1999) avalia os modos de ruptura obtidos pelo o ensaio de resistência à tração em emendas dentadas. A Tabela 2.1 apresenta os modos de ruptura.

Tabela 2.1 - Modos de ruptura em ensaios de tração paralela. Fonte: ASTM D 4688: 1999.

Modo	Descrição	Exemplo
1	Ruptura, na maioria das vezes rompe ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas de (ruptura na madeira < 70%).	
2	Ruptura, na maioria das vezes rompe ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura na madeira > 70%).	
3	Ruptura, na maioria das vezes rompe ao longo do perfil da emenda, mas com alguma ruptura na base dos dentes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil.	
4	Ruptura, na maioria das vezes rompe na base das emendas dentadas. Poucas falhas ao longo do perfil.	
5	Ruptura que começa na emenda (possivelmente devido a um concentrador de tensão) e prossegue fora da emenda. Praticamente 100% das rupturas são na madeira.	
6	Ruptura é fora da emenda (não influenciada pela emenda) – toda a ruptura é na madeira.	

Azambuja (2006) observou que a maior frequência das rupturas à tração das lâminas de dimensão estrutural com emendas dentadas e adesivo Cascophen foi o

modo 4 (ruptura na base das emendas dentadas) para o gênero *Pinus* e o modo 1 (falha na colagem) para madeiras do gênero *Eucalyptus*.

2.2.2 Utilização de fibras no reforço das emendas dentadas

Bui; Milner e Williams (1996) utilizaram compósitos de fibra de vidro e resina epóxi para aumentar a resistência à tração das emendas dentadas, os resultados da resistência à tração mostraram aumentos entre 40% e 60% com 400 g/m² e 800 g/m² de tecido de fibra de vidro, respectivamente. Descreveram dois modos de falha para as lâminas com emendas dentadas reforçadas:

- Modo I: A ruptura inicia pela emenda dentada, isto é, assumindo a emenda dentada falha primeiro após no reforço.
- Modo II: Ruptura por cisalhamento na linha de cola, a resistência do reforço da fibra de vidro é limitada pela ligação entre o adesivo epóxi e a madeira; isto é, a resistência do reforço da fibra de vidro é a resistência ao cisalhamento.

Yingcheng H. et al. (2009) realizaram experimentos para mostrar o efeito da posição da emenda dentada, e o comprimento e posição do reforço FRP (*Fiber Reinforced Plastic*) nas propriedades das vigas de MLC reforçadas. A Figura 2.3 apresenta os parâmetros geométricos da emenda.

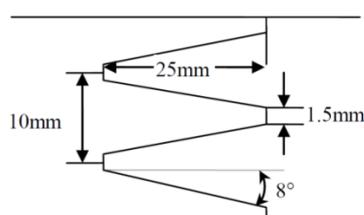


Figura 2.3 - Emenda dentada com comprimento 25 mm. Fonte: YINGCHENG et al., 2009.

Os mesmos autores avaliaram grupos sem emendas dentadas, Figura 2.4 (a); e com emendas dentadas na última lâmina da viga variando as distâncias entre a

extremidade da viga e as emendas para 300 mm, 400 mm, 500 mm e 600 mm, respectivamente, como ilustrado na Figura 2.4 (b). Os comprimentos dos FRP foram 200 mm, 400 mm, 600 mm e 1200 mm, como ilustrado na Figura 2.4.

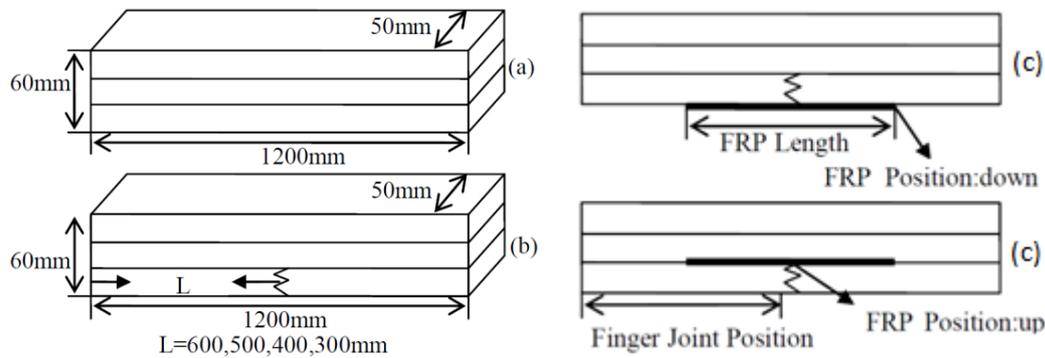


Figura 2.4 - Vigas MLC sem emenda dentada (a), com emenda dentada (b), comprimento e posição do reforço FRP (c). Fonte: YINGCHENG et al., 2009.

Concluíram que o reforço aumentou o valor de MOE e MOR da viga de MLC Poplar (*Populus tomentosa* Carr.) de 5%-15% e 5%-12%, respectivamente. A emenda dentada na posição 300 mm foi a ideal, o comprimento do FRP mais econômico e ideal foi de 600 mm. No entanto, a influência da posição do FRP nas propriedades mecânicas da MLC foi tão pouca que foi ignorada.

2.2.3 Vigas de madeira reforçadas com fibras

Os reforços das estruturas, segundo Szücs e Chang (1992), estão basicamente nas regiões das ligações entre as peças de madeira, onde as componentes de esforços de tração transversal e/ou de cisalhamento são críticas, como exemplo citam-se as vigas submetidas à flexão e os reforços das emendas das tábuas que compõem as vigas de madeira laminada colada.

No reforço de vigas de madeira, Fiorelli (2002) utilizou fibras de vidro e de carbono para verificar a eficiência do reforço, assim como adequar modelos de

cálculo para avaliar a resistência e a rigidez das vigas reforçadas. Conclui boa concordância entre os modelos teóricos e experimentais. Além disso, constatou que o aumento de resistência e de rigidez foi proporcional ao aumento do número de camadas.

Fiorelli (2005) realizou ensaios experimentais em vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro na região mais tracionada da viga. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados teóricos. Conclui que os resultados apresentam boa correlação. Quanto às rupturas, tanto para as vigas sem e com reforço, ocorreram sempre na lâmina abaixo da camada da fibra de vidro com início na emenda dentada posicionada na região de máximo momento fletor.

Carvalho (2005) avaliou a rigidez de peças de madeira submetidas à flexão com e sem reforço de compósitos de tecido de sisal. Os resultados apresentaram aumento de rigidez para as peças com reforço em relação às peças sem reforço e conclui que os compósitos de sisal e epóxi são suficientemente rígidos para reforçar estruturas de madeira.

Vanerek e Hradil (2007) reforçaram vigas de madeira maciça e laminada colada com compósitos de fibras de vidro e de carbono e resina epóxi. A Figura 2.5 apresenta o esquema do ensaio à flexão quatro pontos das vigas reforçadas.

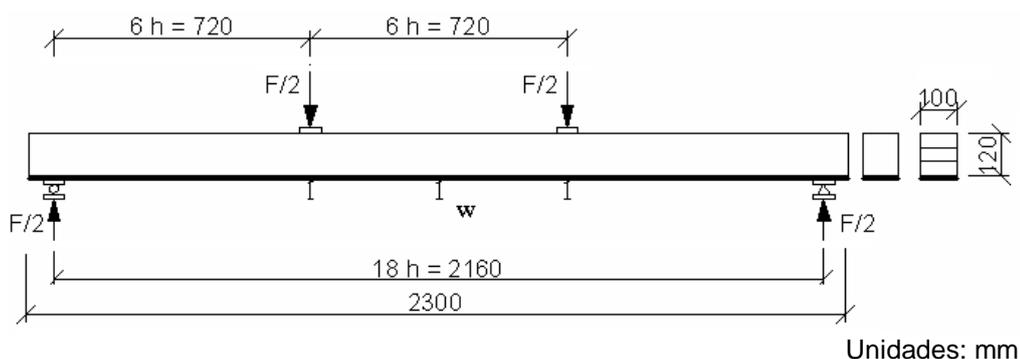


Figura 2.5 - Esquema de carregamento das vigas reforçadas à flexão quatro pontos.
Fonte: VANERЕК e HRADIL, 2007.

Os resultados indicaram aumento na capacidade de carga, sendo observado na maioria dos casos para a madeira maciça falha frágil do compósito aplicado do lado da tração e para outros casos falha pela presença de nós onde a ruptura ocorreu diretamente nesses locais. Para a MLC, o reforço na borda inferior impediu falha na emenda dentada, no entanto em alguns casos ocorreu falha prematura no local das emendas dentadas.

2.3 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais compósitos reforçados com fibras naturais mostram-se viáveis como material de reforço por serem leves, biodegradáveis e por apresentar boas propriedades mecânicas na tração.

A emenda dentada é influenciada pela geometria, processos de fabricação como corte da emenda, cura do adesivo, pressão, além de outros fatores como umidade e densidade da madeira.

Nas vigas de MLC, reforçadas ou não, a ruptura se inicia nas regiões mais tracionadas, geralmente na região da emenda dentada posicionada na região de máxima tração.

Assim, presume-se que o reforço das emendas dentadas poderá aumentar a resistência dos elementos de MLC solicitados por flexão.

3 - MATERIAS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os materiais e os métodos que foram desenvolvidos no presente trabalho, para a caracterização mecânica de compósitos de fibras e resina epóxi, a classificação da madeira, a resistência à tração paralela nas lâminas com dimensão estrutural e a resistência à tração das emendas dentadas em corpos de prova isentos de defeitos.

3.1 MATERIAIS

Este item descreve os materiais utilizados na presente pesquisa.

3.1.1 Fibras naturais e fibra sintética

A Figura 3.1 mostra as fibras de *curauá*, sisal e vidro utilizadas na caracterização das fibras com resina epóxi e como reforço nas juntas das emendas dentadas.

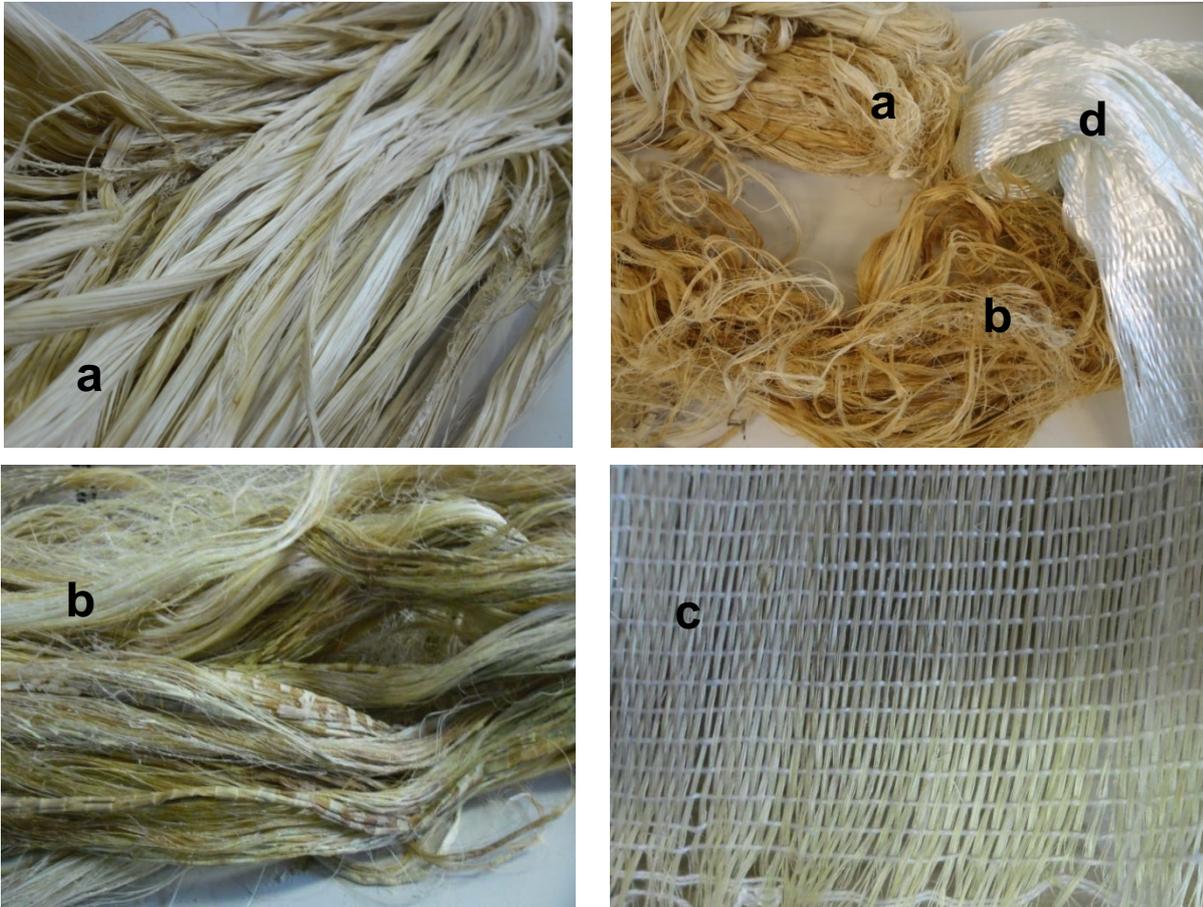


Figura 3.1 - Fibras de *curauá* (a) e sisal (b); tecido de fibras de sisal (c) e fibra de vidro (d).

As fibras de *curauá* foram fornecidas pela Pematec Triangel de Santarém-PA; as fibras de sisal foram obtidas do Sisal Boaventura, com comprimentos de até 110 cm e 100 cm respectivamente. As fibras foram lavadas e secas ao sol sem tratamento nenhum. O tecido de fibras de sisal confeccionado em tear de pente liso, sem tratamento nenhum foi desenvolvido por Cerchiaro (2010).

A fibra de vidro foi o tecido unidirecional UF-0900 adquirido da Fibertex®.

3.1.2 Adesivos

Na confecção dos compósitos com fibras foi utilizada resina epóxi AR-300 e o endurecedor AH-30, fabricados pela Barracuda Advanced Composites. A proporção resina: endurecedor foi 3:1, respectivamente. O tempo de cura das resinas epóxi segundo o fabricante varia entre 30 min e 12 h em temperatura ambiente.

Para a colagem das emendas dentadas foi utilizado o adesivo Cascophen RS-216-M e o endurecedor FM-60-M, da empresa Momentive™. A proporção resina: endurecedor foi 5:1, respectivamente. Segundo o fabricante, o tempo de cura do adesivo misturado varia entre 8 a 10 dias em temperatura ambiente (acima 20°C).

3.1.3 Madeira

A madeira utilizada para o estudo da resistência à tração das peças com dimensão estrutural foi o *Pinus sp*, adquiridas em uma serraria da região de São Carlos - SP. A secagem do lote composto por 120 peças de dimensões nominais 4 cm x 12 cm x 300 cm foi realizada ao ar por um período de 3 meses até atingir a umidade em torno de 12%. O controle do teor de umidade foi realizado com medidor digital, modelo DL 2000, como ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Empilhamento para secagem ao ar da madeira *Pinus sp* e controle da umidade.

A madeira utilizada no estudo da resistência à tração das emendas dentadas em corpos de prova isentos de defeitos conforme a norma ABNT NBR 7190: 1997 foi um híbrido da espécie *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, comercializada com o nome de Lyptus®.

3.2 MÉTODOS

Os métodos utilizados nas diferentes etapas do trabalho foram os seguintes: caracterização mecânica dos compósitos reforçados com fibras e resina epóxi, classificação visual das lâminas do lote *Pinus sp*, classificação mecânica obtida pelo métodos estático e dinâmico, resistência à tração das peças com dimensão estrutural, assim como a resistência à tração das emendas dentadas (*finger joints*) em corpos de prova isentos de defeitos para madeira Lyptus®.

3.2.1 Caracterização mecânica de compósitos de fibras e resina epóxi.

Na caracterização mecânica dos compósitos de fibras e resina epóxi foram determinadas as propriedades mecânicas à tração de acordo com a norma ASTM D 3039 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 1995). A geometria recomendada pela norma se apresenta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Geometrias recomendadas para os corpos de prova à tração.
Fonte: ASTM D3039: 1995.

Orientação das fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Esp. (mm)	Comprim. Aba (mm)	Esp. Aba (mm)	Ângulo da Aba (°)
0° unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

3.2.1.1 Confeção dos compósitos com fibras e resina epóxi

Os compósitos de fibras de sisal, de *curauá* e de vidro, com a resina epóxi foram confeccionados com orientação 0° unidirecional. Com o intuito de melhorar o processo de laminação dos compósitos, os comprimentos das fibras foram aumentados de 250 mm para 320 mm e as abas de fibras de vidro de 56 mm a 90 mm.

Para determinar a influência da trama das fibras nos compósitos com resina epóxi, as fibras longas e soltas de sisal (S) e de *curauá* (C) foram alinhadas e tecidas a mão com o mesmo fio da fibra natural transversalmente, porém, outras não foram tecidas, como se descreve a continuação:

$S_{\text{costura_total}}$ e $C_{\text{costura_total}}$, cada 2 cm ao longo do comprimento, Figura 3.3 (a);

$S_{\text{costura_parcial}}$ e $C_{\text{costura_parcial}}$, tecidas no meio e nos extremos, Figura 3.3 (b);

$S_{\text{sem_costura}}$ e $C_{\text{sem_costura}}$, fibras não tecidas, Figura 3.3 (c).

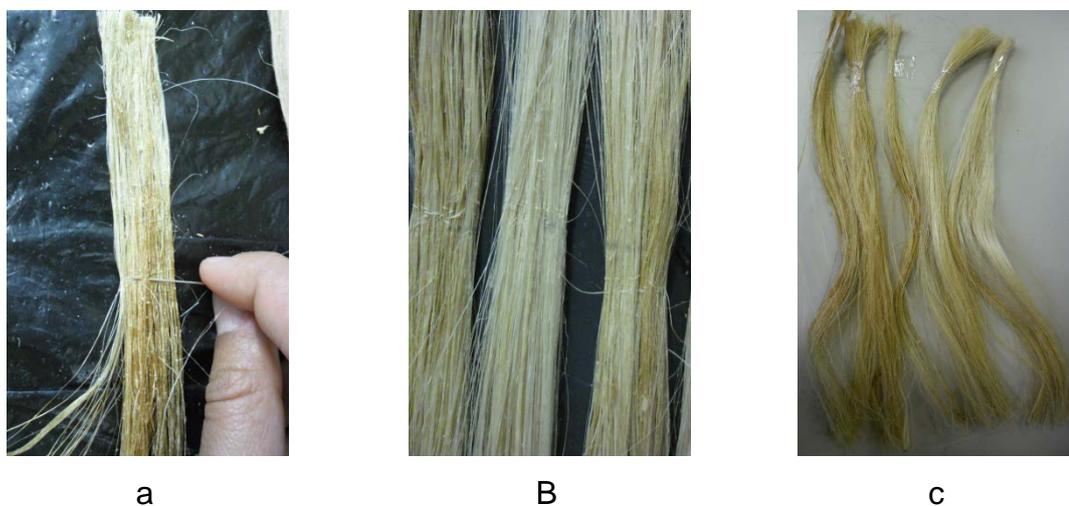


Figura 3.3 - Costura total -CT (a), costura parcial -CP (b) e sem costura -SC (c).

Em seguida, as abas e os corpos de prova com fibras foram aderidas com fita adesiva suas extremidades, como se ilustra na Figura 3.4.



Figura 3.4 - União das abas nos extremos dos corpos de prova com fita adesiva.

Utilizou-se como matriz a resina epóxi AR-300 com o endurecedor AH-30 na proporção 3:1 respectivamente. Para cada corpo de prova confeccionado foi preparado 7,2 gramas da resina com 2,4 gramas de endurecedor. O adesivo misturado foi aplicado com pincel, como apresentado na Figura 3.5.

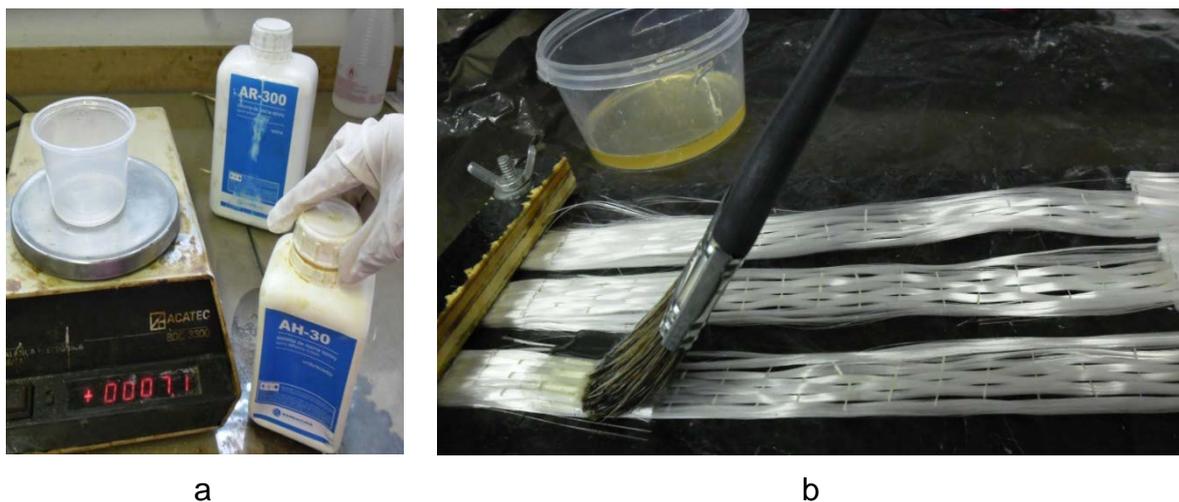


Figura 3.5 - Resina epóxi AR-300 e o endurecedor AH-30 (a); aplicação do adesivo com pincel no corpo de prova, na ilustração fibra de vidro (b).

Na retirada das bolhas de ar e do excesso de adesivo foi utilizado um rolo, como se ilustra na Figura 3.6.

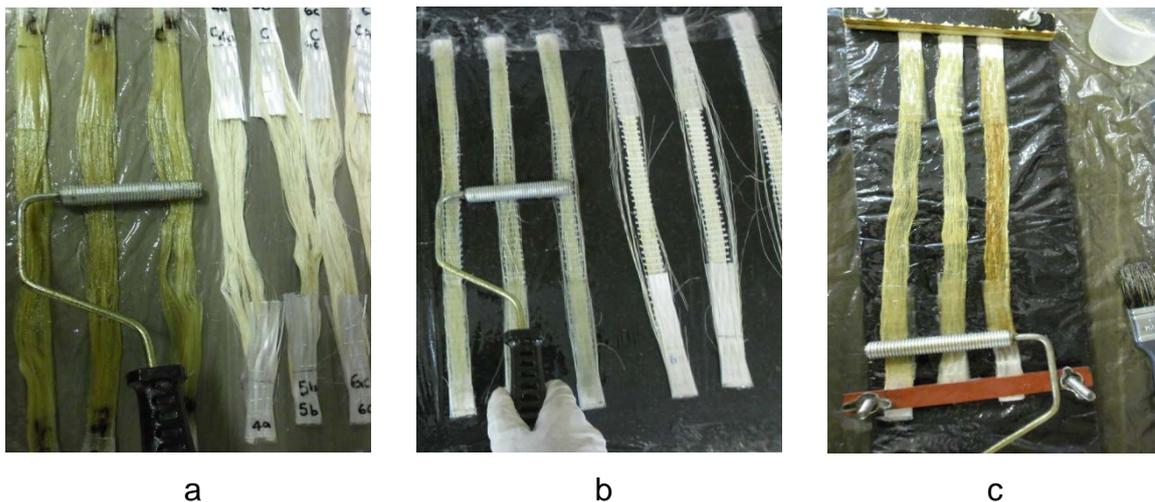


Figura 3.6 - Rolo utilizado nos compósitos: fibras de *curauá* (a), tecido de fibras de sisal (b) e fibras de sisal (c).

O processo de cura dos compósitos foi realizado em temperatura ambiente por um período superior a 24 horas. Após a cura, os comprimentos foram cortados de 320 mm a 250 mm com serra de mão, como se ilustra na Figura 3.7.

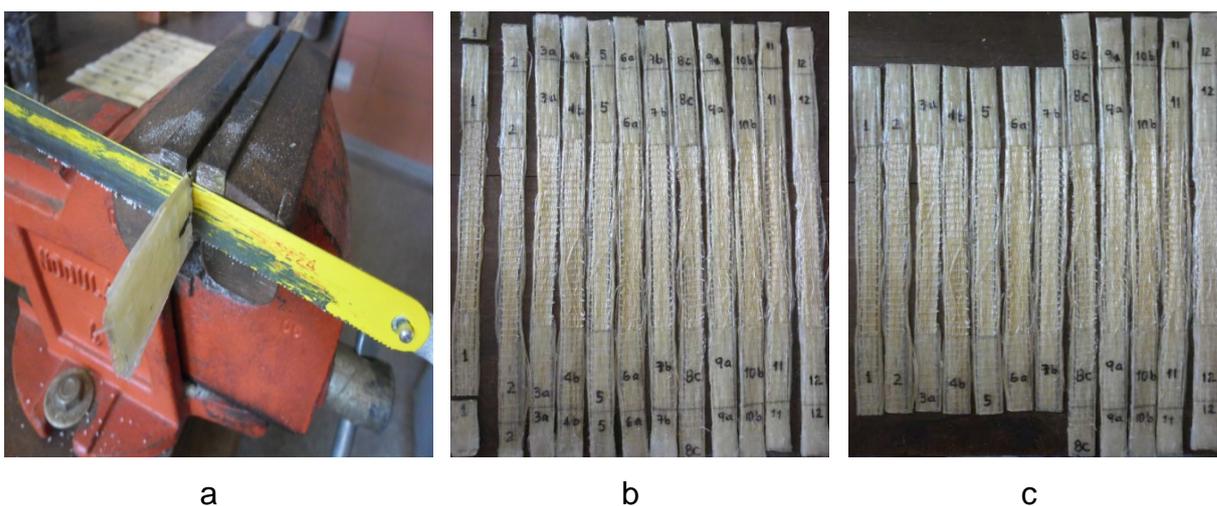


Figura 3.7 - Corte dos compósitos de tecido de fibras de sisal com serra de mão (a), comprimento inicial 320 mm (b) e comprimento final 250 mm (c).

A Tabela 3.2 apresenta a quantidade de compósitos confeccionados de fibras de sisal, de *curauá* e de vidro (tecido UF-0900) com a resina epóxi.

Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova confeccionados com fibras de sisal, *curauá* e vidro com resina epóxi.

Sisal			Tecido Sisal	Curauá			Tecido UF-0900	Total
Tecidos a mão				Tecidos a mão				
Sem costura	Costura parcial	Costura total	Sem costura	Costura parcial	Costura total			
6	6	6	12	6	6	6	12	60

3.2.1.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram executados em compósitos reforçados com fibras conforme a norma ASTM D3039: 1995, na máquina universal de ensaio da marca EMIC, modelo DL10000 com capacidade máxima de 100 KN. A velocidade do ensaio foi de 2 mm/min até a ruptura. A deformação foi determinada pela relação entre o alongamento e o comprimento medido na parte central do corpo de prova através de um extensômetro tipo "*clip-gage*" com comprimento igual a 25 mm. Após a realização dos ensaios foram observados os tipos de falha. A Figura 3.8 apresenta a máquina universal de ensaio e o detalhe do extensômetro tipo *clip-gage*. O equipamento se encontra no laboratório do departamento de engenharia de materiais, aeronáutica e automobilística, EESC-USP.



Figura 3.8 - Máquina universal de ensaio EMIC e detalhe do *clip-gage* com o corpo de prova com fibra de vidro.

3.2.1.3 Resistência à tração dos compósitos

A resistência à tração dos compósitos foi obtida pela razão entre a força máxima e a área das fibras.

A área das fibras foi determinada usando a expressão:

$$A_{fibra} = \frac{m}{(\rho.c)} \quad (3.1)$$

Onde:

A_{fibra} (cm²): área da seção transversal das fibras sem o adesivo;

m (g): massa inicial das fibras;

ρ (g/cm³): densidade da fibra;

c (cm): comprimento das fibras.

Este método foi adotado devido às variações apresentadas nos diâmetros das fibras ao longo do comprimento, e pela dificuldade de determinar os diâmetros das fibras.

Os valores para a densidade foram obtidos da literatura. Para a fibra de sisal foi utilizado o valor $\rho = 1370 \text{ kg/m}^3$, obtido em Savastano Jr.; Dantas; Agopyan V. (1994). Para a fibra de *curauá*, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, obtido em Spinacé et al. (2009). Para a fibra de vidro, $\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$, segundo Fiorelli (2002).

Cabe salientar que na literatura foram encontradas especificações diferentes para os valores das densidades das fibras naturais, pelo fato de ser um material natural, cuja produção depende de fatores como o tipo de solo, qualidade das mudas e micro clima entre outros.

O módulo de elasticidade foi obtido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico-linear, no intervalo entre 10% e 40% da resistência de tração.

3.2.2 Classificação da madeira

3.2.2.1 Classificação visual

Foi realizada a classificação visual de 120 peças de madeira *Pinus sp* baseados nos critérios de Carreira e Dias (2006) para avaliar as classes de qualidade da madeira. Nas peças foram observados presença de defeitos como empenamentos, inclinação das fibras e dimensão maior do nó presente nas faces da seção transversal da peça. Igualmente foram definidas as classes visuais: estrutural especial (SS), estrutural N°1 (S1), estrutural N°2 (S2) e estrutural N°3 (S3), apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó.
Fonte: Carreira e Dias (2006).

Características	Classe				
	SS	N°1	N°2	N°3	
Inclinação de fibras	1:12	1:10	1:8	1:4	
Nós	Borda da face larga e face estrita	1/5	¼	1/3	1/2
	Centro da face larga	2/5	½	3/5	3/4

Juntamente com essa classificação, foi levada em consideração a classe de densidade em função da quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm de comprimento, medidos em uma linha radial representativa, Tabela 3.4.

De acordo com a recomendação de Carreira (2003), na prática, a madeira foi classificada como Densa (D) ou não-Densa (ND), sendo essa última classificação para os casos de média e leve.

Tabela 3.4 - Classes de densidades definidas pela norma ASTM D245: 1993.

Classes	Anéis/2,5 cm	Quantidade de madeira de inverno
Densa	≥6	> 1/3
	≥4	> 1/2
Média	≥4	-
Leve	< 4	-

3.2.2.2 Classificação mecânica

Após da classificação visual das 120 peças, 61 peças foram selecionadas para serem classificadas mecanicamente, determinando-se o seu módulo de elasticidade estático (ensaio de flexão estática) e dinâmico (ensaio de vibração transversal). Os ensaios foram realizados segundo o eixo de menor inércia.

Flexão estática

Para o ensaio de flexão estática foi utilizado o esquema de viga simplesmente apoiada, vão livre igual a 290 cm e força concentrada aplicada no meio do vão, como mostrado na Figura 3.9. Foram aplicados dois níveis de força (30 N e 150 N), de forma que o deslocamento vertical máximo não ultrapassasse $L/200$, de modo a não exceder o limite de proporcionalidade do material. As leituras dos deslocamentos verticais foram realizadas com relógio comparador (sensibilidade 0,01 mm) posicionado no meio do vão.



Figura 3.9 - Esquema do ensaio de flexão estática.

O módulo de elasticidade (MOE) foi determinado pela expressão 3.2:

$$MOE = \frac{\Delta PL^3}{48 \Delta v I} \quad (3.2)$$

Onde,

MOE = módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta P = 120$ N;

L = vão livre (mm);

Δv = diferença entre os deslocamentos corresponde às forças 150 N e 30 N (mm);

I = Momento de inércia para o eixo de menor inércia (mm⁴).

Vibração transversal

O ensaio de vibração transversal foi realizado por meio de um impacto aplicado na peça simplesmente apoiada (vão livre 2,90m), como ilustrado na Figura 3.10, utilizando o equipamento Transverse Vibration E-Computer, modelo 340 da Metriguard.



Figura 3.10 - Esquema do ensaio de vibração transversal

3.2.3 Resistência à tração paralela nas lâminas com dimensão estrutural

Foram realizados ensaios de tração em lâminas em dimensão estrutural com e sem emendas dentadas com e sem reforço de compósitos de fibras e resina epóxi, para avaliar a influência desse compósito na resistência das emendas.

A experimentação foi desenvolvida para 4 tipos de tratamento:

T1: peças sem emenda e sem reforço;

T2: com emenda e sem reforço;

T3: com emenda e com reforço de fibra de vidro;

T4: com emenda e com reforço de fibra natural.

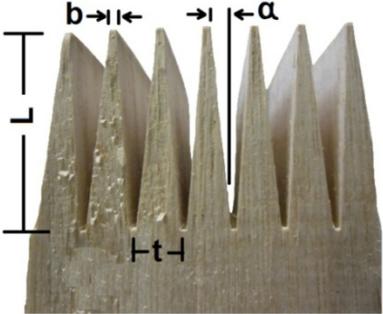
Cada tratamento foi replicado 12 vezes. Portanto, após a classificação visual, foram selecionadas 48 peças, distribuídas em 12 grupos de 4 peças, cada um deles possuindo peças de mesma classe de qualidade visual, e de forma que cada grupo possuísse peças os mais homogêneas possíveis. Os grupos G1, G2, G3, G4 e G5 foram constituídos por peças da classe SS-D; o grupo G6, com peças da classe S1-D; os grupos G7 e G8 com peças da classe S3-ND; e os grupos G9, G10, G11 e G12 com peças de qualidade S3-D.

Alem dessas peças, foram selecionadas 13 peças para ensaios preliminares, classificadas como: SS-D, S1-D, S1-ND, S2-D, S3-D e S3-ND.

3.2.3.1 Confeção das emendas dentadas

Foram confeccionadas emendas dentadas com padrão vertical na metade do comprimento das peças de madeira *Pinus sp* com as dimensões da Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros geométricos das emendas dentadas (*fingers joints*) perfil vertical. Fonte: Adotado de Hernández (1998).

	Parâmetro	Perfil
	L – comprimento (mm)	28,30
	t – largura do dente (mm)	6,98
	b – largura da ponta do dente (mm)	0,81
	α – inclinação do dente	1: 10,6

Na confecção dos dentes de comprimento 28,3 mm foram utilizadas facas asas giratórias, como se ilustra na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Confeção da emenda dentada e detalhe das facas asas.

O adesivo utilizado nas emendas dentadas foi Cascophen, a pressão de colagem foi 9 MPa com tempo mínimo de 2 segundos conforme a norma DIN 68140: 1971. O equipamento usado para a prensagem das peças com cola era composto por um pistão pneumático para aplicação da força e um anel dinanométrico para acompanhamento da carga necessária para a realização da emenda. O período da cura do adesivo foi de 10 dias em temperatura ambiente. Após do período de secagem, as peças de dimensões nominais 4 cm x 12 cm x 300 cm foram aplainadas e passaram a ter dimensões médias de 3 cm x 10 cm x 300 cm. A Figura 3.12 ilustra as etapas de colagem e pressão da emenda dentada com o adesivo Cascophen.

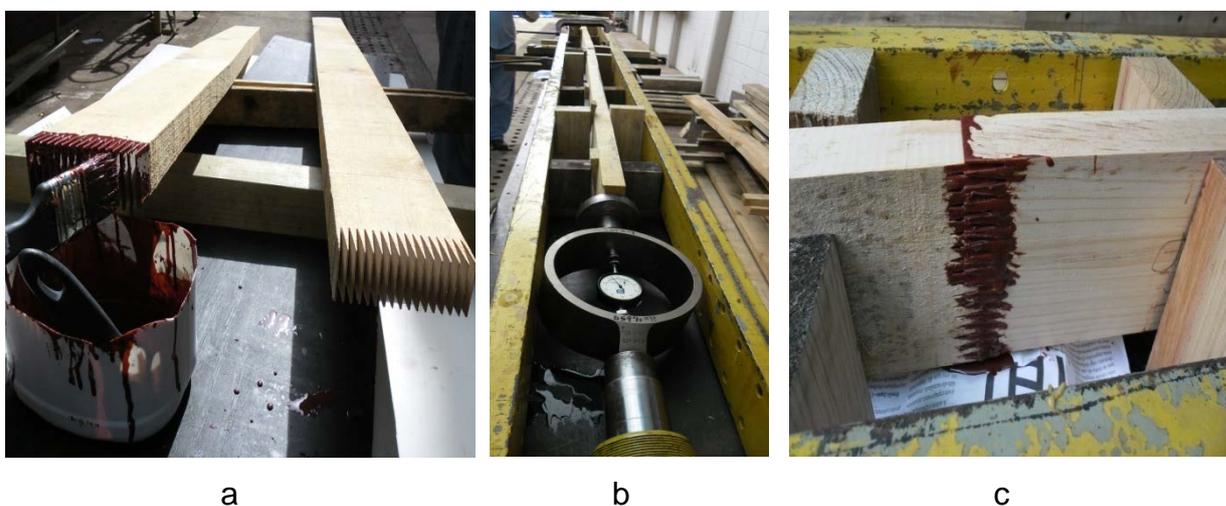


Figura 3.12 - Aplicação do adesivo Cascophen nas emendas (a), equipamento utilizado para prensagem (b) e detalhe da emenda dentada prensada no equipamento (c).

Foram confeccionadas com emenda dentada 36 peças correspondentes aos 3 tratamentos (T2, T3 e T4) que possuem emenda. As 13 peças utilizadas para os ensaios preliminares também foram emendadas.

3.2.3.2 Reforço das emendas dentadas com fibras

A Figura 3.13 apresenta o esquema do reforço aplicado na peça.

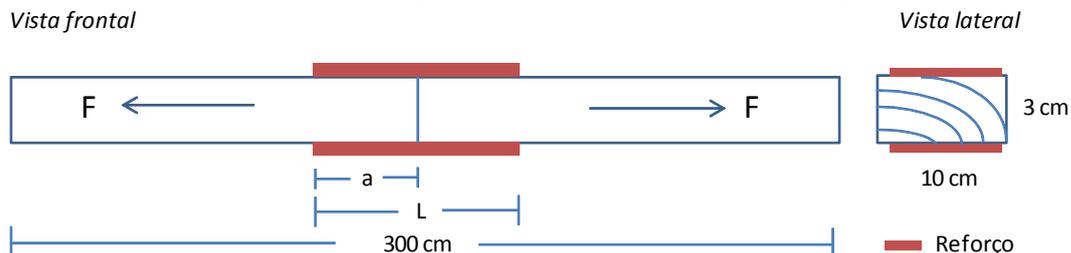


Figura 3.13 - Esquema geral de uma peça com emenda dentada e reforço.

Nas peças com dimensões estruturais, não foi realizada a parte experimental referente às peças com reforço com fibras naturais, tendo em vista os resultados que foram obtidos para as fibras de vidro, o que motivou um redirecionamento do trabalho.

Para o tratamento T3, correspondente às emendas com reforço de fibra de vidro, a quantidade de camadas utilizadas em cada lado da peça, bem como a largura e o comprimento do reforço foram definidos de acordo com os procedimentos descritos a seguir:

Inicialmente, foi definida a área necessária de fibra de vidro para recompor totalmente a resistência esperada para a peça de madeira com emenda dentada, considerando resultados obtidos anteriormente por Azambuja (2006), tendo sido adotada a resistência à tração da emenda como sendo igual a 50 MPa. Considerando uma largura igual a 10 cm para o reforço e adotando uma tensão de cisalhamento admissível de 10 MPa, baseado no trabalho de Fiorelli (2002), o comprimento do reforço (l) foi calculado pela expressão 3.3, igual a 15 cm.

$$\frac{\frac{500 \frac{kgf}{cm^2} \times (10cm \times 3cm)}{2}}{10 \text{ cm} \times a} \leq 100 \frac{kgf}{cm^2} \quad (3.3)$$

Onde: a = metade do comprimento do reforço, cm.

Considerando uma resistência a tração da fibra de vidro igual 1193 MPa, obtido nos ensaios de resistência do compósito fibra epóxi e espessura da fibra de vidro de 0,5 mm, conclui-se que havia a necessidade de um total de 2,5 camadas de fibra de vidro. Assim, foram adotadas 2 camadas de reforço (n) em cada face da peça de madeira, de acordo com a expressão 3.4.

$$n = \frac{\frac{500 \frac{kgf}{cm^2} \times (10cm \times 3cm)}{11930 \frac{kgf}{cm^2}}}{10 \text{ cm} \times 0,05 \text{ cm}} = 2 \text{ camadas} \quad (3.4)$$

Foi realizado um teste preliminar com o comprimento adotado de 15 cm e considerando o valor máximo (86 MPa) obtido no tratamento T2 (com emenda e sem reforço), o valor do comprimento do reforço (l) foi redefinido para 25 cm, de forma a garantir que não ocorresse o modo de ruptura por descolamento do reforço na interface com a madeira.

Assim, no tratamento T3 (com emenda e com reforço de fibra de vidro) foi adotado para o reforço: o comprimento de 25 cm com 4 camadas de cada lado da peça.

3.2.3.3 Colagem do reforço nas emendas dentadas com fibras

Na ligação do reforço de fibra de vidro à madeira foi usada resina epóxi AR-300. O período da cura das peças com o reforço foi de 8 dias em temperatura

ambiente. O procedimento para a colagem do reforço à madeira com 2 camadas de cada lado da peça se ilustra na Figura 3.14.

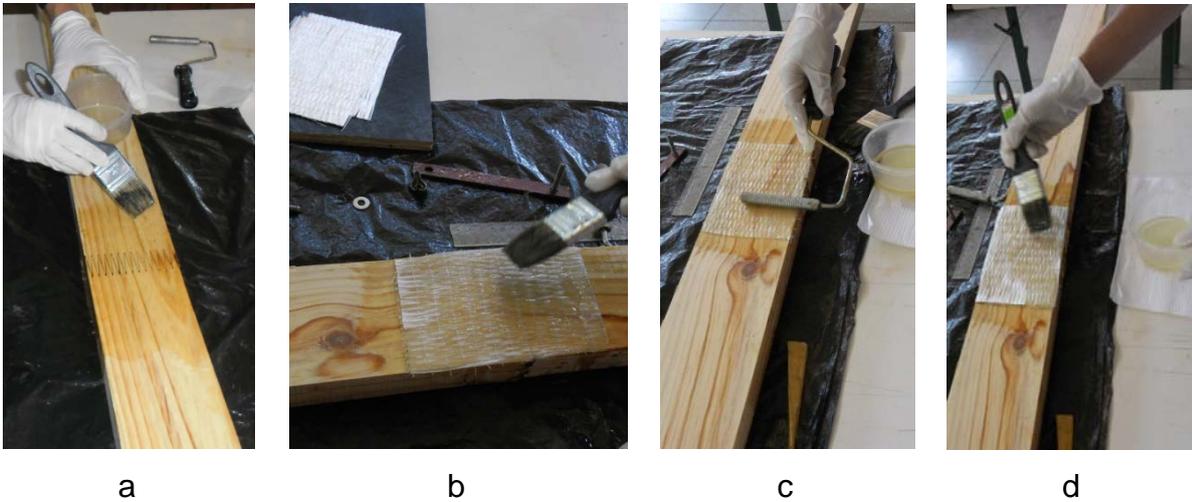


Figura 3.14 - Aplicação da resina epóxi à madeira (a), primeira camada de fibra de vidro (b), retiro do ar e excesso de resina com rolo (c) e 2 camadas de fibra de vidro e aplicação da última camada de resina (d).

A Figura 3.15 ilustra os comprimentos de 15 cm e de 25 cm no T3, com 2 camadas de cada lado.



Figura 3.15 - Comprimento de 15 cm (a) e 25 cm (b), para o reforço do tratamento 3.

3.2.3.4 Ensaio de tração paralela em peças estruturais

Os ensaios de tração paralela nas peças com dimensões estruturais foram realizados na máquina de ensaio de tração horizontal, modelo 422 da Metriguard, com capacidade para 880 kN do LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras), Figura 3.16.



Figura 3.16 - Máquina para ensaio de tração horizontal - Metriguard.

A resistência à tração paralela as fibras (f_{t0}) ou da emenda dentada ($f_{gt,0}$) da madeira *Pinus sp* foi dada pela razão entre a força máxima aplicada e a área da seção transversal da peça estrutural.

3.2.4 Resistência à tração das emendas dentadas em corpos de prova isentos de defeitos

Esses testes foram realizados como complementação do presente trabalho, tendo em vista os resultados obtidos nos ensaios das peças estruturais com reforço de fibra de vidro. Como essas peças não eram de boa qualidade, a sua resistência sem emendas foi praticamente equivalente à resistência das peças com emendas e sem reforço, o que não justificaria a necessidade de colocar reforço nas peças.

Assim, optou-se realizar testes em corpos de prova isentos de defeitos com menores dimensões, de acordo com a norma ABNT NBR 7190: 1997, usando madeira Lyptus®, que possui melhor qualidade e maior resistência, em comparação à madeira de *Pinus sp* utilizada anteriormente.

Assim, 36 corpos de prova isentos de defeitos com emendas dentadas foram confeccionados, sorteados e distribuídos aleatoriamente nos tratamentos:

T1: com emenda dentada e sem reforço;

T2: com emenda dentada e com reforço de fibra de vidro;

T3: com emenda dentada e com fibra de sisal.

3.2.4.1 Confeção das emendas dentadas

As emendas dentadas foram confeccionadas com o comprimento do dente igual a 28 mm. O adesivo utilizado foi Cascophen. A pressão da colagem foi 10 MPa aplicada na máquina universal AMSLER. O período da cura foi de 10 dias em temperatura ambiente. A Figura 3.17 ilustra os corpos de prova isentos de defeitos com emendas dentadas antes e após da usinagem.



Figura 3.17 - Detalhe da emenda dentada com Cascophen (a) e corpos de prova isentos de defeitos com emenda para ensaio de tração após da usinagem (b).

3.2.4.2 Reforço das emendas dentadas com fibras

Da mesma forma descrita para o caso das peças com dimensões estruturais, foi estimada a quantidade de camadas necessárias para cada tipo de fibra utilizada. Considerando a largura do reforço igual a 4 cm, e estimando a resistência da emenda dentada sem reforço por meio de 2 testes preliminares, concluiu-se que havia a necessidade de uma camada de reforço em cada lado da peça no caso da fibra de vidro, e quatro camadas de reforço com fibras naturais em cada lado da peça.

Da mesma maneira descrita para o caso das peças estruturais, o comprimento do reforço foi estimado em 12 cm.

3.2.4.3 Colagem do reforço nas emendas dentadas com fibras

Na ligação do reforço ao corpo de prova com emenda dentada foi utilizada a resina epóxi AR-300. O período da cura dos corpos de prova isentos de defeitos com o reforço foi 8 dias em temperatura ambiente. A Figura 3.18 ilustra o procedimento utilizado na ligação dos compósitos com o tecido de sisal e a resina epóxi com 4 camadas de cada lado aos corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus®. Para a fibra de vidro com uma camada foi utilizado o mesmo procedimento da colagem.

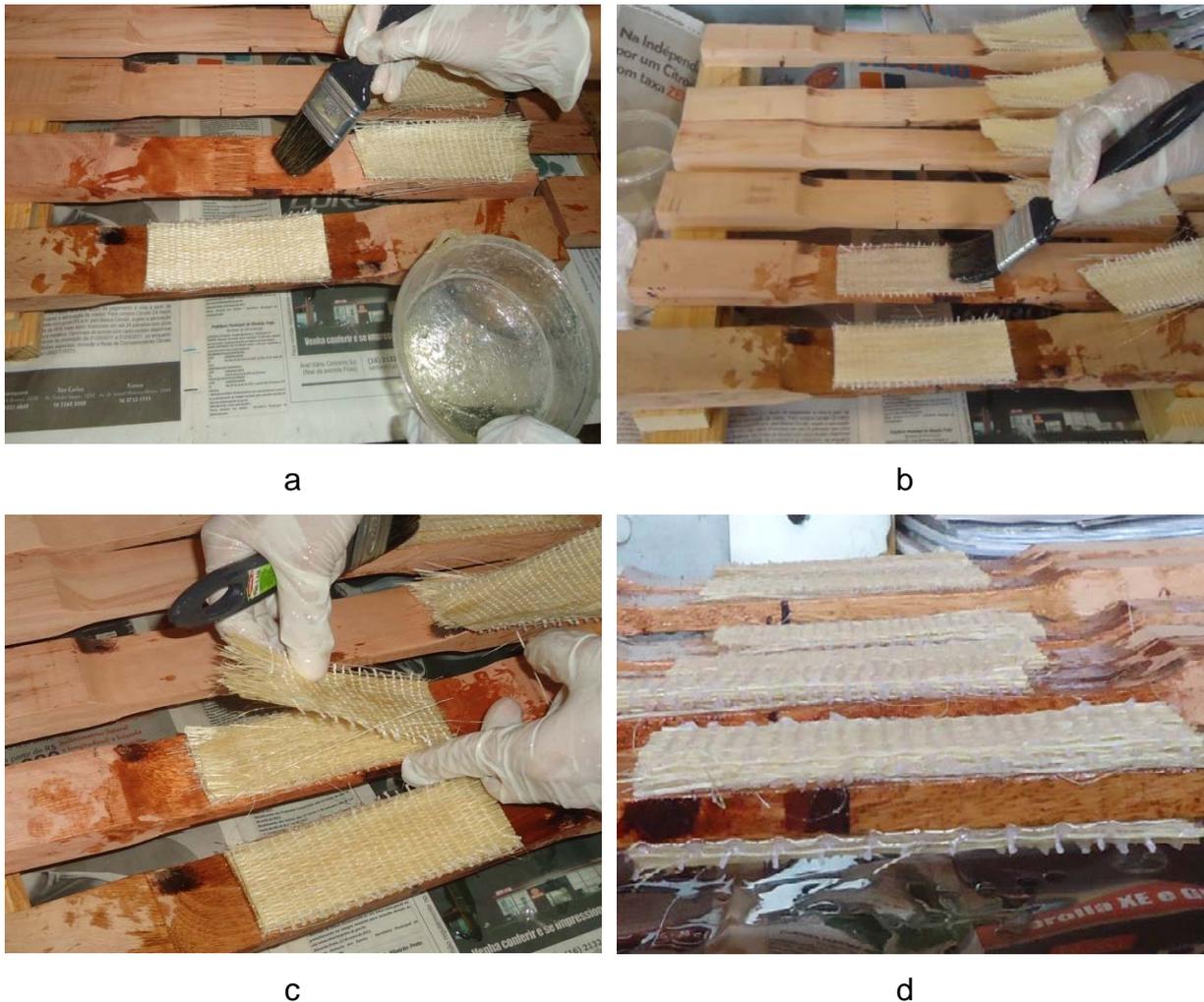


Figura 3.18 - Aplicação da resina epóxi à madeira (a), colocação da primeira camada do reforço e aplicação da resina (b), colocação da 4ª camada (c) e detalhe da espessura das 8 camadas, 4 acima e 4 embaixo (d).

A Figura 3.19 apresenta os corpos de prova isentos de defeitos para ensaios de tração para os três tratamentos: T1 sem reforço, T2 reforço de fibra de vidro com 1 camada de cada lado e T3 reforço de tecido de fibra de sisal com 4 camadas de cada lado.



Figura 3.19 - Corpos de prova isentos de defeitos sem reforço e com reforço de fibra de vidro e de sisal.

3.2.4.4 Ensaio de tração paralela em corpos de prova isentos de defeitos

Os ensaios de tração foram realizados na máquina universal de ensaios AMSLER, Figura 3.20, obtendo-se a força de ruptura. A resistência da emenda dentada à tração paralela as fibras ($f_{gt,0}$) foi dada pela razão entre a força máxima de tração e a área $A_{gt,0}$ do trecho da emenda.



Figura 3.20 - Máquina universal de ensaios, AMSLER.

4 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Este item apresenta os resultados obtidos da caracterização mecânica de compósitos de fibras e resina epóxi, classificação mecânica da madeira *Pinus sp* pelos métodos visual e mecânico, resistência à tração paralela das peças de madeira *Pinus sp* com dimensão estrutural e dos corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus®.

4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE FIBRAS E RESINA EPÓXI.

Inicialmente são apresentados os resultados referentes aos testes feitos com o objetivo de determinar a influência da trama nos compósitos, para o caso de fibras naturais de *curauá* e sisal. Posteriormente, são apresentados os resultados de

caracterização para o tecido de sisal e de fibra de vidro que foram utilizados nos reforços das emendas dentadas.

4.1.1 Influência da trama

As Tabelas 4.1e 4.2, apresentam os valores de resistência e do módulo de elasticidade para os compósitos de fibras de *curauá* e de sisal com resina epóxi respectivamente, utilizando 3 tipos de trama (costura total - CT; costura parcial – CP; sem costura – SC), bem como os valores mínimo, máximo, médio e o coeficiente de variação (CV) para cada tipo de fibra/trama.

Tabela 4.1 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para os compósitos de fibras de *curauá*.

Corpo de prova	Resistência (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)		
	CT	CP	SC	CT	CP	SC
1	345	527	544	34494	37364	25533
2	494	492	489	44171	36390	24433
3	451	409	553	28728	39309	28780
4	477	377	535	76709	24030	25952
5	364	386	352	37001	32398	40283
6	381	253	459	47363	35504	42409
Valor Mínimo:	345	253	352	28728	24030	24433
Valor Máximo:	494	527	553	76709	39309	42409
Média:	419	407	489	44744	34166	31232
CV (%):	15	24	16	38	16	26

Tabela 4.2 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para os compósitos de fibras de sisal.

Corpo de prova	Resistência (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)		
	CT	CP	SC	CT	CP	SC
1	486	355	250	48258	38332	57699
2	427	496	448	26453	41538	24156
3	385	348	434	44627	84327	29033
4	637	546	496	35929	63843	35648
5	506	552	483	41352	38076	26523
6	547	347	501	96245	29430	24299
Valor Mínimo:	385	347	250	26453	29430	24156
Valor Máximo:	637	552	501	96245	84327	57699
Média:	498	441	435	48811	49258	32893
CV (%):	18	23	22	50	42	39

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente os gráficos de tensão por deformação para os compósitos de fibras de *curauá* e de sisal com a resina epóxi, nas tramas: com costura total - CT; costura parcial - CP; sem costura - SC.

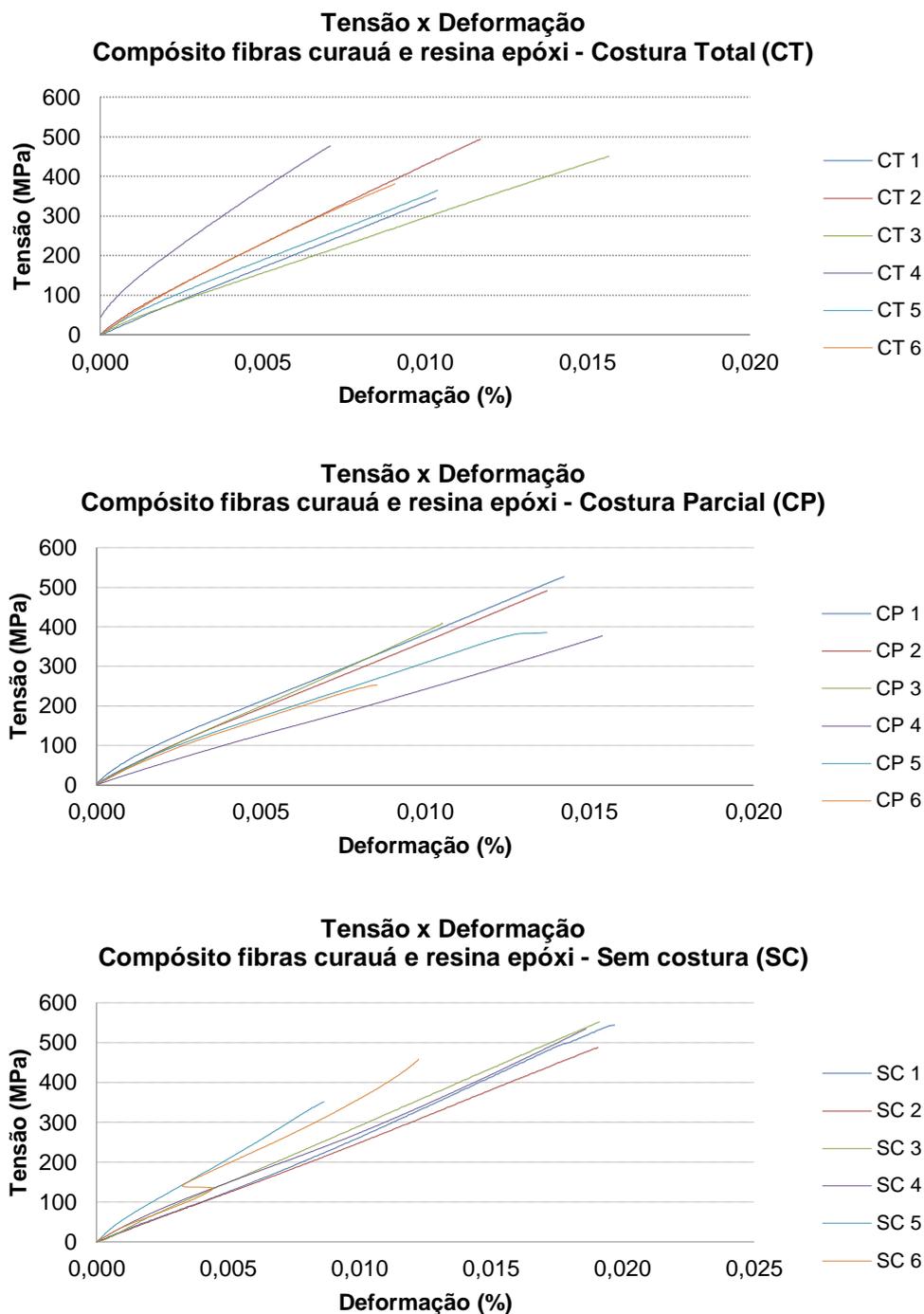


Figura 4.1 - Curva tensão deformação dos compósitos de fibras de *curauá* com resina epóxi.

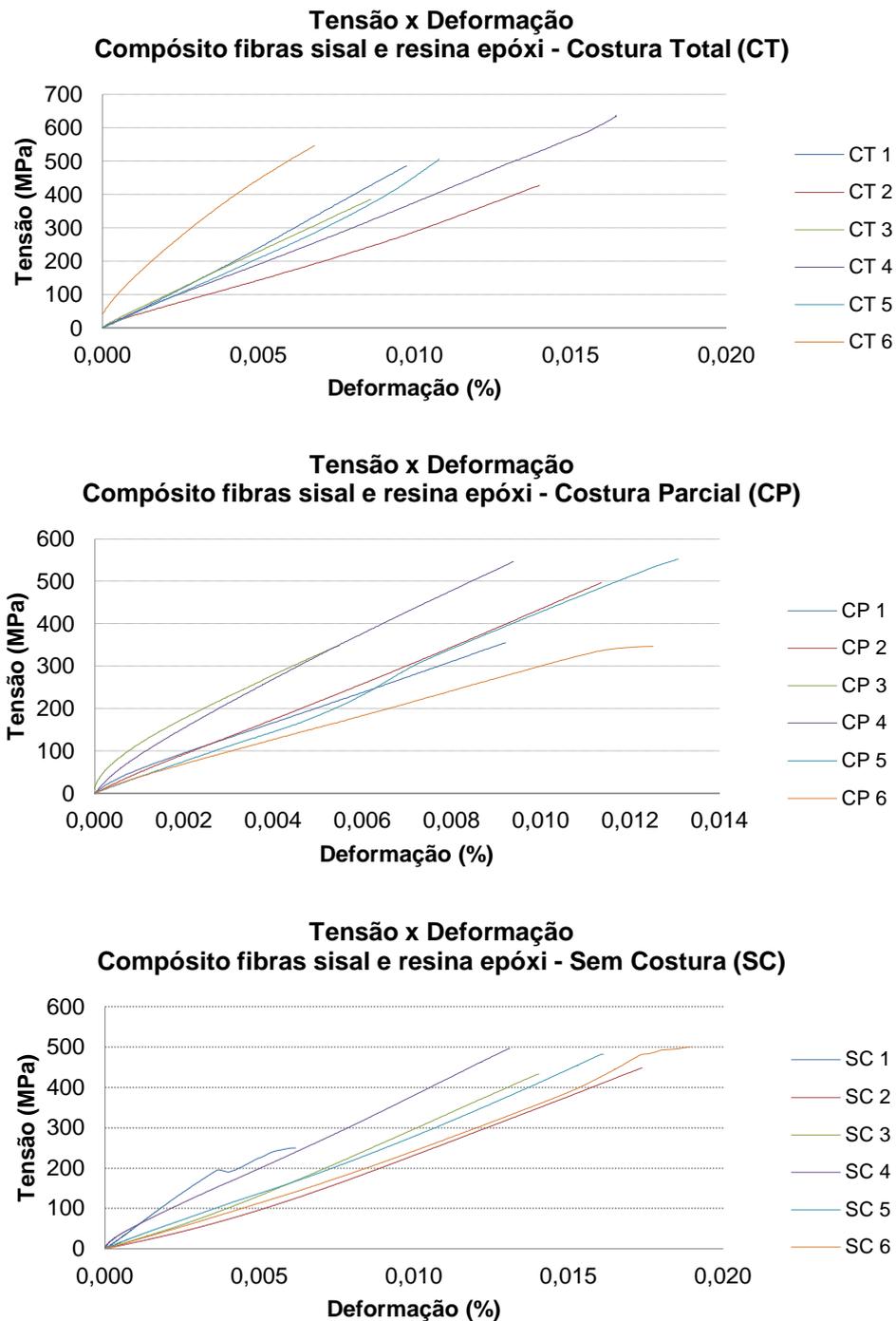


Figura 4.2 - Curva tensão deformação dos compósitos de fibras de sisal com resina epóxi.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam respectivamente os resultados médios da resistência e do módulo de elasticidade dos compósitos de fibras naturais (sisal e *curauá*) com resina epóxi.

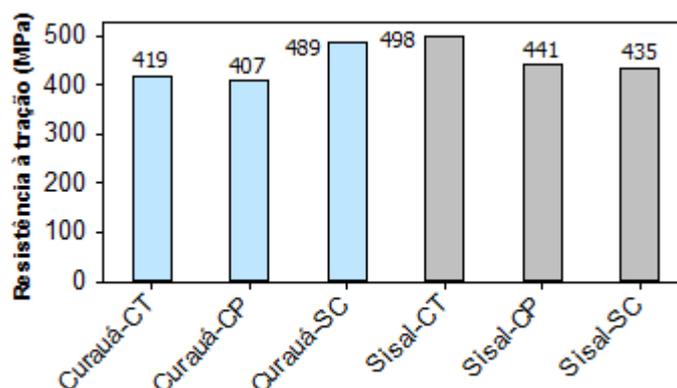


Figura 4.3 - Resistência média na tração dos compostos de fibras de sisal e *curauá*.

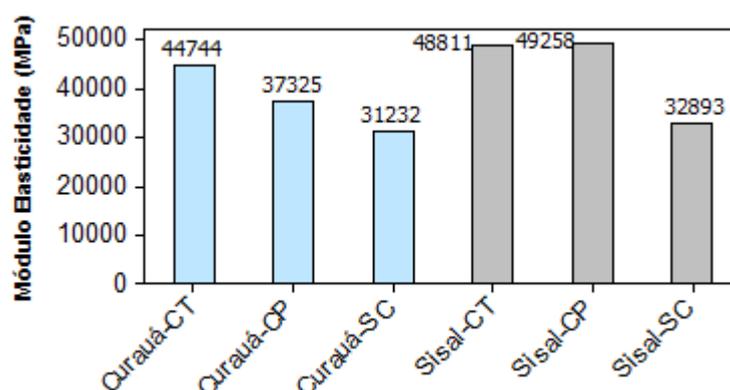


Figura 4.4 - Módulo de elasticidade médio na tração dos compostos de fibras sisal e *curauá*.

Foi realizada uma análise estatística utilizando uma análise de variância (ANOVA) ao nível de significância (α) de 5%, para determinar a influência da trama nos compósitos das fibras *curauá* e sisal; tendo como hipótese nula (H_0) a equivalência entre médias das tramas e a hipótese alternativa (H_1) a não equivalência. P-valor $> \alpha$ do teste implica em aceitar a H_0 , rejeitando-a em caso contrário. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da ANOVA.

Tabela 4.3 - Resultados da ANOVA para as tramas dos compósitos de fibras *curauá* e sisal.

Compósito	P-valor	
	Resistência	Módulo de elasticidade
Reforço (sisal; <i>curauá</i>)	0,504	0,209
Trama (CP, CT e SC)	0,515	0,095
Reforço x Trama	1,886	0,563

Dos resultados da ANOVA, tem-se que os P-valores $> \alpha$, portanto se verificou que o tipo de trama, o tipo de reforço e a interação entre ambos não foram significativos, fornecendo resultados equivalentes independentes.

As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram os modos de ruptura dos compósitos das fibras de *curauá* e sisal, respectivamente; as rupturas ocorreram de modo frágil.

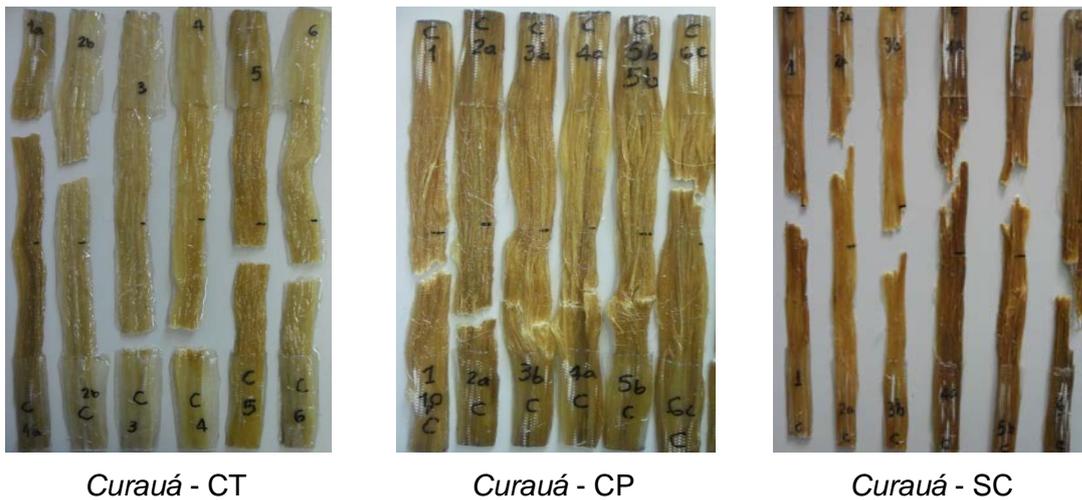


Figura 4.5 - Modos de ruptura dos compósitos de fibras naturais de *curauá* com epóxi.



Figura 4.6 - Modos de ruptura dos compósitos de fibras naturais de sisal com epóxi.

4.1.2 Caracterização dos tecidos de sisal e vidro com a resina epóxi

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam as resistências e os módulos de elasticidade do tecido de sisal e da fibra de vidro respectivamente, assim como os valores: mínimo, máximo, médio e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.4 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para o tecido de sisal.

Corpo de prova	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	530	24492
2	425	21807
3	512	23618
4	511	24173
5	354	22805
6	619	28476
7	539	24827
8	564	25516
9	557	24112
10	556	27278
11	557	24178
12	562	27949
Valor Mínimo:	354	21807
Valor Máximo:	619	28476
Média:	524	24936
CV (%):	13	8

Tabela 4.5 - Resultados da resistência e do módulo de elasticidade para as fibras de vidro.

Corpo de prova	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	1219	57493
2	1223	56933
3	1256	61927
4	1117	58042
5	1161	44990
6	1119	57162
7	1267	53608
8	1239	52296
9	1191	56087
10	1196	59372
11	1139	52660
12	1191	58263
Valor Mínimo:	1117	44990
Valor Máximo:	1267	61927
Média:	1193	55736
CV (%):	4	8

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam respectivamente os gráficos de tensão por deformação para os compósitos dos tecidos de sisal e das fibras de vidro com a resina epóxi.

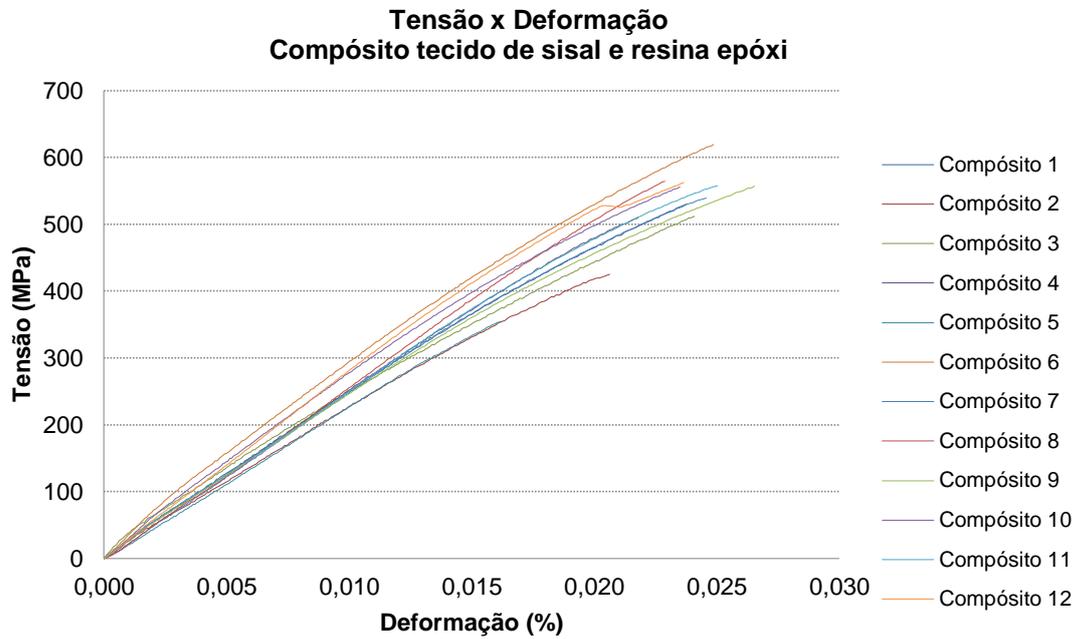


Figura 4.7 - Curva tensão deformação dos compósitos do tecido de sisal com resina epóxi.

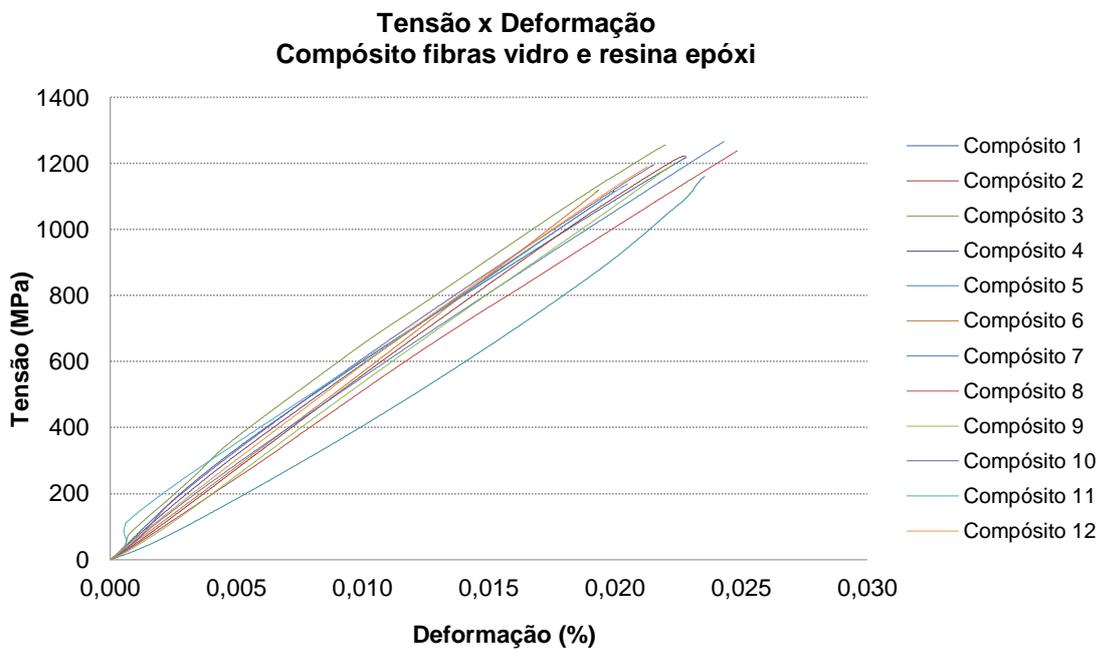


Figura 4.8 - Curva tensão deformação dos compósitos da fibra de vidro com resina epóxi.

Os valores médios para os compósitos de fibras de vidro foram muito próximos aos obtidos por Fiorelli (2005), tendo sido observada uma diferença de 4% na resistência e de 1% no módulo de elasticidade.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os modos de ruptura dos compósitos dos tecidos de sisal e das fibras de vidro, respectivamente; as rupturas ocorreram de modo frágil.



Figura 4.9 - Modos de ruptura dos compósitos dos tecidos de sisal.



Figura 4.10 - Modos de ruptura dos compósitos das fibras de vidro.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

4.2.1 Classificação visual

Preliminarmente, a partir de um lote de 120 peças, foram escolhidas e classificadas visualmente 48 peças, buscando-se constituir 12 grupos, cada um com 4 peças homogêneas. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da classificação visual dessas 48 peças, que foram distribuídas nos tipos de tratamentos (T1, T2, T3 e T4), de forma aleatória em cada grupo de 4 peças.

Tabela 4.6 - Distribuição das lâminas dos grupos em cada tratamento.

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
T1	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	S1-D	S3-ND	S3-ND	S3-D	S3-D	S3-D	S3-D
T2	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	S1-D	S3-ND	S3-ND	S3-D	S3-D	S3-D	S3-D
T3	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	S1-D	S3-ND	S3-ND	S3-D	S3-D	S3-D	S3-D
T4	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	SS-D	S1-D	S3-ND	S3-ND	S3-D	S3-D	S3-D	S3-D
Total: 48 peças.				SS-D = 20 S1-D = 4				S3-ND = 8 S3-D = 16				

Além dessas peças foram classificadas outras 13, para serem utilizadas em testes preliminares. A Tabela 4.7 mostra os resultados da classificação visual para essas peças.

Tabela 4.7 - Distribuição das 13 peças para ensaios preliminares.

Peça	Classe	Peça	Classe	Peça	Classe	Peça	Classe
1	SS-D	5	S2-D	8	S3-ND	11	S3-ND
2	SS-D	6	S3-D	9	S3-ND	12	S3-ND
3	S1-D	7	S3-D	10	S3-ND	13	SS-D
4	S1-ND						
Total: 13 peças.			SS-D = 3 S1-D = 1		S1-ND = 1 S2-D = 1		S3-D = 2 S3-ND = 5

4.2.2 Classificação mecânica

Após a classificação visual, foi feita a classificação mecânica, Tabela 4.8, com o objetivo de obter a correlação entre os módulos de elasticidade (MOE): estático (E) e dinâmico (D), obtidos dos ensaios da flexão estática e da vibração transversal, respectivamente.

Tabela 4.8 - Resultados dos módulos de elasticidade: estático e dinâmico.

Gru- po	T	MOE (MPa)		Gru- po	T	MOE (MPa)		Gru- po	T	MOE (MPa)		Peça N°	MOE (MPa)		
		E	D			E	D			E	D		E	D	
G1	T1	20934	15570	G5	T1	12181	14290	G9	T1	11825	13360	1	11730	13770	
	T2	12862	13990		T2	13379	15200		T2	9538	12640		2	11408	12710
	T3	14969	16840		T3	13340	15770		T3	8560	10970		3	8867	10100
	T4	12396	14760		T4	13589	10640		T4	8670	9670		4	12917	14560
G2	T1	17309	15860	G6	T1	13768	16270	G10	T1	10886	13080	5	9837	11310	
	T2	12187	13400		T2	13911	16000		T2	9810	12240		6	10540	10550
	T3	9598	11300		T3	9996	11190		T3	8255	10410		7	10919	10970
	T4	9420	12050		T4	11969	13560		T4	10387	12320		8	9149	10530
G3	T1	8984	9820	G7	T1	11014	12990	G11	T1	9599	11300	9	8350	9870	
	T2	9451	10230		T2	9706	10710		T2	10170	11700		10	8869	10480
	T3	13896	14880		T3	8159	10010		T3	9623	10500		11	10758	11390
	T4	11076	12640		T4	9036	10590		T4	11013	11930		12	7490	8540
G4	T1	10504	12080	G8	T1	5813	15120	G12	T1	12163	13780	13	12622	13590	
	T2	11388	13510		T2	10072	12070		T2	13865	15020				
	T3	9150	10720		T3	11838	14160		T3	10026	11900				
	T4	8116	9720		T4	10528	11130		T4	8827	10390				

A Tabela 4.9 apresenta a estatística descritiva das 61 peças de madeira.

Tabela 4.9 - Estatística descritiva dos MOE estático (E) e dinâmico (D) para as 61 peças.

	MOE (MPa)	
	E	D
Mínimo:	5813	8540
Máximo:	20934	16840
Mediana:	10528	12070
Variância:	5928399	4085411
Média:	10938	12404
Desvio padrão:	2435	2021
CV (%):	22	16
Contagem:	61	61

Para realizar a correlação dos MOE estático e dinâmico, foi traçado o diagrama de dispersão com a equação do modelo, Figura 4.11. Para avaliar o modelo de regressão foi utilizada ANOVA com (α) de 5%, como H_0 : a não significância do modelo ($\beta_i=0$) e como H_1 : a significância do modelo ($\beta_i \neq 0$). Para P-valor $< \alpha$ rejeite-se H_0 . Foram verificadas a distribuição normal dos resíduos e a homogeneidade entre variâncias.

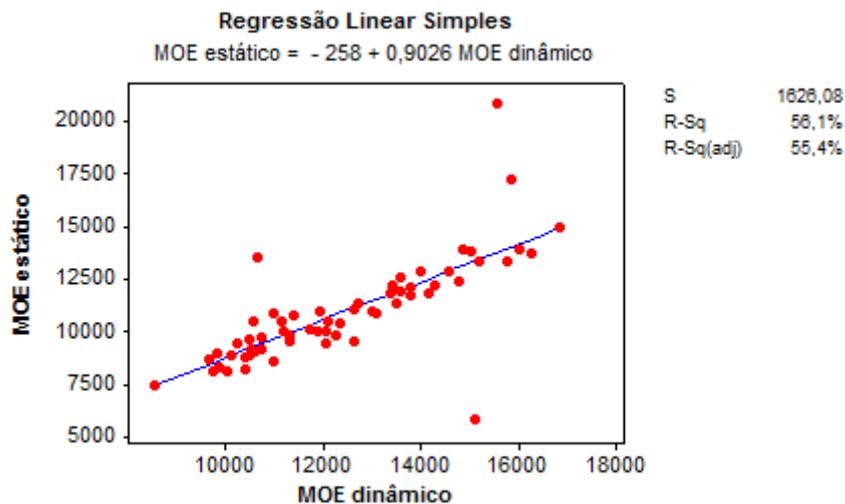


Figura 4.11 - Diagrama de dispersão e reta ajustada dos MOE estático e dinâmico.

A Figura 4.12 apresenta o gráfico dos resíduos. Observa-se que os resíduos não apresentam distribuição normal (P-valor $< 0,05$), e a variância não constante.

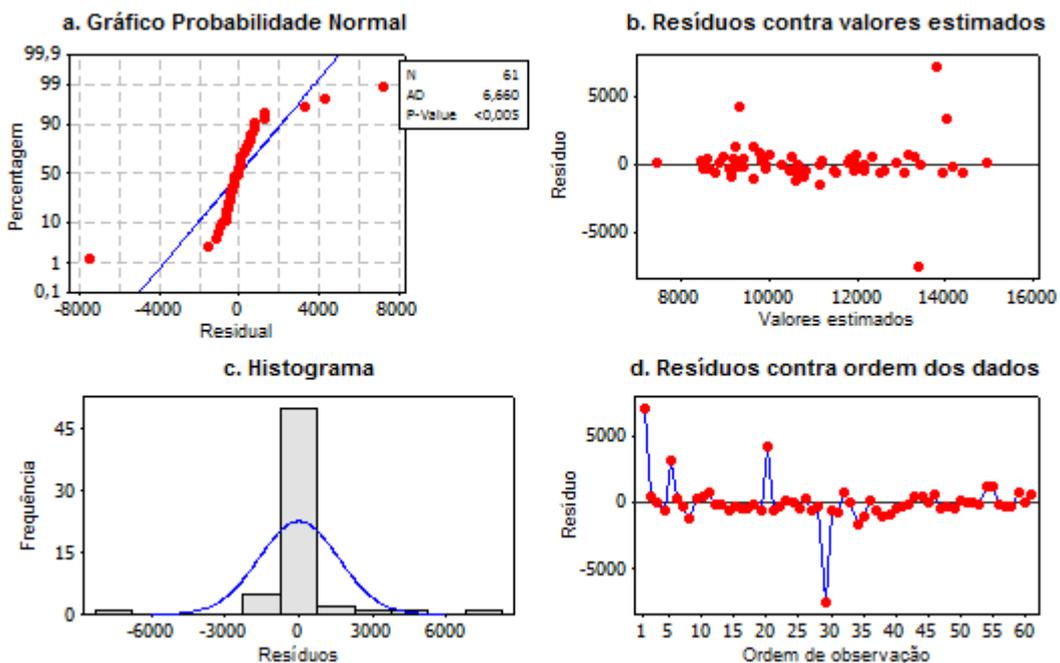


Figura 4.12 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE estático.

Para melhorar a análise, foram retiradas as observações extremas ou *outlier* e foi verificada uma nova análise. A Figura 4.13 apresenta o diagrama de dispersão com a equação do modelo para a nova análise dos dados.

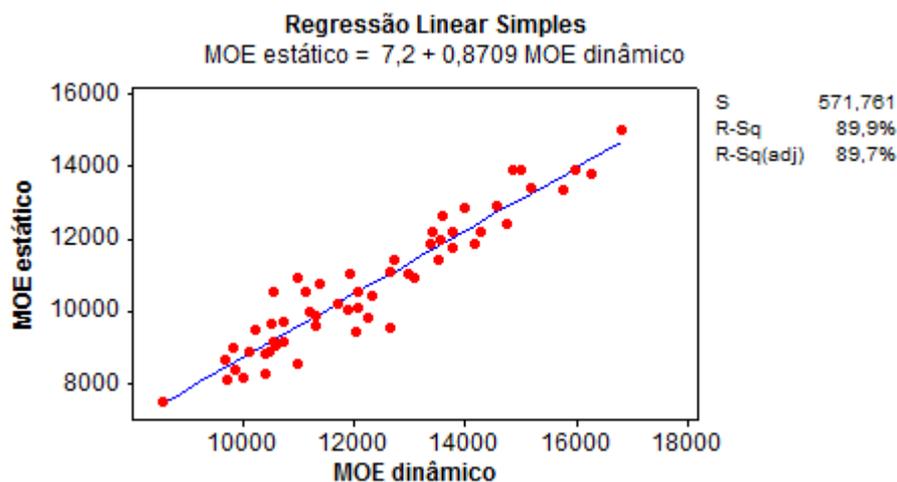


Figura 4.13 - Diagrama de dispersão e reta ajustada dos MOE estático e dinâmico.

A Figura 4.14 apresenta o gráfico dos resíduos, observa-se que o P-valor = 0,375 > 0,05; portanto os resíduos do modelo seguem uma distribuição normal e a variância apresenta constância.

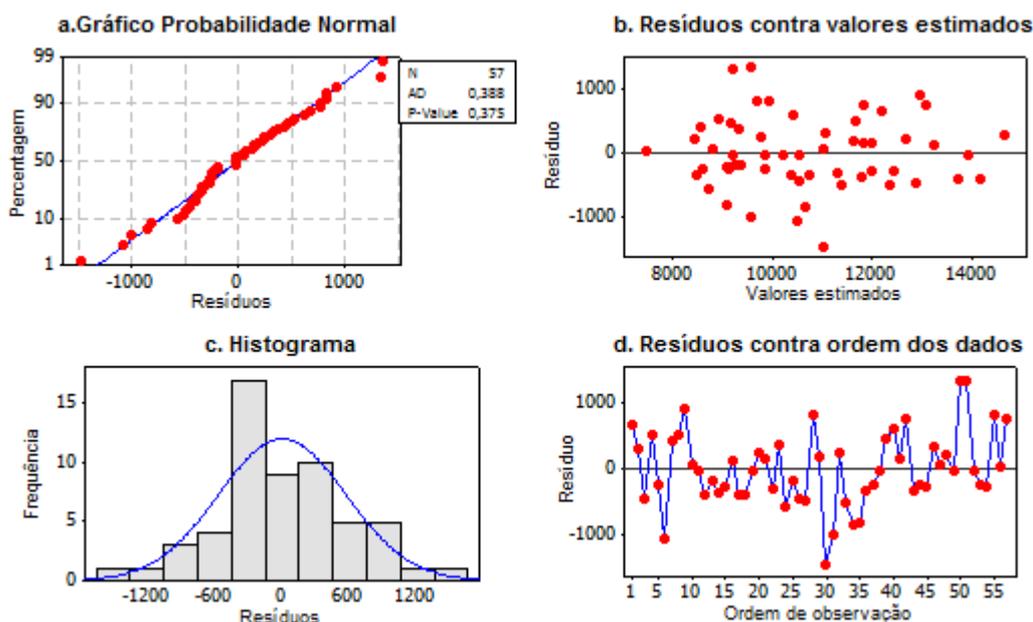


Figura 4.14 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE estático.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados da ANOVA, sendo gl os graus de liberdade, SQ a soma dos quadrados e MQ a média dos quadrados.

Tabela 4.10 - Resultados da ANOVA do modelo de regressão.

Fonte	gl	SQ	MQ	F _{cal}	P-valor
Regressão	1	70888251	70888251	20,35	0,000
Erro	112	390180561	3483755		
Total	113	461068812			

Para verificar a homogeneidade entre as variâncias, foi procurado o valor para $F_{0,05;1;(n-2)}$ na tabela F (Fisher-Snedecor) com $gl = 1$ e $gl = 112$, obtendo-se o valor de $F_{0,05;1;112} = 3,9264$; como $F_{cal} > F_{0,05;1;112}$, conclui-se que há homogeneidade entre as variâncias. Da Tabela 4.10, como o P-valor $< \alpha$, o modelo de regressão linear: *MOE estático* = $7,2 + 0,8709$ *MOE dinâmico*, deve ser aceito. O coeficiente de correlação linear (r) obtido entre o MOE dinâmico e o MOE estático foi de 0,95, ou seja, existe uma forte correlação entre os MOE.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA NAS LÂMINAS COM DIMENSÃO ESTRUTURAL

Foi realizado em uma peça um ensaio preliminar de tração paralela às fibras com reforço de fibra de vidro de 15 cm de comprimento e 10 cm de largura com 2 camadas de reforço de cada lado. A ruptura na peça de madeira *Pinus sp* ocorreu fora da região da emenda reforçada, indicando uma redução da qualidade da madeira e não da emenda. A resistência obtida no ensaio à tração foi 38 MPa com força de ruptura foi de 117 kN. Assim sendo, o valor da resistência à tração obtido menor que o adotado inicialmente de $f_{t0} = 50$ MPa.

Após o ensaio preliminar foram testadas todas as peças pertencentes ao Tratamento 1 (sem emenda e sem reforço) e ao Tratamento 2 (com emenda sem reforço). Ao se iniciar a série de testes referentes às peças com emendas reforçadas (6 peças testadas do Tratamento 3 - com emenda com reforço), observou-se, ao contrário do esperado, uma diminuição na resistência a tração, para alguns grupos. Por essa razão essa série de testes não foi concluída.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados da resistência à tração dos tratamentos (T1, T2 e T3). Além disso, apresentam-se entre parêntesis os modos de ruptura de acordo com a norma ASTM D 4688: 1999, para o tratamento T2.

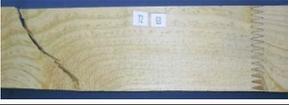
Os resultados obtidos para o tratamento T1 (sem emendas) mostram que a qualidade da madeira não é boa, levando a valores baixos de resistência em muitas peças, a um valor elevado para o coeficiente de variação.

Para o tratamento T2 (emendas sem reforço), da Tabela 4.11, observa-se que a maior parte das rupturas ocorreu fora da região da emenda (modo de ruptura 6), indicando uma redução da qualidade da madeira e não da emenda. Observou-se também, ao contrário do esperado caso a ruptura ocorresse nas emendas, um valor de resistência média ligeiramente superior em comparação com os resultados do tratamento T1.

Esses resultados já indicam que não seria necessário fazer o reforço da emenda, tendo em vista que a ruptura ocorreu, na grande maioria dos casos, por defeitos da peça de madeira, e não por deficiência da emenda.

Isso foi confirmando quando se testarem as peças para o tratamento T3: a maioria das rupturas ocorreu na madeira. Apenas para as peças dos grupos 1 e 4 a ruptura ocorreu na região do reforço, por cisalhamento na interface fibra/madeira.

Tabela 4.11 - Resultados da resistência à tração - dimensão estrutural.

Grupo	f_{t0} (MPa)		$f_{gt,0}$ (MPa) e modo de ruptura		$f_{gt,0}$ (MPa)	
	T1		T2		T3	
G1	75		86 (6)		95	
G2	55		77 (3)		36	
G3	24		34 (6)		61	
G4	32		62 (6)		54	
G5	36		52 (5)		77	
G6	44		42 (6)		40	
G7	17		18 (6)		-	-
G8	16		19 (6)		-	-
G9	39		20 (6)		-	-
G10	59		37 (5)		-	-
G11	27		9 (6)		-	-
G12	7		38 (6)		-	-
Mín.	7		9		36	
Máx.	75		86		87	
Média	36		41		61	
CV (%)	55		59		37	

Mesmo assim, observou-se um aumento na resistência das peças com reforço. De maneira geral, pode-se afirmar que o reforço foi responsável pelo aumento da resistência desse Tratamento, pois, além de reforçar a emenda, também servia de reforço para uma região da peça onde eventualmente poderia ter algum defeito.

A Figura 4.15 apresenta a resistência à tração média em cada tratamento T1, T2 e T3.

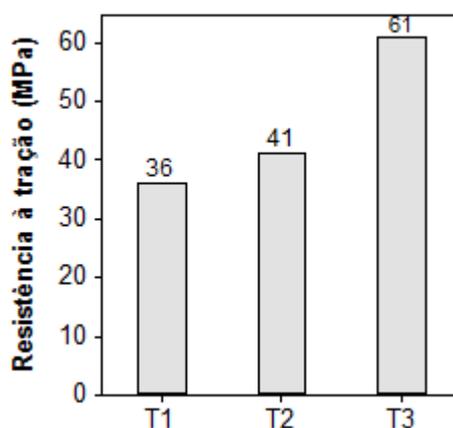


Figura 4.15 - Resistência média à tração- dimensão estrutural.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS EMENDAS DENTADAS EM CORPOS DE PROVA ISENTOS DE DEFEITOS

Nos testes das peças em tamanho estrutural, a maioria das rupturas ocorreu fora da região da emenda, como consequência da má qualidade da madeira. Portanto, optou-se por realizar ensaios na tração em corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus®, com maior resistência e menor quantidade de defeitos.

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares à tração em 3 corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus® reforçados com tecido de sisal de 12 cm de comprimento, 4 cm de largura e 1 camada de tecido para cada lado (1 acima; 1 embaixo). A Figura 4.16 ilustra as rupturas ocorridas nos corpos de prova isentos

de defeitos após o ensaio (os resultados foram organizados na ordem crescente de resistência).

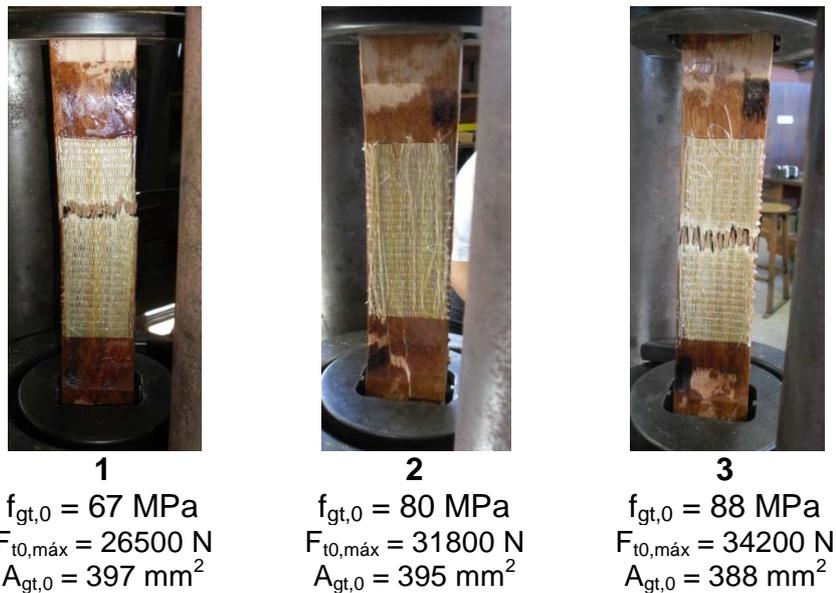


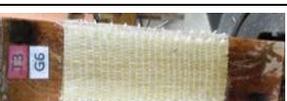
Figura 4.16 - Formas de ruptura à tração: na região da emenda reforçada (1 e 3) e fora da região da emenda reforçada - corpos de prova isentos de defeitos (preliminar).

O desempenho das emendas dentadas à tração foi analisado considerando-se a forma de ruptura. Portanto, para os corpos de prova isentos de defeitos N° 1 e N° 3 as rupturas ocorreram na região da emenda dentada reforçada, e para o corpo de prova N° 2 a falha ocorreu fora da emenda reforçada, indicando uma redução da qualidade da madeira e não da emenda.

Após dos ensaios preliminares, foram avaliados 3 tipos de Tratamentos, T1 (com emenda dentada e sem reforço), T2 (com emenda dentada e reforço de 1 camada de fibra de vidro) e T3 (com emenda dentada e reforço de 4 camadas de tecido de sisal). As dimensões dos reforços (fibras de vidro; tecido de sisal) foram 12 cm comprimento e 4 cm de largura.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados da resistência à tração das emendas dentadas ($f_{gt,0}$). Para o tratamento T1, apresentam-se entre parêntesis os modos de ruptura conforme com a norma ASTM D 4688: 1999.

Tabela 4.12 - Resultados da resistência à tração - corpos de prova isentos de defeitos.

Grupo	$f_{gt,0}$ (MPa) e modo de ruptura		$f_{gt,0}$ (MPa)		$f_{gt,0}$ (MPa)	
		T1		T2		T3
G1	51 (1)		98		104	
G2	47 (5)		101		89	
G3	38 (1)		65		59	
G4	48 (2)		73		106	
G5	78 (1)		96		96	
G6	57 (1)		51		82	
G7	58 (2)		73		90	
G8	37 (3)		81		69	
G9	47 (1)		120		99	
G10	57 (1)		70		81	
G11	48 (4)		80		83	
G12	55 (1)		79		83	
Mín.	37		51		59	
Máx.	78		120		106	
Média	52		82		87	
CV (%)	21		23		16	

Para o tratamento T1 (emenda sem reforço), a maior parte das rupturas foram do modo 1, ou seja, falha ao longo das superfícies da linha de cola.

Para o tratamento T2 (emenda com reforço de fibra de vidro), observou-se que a falha ocorreu na madeira para 8 peças.

As peças pertencentes aos grupos 3, 5, 6 e 8 romperam na madeira, fora da região do reforço. Para duas dessas peças (3 e 6) com resistência menor, a ruptura foi caracterizada pela menor qualidade da madeira. Para as outras duas (5 e 8), obtiveram-se valores de resistência superiores ao valor máximo observado para o caso do Tratamento T1.

As peças pertencentes aos grupos 4, 7, 11 e 12 romperam por falha na madeira, com a ruptura propagando por cisalhamento na madeira na região do reforço. Essas peças apresentaram valores de resistência próximos ou pouco inferiores ao valor máximo observado para o caso do Tratamento 1.

Para as 4 peças com falha na região do reforço, pertencentes ao grupos (1, 2, 9 e 10), a ruptura foi caracterizada, principalmente, por cisalhamento na interface reforço/madeira, notando-se que, preliminarmente, havia ocorrido a ruptura da emenda dentada. Três dessas peças (1, 2 e 9) apresentaram os maiores valores de resistência. A outra peça apresentou nitidamente defeito na colagem na interface reforço/madeira com resistência igual a 70 MPa.

Para o tratamento T3 (emenda com reforço de tecido de sisal), todas as peças apresentaram falha na madeira, sendo que em seis dessas peças (1, 2, 3, 7, 9 e 12) a ruptura ocorreu fora da região da emenda. A menor resistência observada neste tratamento foi para a peça 3, devido à menor qualidade da madeira.

As demais peças desse tratamento apresentaram ruptura por falha na madeira, com propagação para a região do reforço, em vários graus, por cisalhamento da madeira.

A grande maioria das peças do tratamento 3 apresentaram resistência próxima ou superior ao valor máximo obtido no tratamento 1.

Os resultados obtidos para os tratamentos T2 e T3 indicaram claramente a eficácia do reforço no aumento da resistência da peça.

Como ilustração, a Figura 4.17 apresenta as resistências médias das emendas dentadas dos corpos de prova isentos de defeitos para os tratamentos T1, T2 e T3.

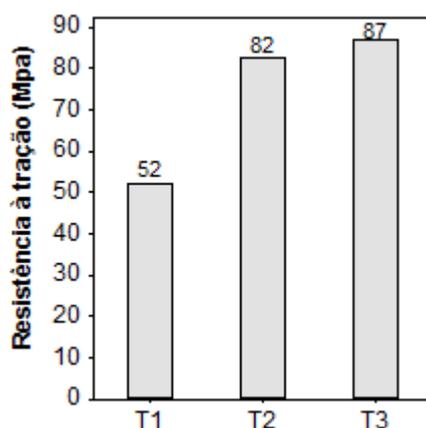


Figura 4.17 - Resistência média à tração - corpos de prova isentos de defeitos.

Com o objetivo de confirmar estatisticamente a eficiência do reforço foi utilizado o teste Tukey para comparação das médias dos tratamentos. Primeiramente, foi verificada a distribuição normal dos resíduos (teste Anderson Darling); e a homogeneidade entre variâncias. Após foi realizada a análise de variância (ANOVA).

A Figura 4.18 apresenta o gráfico dos resíduos para os três tratamentos dos corpos de prova isentos de defeitos.

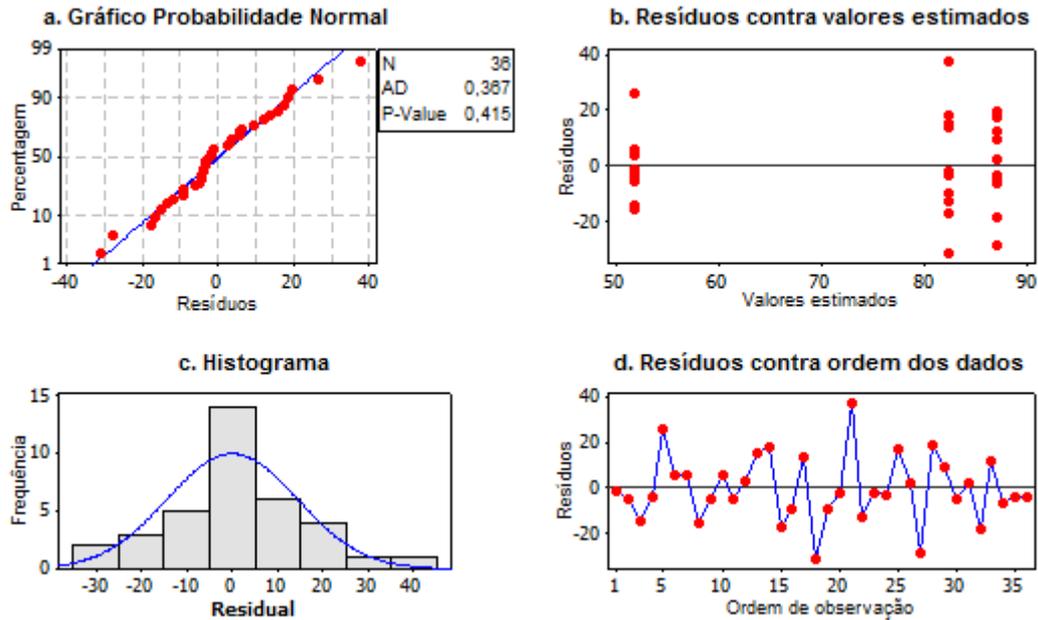


Figura 4.18 - Gráfico dos resíduos contra valores estimados - corpos de prova isentos de defeitos.

O resultado do P-valor = $0,415 > 0,05$; indica que os resíduos seguem uma distribuição normal. O gráfico dos resíduos contra valores estimados mostram a homogeneidade entre as variâncias dos tratamentos.

Foi realizada a ANOVA ao (α) de 5%, tendo como H_0 : equivalência entre médias e como H_1 : a não equivalência entre médias; para P-valor $< \alpha$ rejeita-se H_0 . Os resultados são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados da ANOVA para os tratamentos T1, T2 e T3.

Fonte	GL	SQ	MQ	F_{cal}	P-valor
Tratamento	2	8750	4375	20,04	0,000
Erro	33	7206	218		
Total	35	15957			

Pelo P-valor $< \alpha$, constata-se que os tratamentos dos corpos de prova isentos de defeitos foram significativos na tração.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados do teste de Tukey para os tratamentos dos corpos de prova isentos de defeitos com emendas dentadas. Letras iguais implicam tratamentos com médias equivalentes.

Tabela 4.14 - Resultados do teste Tukey para os tratamentos T1, T2 e T3.

Tratamentos com emendas dentadas	N	$f_{gt,0}$, Média (MPa)	Agrupamento Teste Tukey
T3- com reforço de tecido de sisal	12	87	A
T2- com reforço de fibra de vidro	12	82	A
T1- sem reforço	12	52	B

Os tratamentos T2 e T3 apresentaram resultados equivalentes, indicando que não há nenhuma diferença significativa entre o reforço com tecido de sisal ou de vidro, sendo significativa a inclusão do reforço. Além disso, os tratamentos T2 e T3 apresentaram as maiores resistências médias à tração, com incrementos de 37% e 40%, respectivamente, quanto comparado ao tratamento T1 sem reforço.

5 - CONCLUSÕES

No decorrer da análise dos resultados foram apresentadas várias conclusões, sendo as principais destacadas a seguir.

O tipo da trama (costura total - CT; costura parcial - CP; sem costura - SC) e de reforço (sisal, *curauá*) não afetou de forma significativa a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos, apresentando resultados equivalentes.

Os compósitos reforçados com tecido de sisal e resina epóxi apresentaram bom comportamento mecânico, o que faz um potencial para serem usados como material de reforço em elementos estruturais. Ressalta-se, entretanto, que os compósitos de fibras de vidro apresentaram valores de resistência e de rigidez superiores. Quanto ao modo de ruptura, todos os compósitos reforçados com fibras apresentaram ruptura frágil na tração.

Os resultados dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das 61 peças de madeira *Pinus sp* mostraram uma forte correlação linear (r) de 0,95 para o modelo de regressão linear $MOE\ estático = 7,2 + 0,8709 MOE\ dinâmico$.

O desempenho das emendas dentadas nos ensaios de resistência à tração, foi analisado considerando-se as formas de ruptura.

Para as peças em tamanho estrutural de madeira *Pinus sp* foram avaliados 3 tipos de tratamento: T1 (sem emenda sem reforço), T2 (com emenda sem reforço) e T3 (com emenda com reforço de fibra de vidro com 2 camadas).

De maneira geral, no T1 obtiveram-se valores baixos de resistência à tração na maioria das peças, o que indicou que a qualidade da madeira não era boa.

No T2, a maioria das rupturas ocorreu fora da região da emenda (modo de ruptura 6 de acordo com a norma ASTM D 4688: 1999), indicando redução da qualidade da madeira e não da emenda, ao contrário do esperado, obtiveram-se valores de resistência média ligeiramente superior quando comparados com os resultados do tratamento T1.

Considerando os resultados obtidos para os grupos T1 e T2, não seria necessária a utilização do reforço nas na região das emendas.

Ao testar as peças no T3, a hipótese foi confirmada, pois a maioria das rupturas ocorreram fora da região das emendas reforçadas, com exceção das peças do grupo 1 e 4 nas quais as ruptura ocorreu na região do reforço, por cisalhamento na interface reforço/madeira. Observou-se que houve um pequeno aumento da resistência nas peças com reforço, provavelmente devido à redução da probabilidade de ruptura por falha da madeira, na região do reforço.

Para os corpos de prova isentos de defeitos de madeira Lyptus® com emendas dentadas foram avaliados 3 tipos de tratamento: T1 (sem reforço), T2

(reforço fibra de vidro com 1 camada) e T3 (reforço de tecido de sisal com 4 camadas).

De maneira geral, no tratamento T1 a maior parte das rupturas foram do modo 1, ou seja, falha da colagem, isto é, ao longo das superfícies da linha de cola.

No tratamento T2, as rupturas ocorreram na madeira para a maioria das peças (8). Em 4 peças a ruptura ocorreu fora da região da emenda, duas com as menores resistências (65 MPa e 51 MPa) do tratamento T2 e duas com valores de resistência (96 MPa e 81 MPa) superiores ao valor máximo do tratamento T1 (78 MPa). Para as outras 4 peças com falha na madeira, a ruptura se propagou por cisalhamento na madeira na região do reforço, com valores de resistência (73 MPa, 73 MPa, 80 MPa, 79 MPa) próximos ao valor máximo observado para o tratamento T1 (78 MPa).

Para as 4 peças com falha na região do reforço, a ruptura foi caracterizada principalmente, por cisalhamento na interface reforço/madeira com início da ruptura na emenda dentada. Três dessas peças apresentaram as maiores resistências (98 MPa; 101 MPa; 120 MPa), enquanto que uma delas (70 MPa) apresentou falha na colagem na interface reforço/madeira.

No tratamento T3, todas as peças apresentaram falha na madeira, sendo que a maioria delas teve resistência próxima ou superior ao valor máximo observado para o tratamento T1 (78 MPa).

Para seis peças a ruptura ocorreu fora da região da emenda (resistências iguais a 104 MPa, 89 MPa, 59 MPa, 90 MPa, 99 MPa e 83 MPa).

As demais peças desse tratamento apresentaram ruptura por falha na madeira, com propagação para a região do reforço, em vários graus, por

cisalhamento da madeira, com valores de resistência iguais a 106 MPa, 96 MPa, 82 MPa, 69 MPa, 81 MPa e 83 MPa.

Após análise estatística, concluiu-se que existe diferença significativa entre as resistências observadas para as peças sem reforço e com reforço. Em termos de médio, o acréscimo na resistência em relação às peças sem reforço foi de 37% para o reforço de vidro e 40 % para o tecido de sisal.

Além disso, conclui-se que a utilização de reforço da fibra de vidro (1 camada de cada lado) é equivalente ao reforço com tecido de sisal, (4 camadas), em termos de resistência das peças.

O comprimento adotado de 12 cm para os reforços das emendas dos corpos de prova isentos de defeitos mostrou-se adequado, tendo sido observado apenas um caso de falha na colagem por cisalhamento na interface reforço/madeira.

Como conclusão final do trabalho, salienta-se que o reforço das emendas dentadas somente é necessário no caso de peças de madeira com boa qualidade e alta resistência, situadas em regiões de maior solicitação por tração, em que é esperado que a ruptura se inicie na emenda dentada. Nesses casos, o reforço pode implementar um aumento significativo na resistência da peças, equiparando-a à resistência da peça sem emenda.

Nos casos de peças de menor qualidade, o reforço das emendas dentadas não é indicado, pois, nesses casos a emenda dentada pode não ser o ponto mais frágil.

6 - REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. Exemplo de Aplicação da Ciência dos Materiais aos Materiais de Construção Civil – O Caso dos Materiais Fibrosos. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1988, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1988. v. 1. p. 34-41.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1993). **ASTM D245**: Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1995). **ASTM D3039**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1999). **ASTM D4688**: Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber.

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

_____. (2011). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira, versão em implementação. Rio de Janeiro.

AZAMBUJA, M. (2006). **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 159 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BARRACUDA ADVANCED COMPOSITES. Disponível em: <<http://www.barracudacomposites.com.br>>. Acesso em: 16 Nov. 2012.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BUI, Q. D.; MILNER, H. R.; WILLIAMS J. M. **Fibre Reinforced Finger Joints**. In: Proceedings of international wood engineering conference, 1996, p. 1427-1432.

CARRASCO, E. V. M. (1989). **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de Madeira Laminada Colada (MLC)**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

CARREIRA, M. R. (2003). **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp.** 197 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CARVALHO, R. F. (2005). **Compósitos de fibras de sisal para uso e reforço de estruturas de madeira**. 133 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CEAPAC - Centro de Apoio a Projetos de Ação Comunitária. **Curauá, Produção Agroecológica, Beneficiamento, Comercialização**. Santarém-Pará, Brasil, 2010. 18 p.

CERCHIARO, J. R. (2010). **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NURMUNG (1971). **DIN 68140: Keilzinkenverbindungen von Holz**. Berlin, Alemanha.

DIAS, A.; CALIL JR., C.; ROCCO, F. **Estruturas de madeira**. 57 f. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras - LaMEM, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

FIBERTEX®. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br>>. Acesso em: 20 Ago. 2013.

FIORELLI, J. (2002). **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

_____. (2005). **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 108 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FORTES, G. L.; DIAS, A. A. **Avaliação da resistência à tração de compósitos de fibras naturais e resina epóxi**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 19, 2011, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - EESC - USP. Resumos... São Carlos: USP, 2011.

HERNÁNDEZ, R. 1998. **Analysis of Strain in Finger-Jointed Lumber**. In: 5th world Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland.

HINGCHENG, H. et al. Reinforcement Design of Poplar Glulam. **Materials Science Forum**, Switzerland, v. 620-622, p. 137-140, 2009. doi: 10.4028/MSF.620-622.137.

HYER, M. W. **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials**. Boston: WCB, McGraw-Hill, 1998. 627 p.

JOKERST, R. W. **Finger-Jointed Wood Products**. Forest Products Laboratory. Research paper FPL 382. Madison, WI. EU, 1981. 23 p.

LI, X.; Tabil, L. G.; Panigrahi, S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced composites: A Review. **Journal of Polymers and Environment**, v. 15, n. 1, p. 25-33, 2007.

MACÊDO, A. N. (1996). **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de métodos de ensaio**. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MACÊDO, A. N.; CALIL JÚNIOR, C. Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 7, p. 1-23 , 1999.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 3rd ed. Boca Raton, FL., 2008. 619 p.

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MENDONÇA, P. T. **Materiais compostos e estruturas sanduíche: projeto e análise.** Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2001. 586 p.

MOMENTIVE™. Disponível em: <<http://www.momentive.com>>. Acesso em: 20 Ago. 2013.

PEMATEC TRIANGEL. Disponível em: <<http://www.pematec.com.br>>. Acesso em: 20 Ago. 2013.

SAVASTANO, Jr. H.; DANTAS, F. A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras - correlação entre a zona de transição fibra matriz e as propriedades mecânicas.** In: Boletim, 67, São Paulo, 1994. p. 13.

SILVA, R. V. (2003). **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** 157 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SPINACÉ, Márcia A. S. et al. **Caracterização das fibras de sisal e de curauá visando aplicação em compósitos poliméricos.** In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química - SBQ, 32, 2009, Fortaleza, Brasil. Anais... Fortaleza, 2009. v. QM066, p. 1-3.

SZÜCS, C. A.; CHANG, T. C. Possibilidades de fabricação de estruturas de madeira laminada, reforçadas com fibras de vidro de fios orientados. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, 1992, São Carlos (SP), 1992. **Anais...** São Carlos, 1992. v. 4. p. 105-114.

_____. Poliolefinas reforçadas com Fibras Vegetais Curtas: sisal x *curauá*. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 3, p. 168-174, 2011.

VANERЕК, J.; HRADIL, P. **Evaluation of timber beams reinforced with FRP fabrics**, 2007.