

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

THIAGO DANCIGER ALVES MAGALHÃES

**VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM
ENTALHES: Estudo analítico e experimental de vigas reforçadas
com fibras de carbono**

MARINGÁ

2018

THIAGO DANCIGER ALVES MAGALHÃES

**VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM
ENTALHES: Estudo analítico e experimental de vigas reforçadas
com fibras de carbono**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Estruturas junto à Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto

Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

MARINGÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

M188v Magalhães, Thiago Danciger Alves
Vigas de madeira laminada colada com entalhes:
estudo analítico e experimental de vigas reforçadas
com fibras de carbono / Thiago Danciger Alves
Magalhães. -- Maringá, 2018.
160 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto.
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2018.

1. Vigas de MLC com entalhes. 2. Reforço com fibra
de carbono. 3. Avaliação analítica. 4. Avaliação
experimental. I. Miotto, José Luiz, orient. II.
Góes, Jorge Luís Nunes de, coorient. III.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de
Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.


CDD 21.ed.624.18

THIAGO DANCIGER ALVES MAGALHÃES

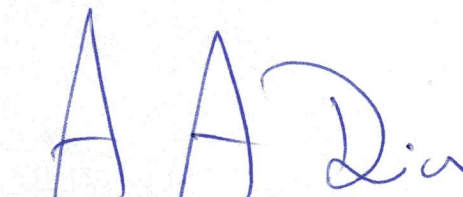
VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM ENTALHES: ESTUDO ANALÍTICO E EXPERIMENTAL DE VIGAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE CARBONO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas para obtenção do título de Mestre.

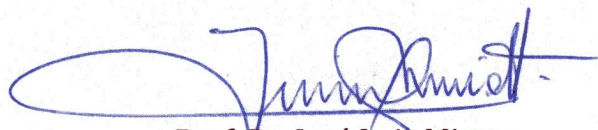
Aprovada em 27 agosto de 2018.


Profa. Dra. Nara Villanova Menon

Membro PCV/UEM


Prof. Dr. Antonio Alves Dias

Membro EESC/USP - SP.


Prof. Dr. José Luiz Miotto

Orientador - PCV/UEM

Dedico este trabalho à minha mãe, Neila, meu pai, Daniel, minha esposa Nayele e aos meus irmãos Fellipe e Daniel. Vocês são a razão da minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente pela saúde, força, família e perseverança para superar todas as dificuldades durante a realização deste trabalho. Obrigado pelo cuidado, e pelas pessoas certas que colocaste no meu caminho que sempre buscaram o melhor de mim.

Ao Professor Dr. José Luiz Miotto pela orientação e amizade. Agradeço também pelo auxílio, apoio e inspiração. Obrigado por sua imensurável dedicação.

Ao Professor Dr. Jorge Luís Nunes de Góes por todo apoio, amizade e incansável incentivo. Seus conhecimentos e experiência foram, para mim, mais que aprendizado.

Ao Engenheiro Maiko Cristian Sedoski pelo auxílio, apoio e estímulo incessante que com certeza fizeram com que este trabalho fosse possível. Também pela grande amizade e sábios conselhos.

Aos meus pais, Daniel e Neila pela vida, amor, educação, confiança e pelo infinito apoio durante esta jornada.

À minha esposa, Nayele, por todo apoio, estímulo, companheirismo e carinho durante este projeto. Você com certeza é uma das razões para eu vencer todos os obstáculos.

Aos meus familiares, em especial meus irmãos Fellipe e Daniel, que sempre me incentivaram e me deram ânimo para prosseguir.

À empresa Rewood por todo respaldo durante a pesquisa.

À empresa S&P Clever Reinforcement Brasil, em especial ao Engenheiro Civil Renato Idas Leoni, por toda ajuda e conhecimentos.

RESUMO

A busca por materiais naturais e renováveis, no segmento da construção civil, se intensifica a cada dia. Neste contexto, a madeira se apresenta como um material ideal, pois alia boas propriedades mecânicas e inúmeros benefícios trazidos pela técnica de madeira laminada colada (MLC), que amplia ainda mais seu universo de aplicações. No entanto, a presença de entalhes em peças de MLC provoca alteração em seu comportamento mecânico, decorrente da alta concentração de tensões normais e de cisalhamento nesta região. Neste quesito, a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 trata o assunto de forma superficial, sem aprofundar em procedimentos para o dimensionamento quando a presença dos entalhes se faz necessária. Por outro lado, normas internacionais trazem avanços neste assunto, com destaque para a norma alemã DIN 1052 (2004). Nesse contexto, com o objetivo de aprofundar o conhecimento em relação ao comportamento mecânico de peças de MLC, e procurando estender e disseminar a técnica, surge a proposta deste trabalho que consiste no estudo experimental de vigas de MLC com a presença de entalhes na região dos apoios. Os entalhes foram executados na região tracionada da peça, em quatro diferentes variações: (a) entalhe sem reforço; (b) entalhe com reforço de fibras de carbono formando um ângulo de 45° em relação à direção das fibras da madeira; (c) entalhe com reforço de fibras de carbono formando um ângulo de 90° com a direção das fibras da madeira; e (d) sem entalhe e sem reforço. No total foram ensaiadas 12 vigas – adquiridas junto a uma empresa brasileira produtora de MLC –, correspondendo a três exemplares para cada variação acima apresentada. Registrou-se uma elevação de 113% no módulo de ruptura (MOR), quando se comparam os resultados obtidos nos ensaios das vigas com entalhe e com reforço em 45° com aqueles referentes às vigas com entalhe e sem reforço, bem como uma alteração no modo de ruptura das vigas. Também foram realizados os ensaios de caracterização da madeira, permitindo assim a comparação dos resultados obtidos no ensaio de flexão com as expressões normativas presentes na DIN 1052 (2004).

Palavras-chave: Vigas de MLC com entalhes; Reforço com fibras de carbono; Avaliação analítica; Avaliação experimental.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1– Utilização de MLC nos Estados Unidos da América..... | 19 |
| Figura 2.2 – Estrutura de madeira laminada colada (MLC) | 20 |
| Figura 2.3– Elementos de uma viga de MLC | 21 |
| Figura 2.4 – Tipos de emendas longitudinais | 22 |
| Figura 2.5– Tipos de MLC conforme estruturação das lamelas | 22 |
| Figura 2.6– Tipo de MLC conforme a classe de resistência das lamelas | 23 |
| Figura 2.7– Redistribuição de tensões | 23 |
| Figura 2.8– Relação entre nós e resistência da peça..... | 26 |
| Figura 2.9– Defeitos a inspecionar na classificação visual | 27 |
| Figura 2.10– Equipamentos para classificação mecânica..... | 28 |
| Figura 2.11 – Emenda dentada | 28 |
| Figura 2.12– Processo generalizado da fabricação de MLC | 30 |
| Figura 2.13– Tipo de adesivo em função do uso da estrutura | 31 |
| Figura 2.14- Resistência média para diferentes adesivos, para espécie Pinus..... | 33 |
| Figura 2.15- Resistência média para diferentes adesivos, para espécie Eucalipto | 33 |
| Figura 2.16– Tecido multiaxial de fibra de vidro | 37 |
| Figura 2.17– Fibra orgânica – Kevlar..... | 38 |
| Figura 2.18– Fibra de Carbono..... | 39 |
| Figura 2.19– Comparação entre força e deformação de vigas de MLC | 45 |
| Figura 2.20– Ensaio de flexão | 45 |
| Figura 2.21– Seção transversal da viga de MLC reforçada..... | 46 |
| Figura 2.22– Secção transversal da viga de MLC reforçada..... | 47 |
| Figura 2.23– Região de máximas tensões de cisalhamento em vigas de MLC..... | 49 |
| Figura 2.24– Ruptura predominante por cisalhamento..... | 51 |
| Figura 2.25– Ensaio de flexão de cinco pontos | 51 |
| Figura 2.26– Ruptura por cisalhamento em vigas de MLC..... | 53 |
| Figura 2.27– Esquema de ensaio de flexão | 53 |
| Figura 2.28– Ensaio de flexão em longarinas de madeira | 54 |
| Figura 2.29– Métodos de reforços das longarinas | 55 |
| Figura 2.30– Comparativo entre longarinas pós-falha e longarinas reforçadas | 56 |
| Figura 2.31– Comparativo entre longarina testemunha e longarinas reforçadas..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.32– Entalhes em diferentes situações..... | 57 |
| Figura 2.33– Entalhe na região do apoio | 58 |
| Figura 2.34– Entalhes na intersecção | 58 |
| Figura 2.35– Geometria dos entalhes | 59 |
| Figura 2.36– Acúmulo de tensões no canto do entalhe | 60 |
| Figura 2.37 – Modos de ruptura com início na região dos entalhes | 61 |
| Figura 2.38– Reforço em vigas entalhadas para limitar o fendilhamento | 62 |
| Figura 2.39– Posição dos entalhes em vigas | 63 |
| Figura 2.40– Detalhes construtivos de vigas entalhadas | 63 |
| Figura 2.41– Entalhe na região comprimida da viga..... | 65 |
| Figura 2.42– Parâmetros dos entalhes segundo CSA O86 | 69 |
| Figura 2.43– Parâmetros dos entalhes segundo a DIN 1052..... | 71 |
| Figura 2.44– Reforço por meio de parafusos..... | 72 |
| Figura 2.45– Reforço externo em vigas entalhadas..... | 74 |
| Figura 2.46– Flexão em viga entalhada..... | 74 |
| Figura 2.47– Parâmetros de vigas entalhadas nas extremidades | 76 |
| Figura 2.48– Dimensões da viga de MLC com a presença de entalhes | 78 |
| Figura 2.49– Resistências ao cisalhamento das vigas de MLC | 78 |
| Figura 2.50– Variação da tensão tangencial em função da altura e largura do entalhe | 79 |
| Figura 2.51– Desvio da tensão tangencial para $h_1/h=0,1$, em comparação com a NBR 7190 (1997)..... | 80 |
| Figura 3.1– Detalhes da seção total da viga..... | 82 |
| Figura 3.2– Detalhe das dimensões do entalhe..... | 82 |
| Figura 3.3– Detalhes das configurações das vigas ensaiadas | 83 |
| Figura 3.4– Delimitação do entalhe..... | 87 |
| Figura 3.5– Realização dos cortes do entalhe..... | 87 |
| Figura 3.6- Acabamento nos cantos dos entalhes | 88 |
| Figura 3.7– Verificação do esquadro dos entalhes | 88 |
| Figura 3.8– Transpasse das fibras no reforço em 90° | 90 |
| Figura 3.9– Transpasse das fibras no reforço em 45° | 91 |
| Figura 3.10– Regularização da superfície | 91 |
| Figura 3.11– Dosagem da resina | 92 |
| Figura 3.12– Aplicação da resina primer..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.13- Ciclo de aplicação do reforço externo | 93 |
| Figura 3.14 – Ensaio de flexão de três pontos | 94 |
| Figura 3.15– Esquema de ensaio das vigas | 96 |
| Figura 3.16- Delimitação da madeira na região dos apoios e no centro da viga | 97 |
| Figura 3.17– Delimitação da madeira na altura..... | 97 |
| Figura 3.18– Extração dos corpos de prova para caracterização da MLC | 98 |
| Figura 3.19– Seleção das peças de madeira para extração dos corpos de prova..... | 98 |
| Figura 3.20 – Desengrossadeira Baldan | 99 |
| Figura 3.21– Desenho dos corpos de prova..... | 100 |
| Figura 3.22– Moldagem dos corpos de prova para ensaio de tração..... | 100 |
| Figura 3.23– Moldagem dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento | 101 |
| Figura 3.24– Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola..... | 102 |
| Figura 3.25– Arranjo de ensaio para cisalhamento na lâmina de cola | 103 |
| Figura 3.26– Ensaio de cisalhamento | 103 |
| Figura 3.27– Corpo de prova para ensaio de tração normal à lâmina de cola..... | 104 |
| Figura 3.28– Dispositivo para ensaio de tração normal à lâmina de cola | 105 |
| Figura 3.29– Arranjo para ensaio de tração normal à lâmina de cola | 105 |
| Figura 3.30– Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras..... | 106 |
| Figura 3.31– Dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras | 107 |
| Figura 3.32– Corpo de prova para ensaio de tração normal às fibras..... | 108 |
| Figura 3.33– Dispositivo para ensaio de tração normal às fibras | 108 |
| Figura 3.34– Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras | 110 |
| Figura 3.35– Arranjo de ensaio de compressão paralela às fibras..... | 110 |
| Figura 3.36– Ensaio de compressão | 110 |
| Figura 3.37– Corpo de prova para ensaio de umidade e densidade..... | 111 |
| Figura 4.1- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e sem reforço | 115 |
| Figura 4.2- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 90°.. | 115 |
| Figura 4.3- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 45°.. | 116 |
| Figura 4.4- Comportamento das vigas de MLC sem entalhe e sem reforço..... | 116 |
| Figura 4.5– Módulo de ruptura para cada série de vigas de MLC | 119 |
| Figura 4.6 – Resistência ao cisalhamento para cada série de vigas de MLC | 121 |
| Figura 4.7– Modo de ruptura nas vigas de MLC com entalhe e sem reforço..... | 123 |
| Figura 4.8– Modo de ruptura das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 90° | 125 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.9– Modo de ruptura das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 45° | 127 |
| Figura 4.10– Modo de ruptura das vigas de MLC sem entalhes | 128 |
| Figura 4.11- Comparativo entre as tensões de cisalhamento..... | 130 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1– Características das fibras sintéticas..... | 37 |
| Tabela 2.2– Característica e técnicas de aplicação das fibras de carbono..... | 41 |
| Tabela 2.3– Características dos tecidos de fibras a 20°C | 42 |
| Tabela 2.4– Força e modo de ruptura em vigas de MLC sem reforço | 46 |
| Tabela 2.5– Força e modo de ruptura em vigas de MLC com reforço | 46 |
| Tabela 2.6– Valores de rigidez e momento fletor resistente | 48 |
| Tabela 2.7– Formas de ruptura de vigas de MLC | 50 |
| Tabela 2.8– Resultados de resistência ao cisalhamento de vigas e corpos de prova.... | 52 |
| Tabela 3.1– Especificações da fibra de carbono..... | 84 |
| Tabela 3.2– Características dos componentes da resina primer | 84 |
| Tabela 3.3– Especificações de manipulação da resina primer | 84 |
| Tabela 3.4– Características dos componentes da resina de laminação..... | 85 |
| Tabela 3.5– Especificações de manipulação da resina primer | 85 |
| Tabela 3.6– Detalhamento das vigas de MLC..... | 86 |
| Tabela 3.7– Dimensões das vigas de MLC | 89 |
| Tabela 4.1– Propriedades físicas e mecânicas – valores médios..... | 112 |
| Tabela 4.2- Propriedades mecânicas - valores característicos..... | 112 |
| Tabela 4.3- Propriedades físicas e mecânicas - Rewood..... | 113 |
| Tabela 4.4- Comparação dos resultados experimentais com a NBR 7190 (1997) | 113 |
| Tabela 4.5– Módulos de elasticidade (MOE) das vigas | 114 |
| Tabela 4.6– Características na ruptura das vigas de MLC | 117 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 4.1 - Equacionamento da resistência ao cisalhamento segundo normativas | |
| | 122 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Justificativa | 15 |
| 1.2Objetivos | 16 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 16 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 16 |
| 1.2.3 Estrutura da dissertação | 17 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 18 |
| 2.1 Madeira Laminada Colada (MLC) | 18 |
| 2.1.1 Definição | 20 |
| 2.1.2 Fatores que influenciam a resistência da MLC | 25 |
| 2.1.3 Fabricação de MLC | 26 |
| 2.1.4 Adesivos | 30 |
| 2.2 Estruturas de madeira reforçada com fibras | 34 |
| 2.2.1Reforço estrutural | 34 |
| 2.2.2 Fibras naturais | 35 |
| 2.2.3 Fibras sintéticas | 35 |
| 2.2.3.1 Fibra de Vidro | 36 |
| 2.2.3.2 Fibra de Aramida | 38 |
| 2.2.3.3 Fibra de Carbono..... | 38 |
| 2.2.3.4 Comparação entre as fibras | 41 |
| 2.2.4Madeiras reforçadas com fibras sintéticas | 42 |
| 2.3 Cisalhamento em vigas de MLC | 48 |
| 2.3.1Entalhes em vigas de MLC | 57 |
| 2.3.1.1Critérios de entalhes segundo ABNT NBR 7190:1997 | 62 |
| 2.3.1.2Critérios de entalhes segundo NDS (2015)..... | 63 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.3.1.3 | Critérios de entalhe segundo a CSA O86 (2010)..... | 66 |
| 2.3.1.4 | Critérios de entalhe segundo a DIN 1052 (2004) | 69 |
| 2.3.1.5 | Critérios de entalhes segundo EN 1995-1-1 (2004)..... | 74 |
| 2.3.1.6 | Comparação entre os critérios..... | 76 |
| 2.3.1.7 | Estudos realizados em vigas entalhadas..... | 77 |
| 3. | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 81 |
| 3.1 | Dimensões das vigas | 81 |
| 3.2 | Configurações dos reforços externos | 83 |
| 3.4 | Método de Ensaio das vigas | 94 |
| 3.6 | Ensaio de caracterização da madeira e da MLC | 101 |
| 3.6.1 | Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola..... | 101 |
| 3.6.2 | Ensaio de tração normal à lâmina de cola..... | 103 |
| 3.6.3 | Ensaio de cisalhamento paralelo as fibras..... | 106 |
| 3.6.4 | Ensaio de tração normal às fibras | 107 |
| 3.6.5 | Ensaio de compressão paralela às fibras | 109 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 112 |
| 4.1 | Ensaio de caracterização da madeira | 112 |
| 4.2 | Ensaio nas vigas de MLC | 114 |
| 4.2.1 | Módulos de elasticidade..... | 114 |
| 4.2.2 | Modos de Ruptura..... | 116 |
| 4.2.2.1 | Análise dos modos de ruptura para a série de vigas com entalhe e sem reforço | 122 |
| 4.2.2.2 | Análise dos modos de ruptura para as séries de vigas com reforços em 90° e 45° | 124 |
| 4.2.2.3 | Análise dos modos de ruptura para a série de vigas sem entalhe e sem reforço | 127 |
| 4.2.3 | Comparação com os resultados de Jockwer (2012)..... | 129 |
| 5. | CONCLUSÕES | 131 |

| | |
|---|------------|
| REFERÊNCIAS | 133 |
| APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA | 141 |
| APÊNDICE B – MODOS DE RUPTURA | 148 |
| APÊNDICE C – ENSAIO DE FLEXÃO..... | 160 |

1. INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um recurso natural e renovável, apresentando elevada resistência mecânica, peso próprio reduzido, é de fácil manipulação, além de possuir um custo de manufatura reduzido. O Brasil se destaca pelas grandes reservas florestais nativas, sendo considerada uma das maiores do mundo, possuindo também grandes áreas de reflorestamento e potencialmente florestáveis (HENRIQUES DE JESUS, 2000).

No entanto, a redução progressiva dos estoques de madeira e a necessidade de racionalizar o seu uso motivam o desenvolvimento de novas tecnologias que, mantendo a beleza do material, aumentam o seu desempenho e diminuem assim o seu consumo (MIOTTO, 2009). Segundo Henriques de Jesus (2000), a madeira laminada colada (MLC) surge como uma alternativa para racionalização da madeira, possuindo inúmeras vantagens em relação à madeira serrada, tais como:

- Facilidade na construção de grandes estruturas, utilizando peças comerciais com dimensões reduzidas;
- Possibilidade de construção de elementos estruturais nas mais variadas formas de seção, comprimento e dimensões, restringidas somente à área de produção e às condições de transporte;
- Redução de defeitos tais como rachaduras e nós, frequentemente encontrados em estruturas de grandes dimensões;
- Possibilidade de aplicação de contra-flechas, aumentando a eficiência estrutural da peça.

Segundo Fiorelli (2005), a versatilidade da MLC em relação às formas, dimensões, resistência e durabilidade – decorrente de tratamentos preservativos sob pressão – impulsionaram o seu uso em diversos países. Estudos foram importantes para conhecer os fatores que influenciam a resistência e a rigidez das peças de MLC, tais como: habilidade das espécies de madeira, resistência das lamelas, quantidade de nós, direção das fibras, módulo de elasticidade das lamelas, posição das emendas longitudinais e laterais, dimensão da peça e quantidade, posição e espessura das lamelas.

Em meio à descoberta de novas tecnologias, o conhecimento do comportamento mecânico da estrutura é de fundamental importância para se obter melhor eficiência no

desenvolvimento de projetos. De acordo com Yeh et al. (1999), enquanto em muitas aplicações de MLC os fatores determinantes de projeto são a resistência à flexão e rigidez da peça, há casos na qual o cisalhamento horizontal se apresenta como um fator determinante no projeto da estrutura. Segundo Gentry (2011), o dimensionamento de vigas de madeira é controlado pelas tensões de cisalhamento nos casos em que as vigas são submetidas a carregamentos elevados e apresentam pequena razão entre vão e altura.

De acordo com Ivkovic et al. (2006 apud GENTRY, 2011), peças de madeira da divisão das coníferas têm apresentado diminuição das propriedades estruturais em comparação com anos anteriores, devido ao manejo incorreto das plantações. Segundo Rammer e McLean (1996), cientistas têm apresentado interesse em compreender a resistência ao cisalhamento de vigas com a presença de fendas horizontais nas extremidades das vigas. Segundo estes autores, a presença dessas fendas em longarinas de linhas ferroviárias é ocasionada pelo efeito de secagem e intempéries, fazendo com que tensões de cisalhamento governem o comportamento da peça.

Deste modo, para assegurar um melhor desempenho mecânico das vigas surge a necessidade do desenvolvimento de uma nova técnica. Segundo Fiorelli (2005), o aumento da resistência e da rigidez de peças de MLC vem sendo estudado nos Estados Unidos e na Europa e consiste na utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF). Segundo Fiorelli (2002), os PRF vêm sendo utilizados também no reforço e na recuperação de estruturas por serem materiais flexíveis e altamente resistentes, possuindo como principais representantes as fibras de carbono e as fibras de vidro.

Ainda de acordo com Fiorelli (2002), o emprego de reforço utilizando a técnica de colagem de PRF pode ser colocado como solução para os problemas de envelhecimento das obras, as quais muitas vezes pertencem ao patrimônio histórico e arquitetônico. Segundo a Carta de Veneza (1964), a manutenção dos valores históricos e culturais das edificações é fundamental na restauração de obras históricas. Assim, a utilização de reforços estruturais compostos por fibras surge como uma alternativa satisfatória.

Somado a isso, em alguns casos de projeto se faz necessária a realização de entalhes nas vigas, que podem estar localizados na região do apoio ou no interior da viga devido à: limitação de altura, estabilização da peça nas extremidades, suporte para peças inclinadas, encaixe entre peças e intersecções de elementos estruturais. No entanto, os entalhes trazem consigo um acúmulo de tensões normais e de cisalhamento no canto do entalhe, diminuindo

assim a capacidade de suporte da viga. Portanto, a utilização de entalhes e seus efeitos devem ser cuidadosamente analisados na elaboração do projeto estrutural.

Diante do exposto, tendo em vista o elevado crescimento da utilização de vigas de MLC, associado com a necessidade de melhor compreender o comportamento mecânico e verificar a influência das tensões de cisalhamento em vigas entalhadas, propõe-se nesta pesquisa o estudo experimental comparativo entre vigas de MLC com entalhe na região do apoio, sem reforço, e vigas de MLC com entalhes na região do apoio reforçados com fibras de carbono coladas formando-se um ângulo de 45° e 90° em relação à direção das fibras da madeira. Neste estudo será verificada a influência dos reforços na resistência ao cisalhamento das vigas, o modo de ruptura das peças, a relação entre o vão e a altura, bem como a eficiência do adesivo empregado na colagem das fibras.

1.1 Justificativa

O apelo pelo desenvolvimento sustentável promoveu a valorização do uso de matérias-primas renováveis, como também a racionalização dos materiais. Deste modo, houve a intensificação da busca por novas tecnologias, o que resultou, no setor da construção civil, em pesquisas que culminaram na valorização do emprego da madeira laminada colada.

Além de a madeira ser um fixador de carbono, material renovável e reaproveitável, a utilização da mesma na forma de MLC promove o aproveitamento de espécies de baixa densidade e peças de qualidade inferior, reduzindo assim a demanda por madeira de maior qualidade.

Por outro lado, com o avanço da utilização de madeira laminada colada, surge também a necessidade de melhor compreender seu comportamento mecânico nas mais diversas configurações e solicitações. Uma das configurações pouco estudadas no Brasil é a presença de entalhes na região do apoio. Soma-se a isso a carência de critérios normativos brasileiros para o dimensionamento dessas peças, o que dificulta a elaboração de projetos eficientes em que se faz necessária a utilização dos entalhes.

Todavia o acúmulo de tensões devido ao entalhe promove a necessidade da integração da MLC com polímeros reforçados com fibras. Critérios normativos internacionais, nesse caso, se apresentam mais avançados na aplicação de reforço com fibras sintéticas. No entanto, pesquisas no desenvolvimento dessa tecnologia são escassas, o que dificulta conhecimento do

comportamento estrutural desse sistema bem como a utilização do mesmo por parte dos projetistas.

Deste modo este trabalho busca aprofundar o conhecimento acerca do comportamento mecânico de vigas de MLC, com a presença de entalhes na região dos apoios, de modo a contribuir para que o seu uso seja estendido.

1.2Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência do reforço, formado pela colagem de fibras de carbono, na resistência ao cisalhamento de vigas de madeira laminada colada que apresentam entalhes nas extremidades.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que este trabalho atinja o resultado esperado será necessário o atendimento dos seguintes objetivos específicos:

- Investigar a eficiência do adesivo epóxi na colagem das fibras de carbono nas vigas de MLC;
- Verificar a influência do reforço no modo de ruptura das vigas de MLC entalhadas;
- Avaliar o comportamento das vigas entalhadas de MLC sem reforço e com reforço de fibras de carbono, com a consequente determinação dos módulos de elasticidade e módulos de ruptura.
- Determinar a resistência ao cisalhamento das vigas de MLC entalhadas sem reforço e com reforço de fibras de carbono.
- Comparar os resultados experimentais com os valores obtidos analiticamente pelas recomendações de normas pertinentes.

1.2.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- No Cap.2 é apresentada a revisão bibliográfica, buscando-se a fundamentação do tema, retratando a fabricação de vigas de MLC, fatores que influenciam na resistência das vigas, definição de reforço com ênfase em reforço estrutural utilizando materiais compósitos de fibras e resinas. Também se apresentam trabalhos realizados no campo de reforço de vigas de MLC utilizando polímeros reforçados com fibras. Em seguida é retratada a influência das tensões de cisalhamento em vigas de madeira, com e sem entalhes, bem como alguns trabalhos realizados nesse campo. Por fim, são apresentados os critérios normativos nacionais e internacionais para o dimensionamento do entalhe e dimensionamento do reforço na região do entalhe.
- No Cap. 3 inicialmente são apresentadas as considerações para determinação das dimensões do entalhe e também da viga de MLC. Em seguida se apresentam as considerações para determinação das configurações do reforço, bem como os materiais utilizados, suas características e o procedimento para aplicação do reforço de acordo com as recomendações do fabricante. Posteriormente é apresentado o plano de ensaio de flexão de três pontos, com as recomendações normativas e as equações necessárias para determinação dos módulos de elasticidade, módulos de ruptura e tensão de cisalhamento. Por fim são apresentados os ensaios para caracterização das vigas de MLC e ensaios para caracterização da madeira empregada na produção das vigas de MLC.
- No Cap. 4 são apresentados os resultados da caracterização do material bem como os resultados do ensaio de flexão para cada configuração de viga. Neste capítulo também é feita a comparação dos resultados com os estudos de Jockwer (2012), bem como com os resultados teóricos presentes na norma alemã DIN 1052 (2004).
- No Cap. 5 são abordadas as conclusões do trabalho e recomendações para continuação do estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo está organizado para apresentar resultados de pesquisas recentes, como também fundamentos necessários para a compreensão deste trabalho. Inicialmente é apresentada a definição de madeira laminada colada, discorrendo sobre o início da utilização desta técnica, o processo de fabricação, os fatores que influenciam na sua resistência e também retratadas pesquisas nas quais se realiza o reforço de vigas de MLC utilizando polímeros reforçados com fibras.

Logo após é abordado o efeito das tensões de cisalhamento no comportamento das vigas e seu modo de ruptura, sendo apresentadas também pesquisas sobre diversos tipos de reforços em peças de madeira, nas quais as tensões de cisalhamento controlam o comportamento da peça. São apresentadas as características dos adesivos e detalhes de resistência dos mesmos na fabricação de peças de MLC e na aplicação de reforço com fibras sintéticas.

Em seguida é dado ênfase na influência do entalhe em peças estruturais. Também são abordados parâmetros que influenciam na resistência de vigas entalhadas, bem como são apresentados critérios normativos nacionais e internacionais no dimensionamento do entalhe e também no dimensionamento de um possível reforço na região do entalhe. Por fim são apresentadas pesquisas relativas à eficiência do reforço na resistência da peça e a influência das dimensões do entalhe na resistência da peça.

2.1 Madeira Laminada Colada (MLC)

De acordo com Moody et al. (1999), a construção de um auditório em Basel, na Suíça, no ano de 1893, é frequentemente citado como um dos primeiros usos significativos da madeira laminada colada (MLC). Inicialmente este produto ficou conhecido como *Hertzer System*, que durante os primórdios ficou limitado à ambientes secos devido à ausência de adesivos à prova de água. A busca por adesivos sintéticos à prova de água se deu durante a Segunda Guerra Mundial, possibilitando a utilização de MLC em pontes e demais ambientes externos que necessitassem de tratamento.

A introdução de MLC nos Estados Unidos da América aconteceu em um edifício construído no ano de 1934, no *Forest Products Laboratory* na cidade de Madison,

Winsconsin, conforme Figura 2.1. No final da década de 1930 houve o estabelecimento de diversas indústrias utilizando esta tecnologia na construção de ginásios, igrejas, salões, fábricas e bares. O avanço das pesquisas, somado ao aumento das indústrias, fez com que em 1952 surgisse o *American Institute of Timber Construction (AITC)*, associação formada pelos fabricantes de MLC que, no ano de 1963, patrocinou o desenvolvimento da primeira norma norte-americana disciplinando a fabricação e concepção de peças de MLC (MOODY; HERNANDEZ, 1997).

Figura 2.1– Utilização de MLC nos Estados Unidos da América



Fonte: Moody et al. (1999)

Segundo Zangiácomo (2003), a primeira indústria implantada no Brasil data de 1934, em Curitiba/PR, denominada ESMARA Estruturas de Madeira Ltda, possuindo obras marcantes na Região Sul do país. Atualmente destaca-se no cenário nacional a empresa REWOOD. Fundada em 2009, a empresa produz vigas de MLC dentro das normas americanas, canadenses, européias e brasileiras utilizando somente madeira proveniente de reflorestamento para construção das peças de MLC.

2.1.1 Definição

De acordo com Freas e Selbo (1954), o termo madeira laminada colada, quando aplicado a peças estruturais, refere-se à colagem de pequenas peças de madeira – denominadas lamelas, na forma reta ou curva, com as fibras das lamelas paralelas ao eixo longitudinal da peça. Para se obter maior largura das peças, as lamelas podem ser coladas lateralmente. Segundo Miotto (2009), o formato das peças se ajusta às exigências de projeto, podendo ter as mais variadas formas e dimensões. Entretanto, a espessura máxima recomendada para as lamelas deve ser inferior a 50 mm.

Allen e Iano (2013) retratam que existem três razões principais para realizar a laminação da madeira: tamanho, forma e a qualidade. O tamanho da peça estrutural fica restrito somente à capacidade máxima dos equipamentos de prensagem e içamento, além da logística de transporte. A laminação da madeira proporciona a criação de formas não encontradas na natureza: curvas, ângulos e seções transversais diversas, conforme a Figura 2.2. Somado a isso, os fatores da qualidade da peça podem ser acompanhados de perto, reduzindo-se ou eliminando-se os defeitos típicos da madeira serrada.

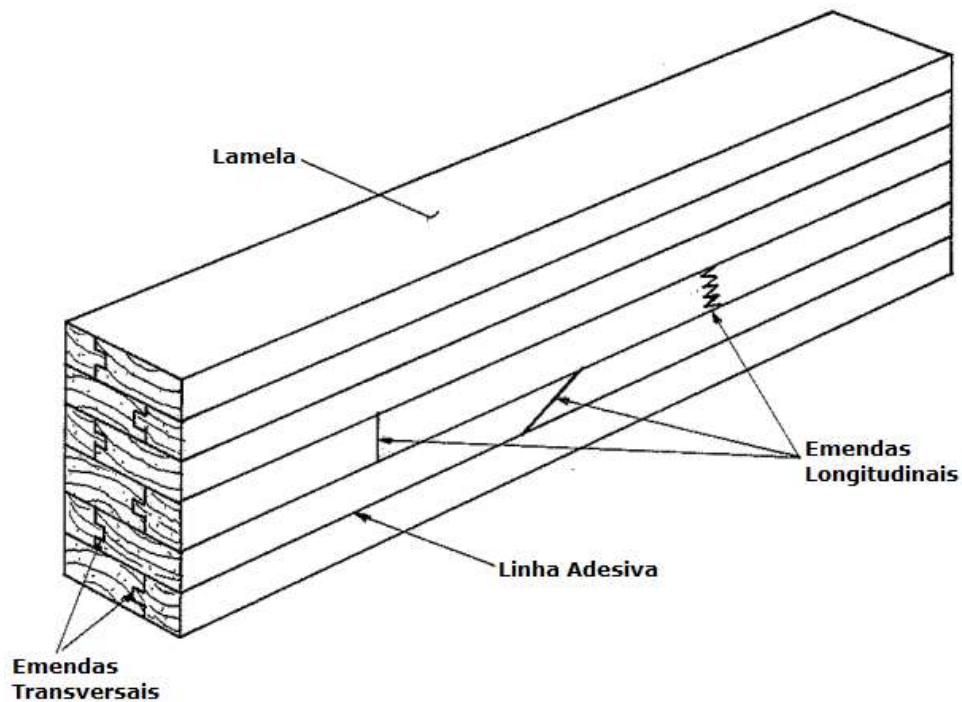
Figura 2.2 – Estrutura de madeira laminada colada (MLC)



Fonte: Adaptado de Western archrib (2018)

Segundo Mantilla Carrasco (1989), os elementos que constituem uma peça de madeira laminada colada podem ser ilustrados conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3– Elementos de uma viga de MLC



Fonte: Mantilla Carrasco (1989)

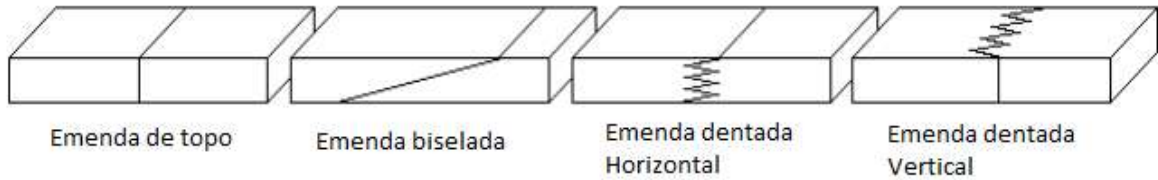
Na Figura 2.3 são identificados os seguintes constituintes:

- Lamela: peça de espessura variável entre 1 cm (3/8”) e 5 cm (2”), dependendo do tipo da peça estrutural;
- Linha adesiva: constituída por um adesivo compatível com a madeira e com a finalidade da peça estrutural;
- Emendas longitudinais: são utilizadas com o intuito de se obter lamelas com comprimento maior;
- Emendas transversais: são utilizadas com o intuito de se obter maiores larguras.

Macêdo (1996) afirma que as emendas longitudinais mais comuns são: emendas de topo, emendas biseladas emendas dentadas (*fingerjoints*), conforme a Figura 2.4. Segundo o autor, as emendas de topo são consideradas como as mais simples e não desperdiçam madeira, no entanto apresentam baixa resistência e, portanto, não são recomendadas. As emendas biseladas apareceram como uma solução para as limitações das emendas de topo, apresentando elevada resistência. No entanto, esse tipo de emenda possui um elevado consumo de madeira e de adesivo, já que para se obter uma boa resistência o corte bisel deve apresentar baixa inclinação, da ordem de 1:10. As emendas dentadas surgiram como

alternativa para substituir a emenda biselada. Atualmente este tipo de emenda é a mais utilizada, principalmente por adaptar-se ao processo industrial e apresentar boa resistência.

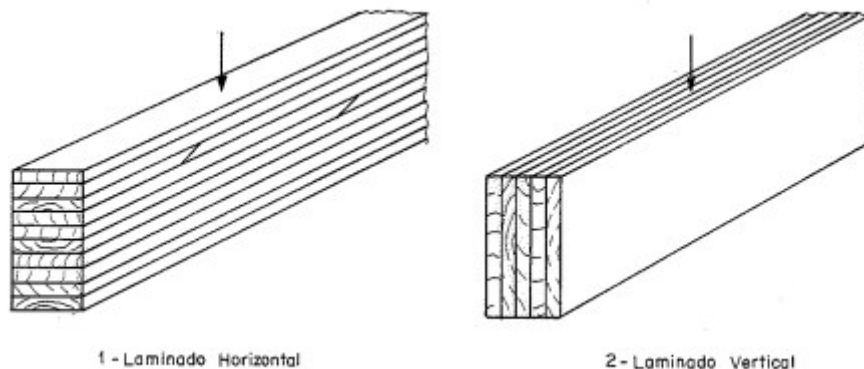
Figura 2.4 – Tipos de emendas longitudinais



Fonte: Macêdo (1996)

De acordo com Fiorelli (2005), a madeira laminada colada pode ser classificada em vertical ou horizontal, dependendo da estruturação das lamelas em relação ao plano da peça, conforme Figura 2.5.

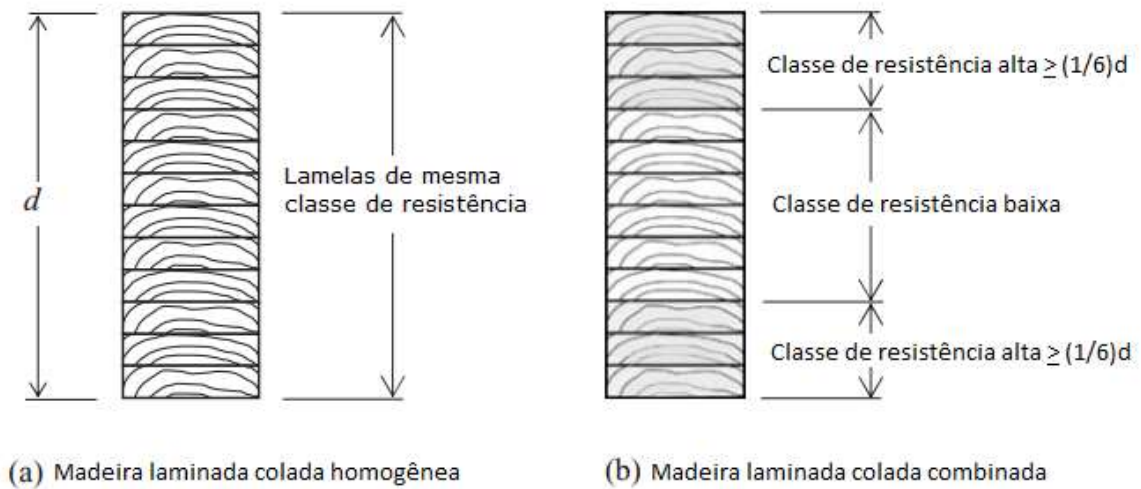
Figura 2.5– Tipos de MLC conforme estruturação das lamelas



Fonte: Mantilla Carrasco (1989)

Porteous e Kermani (2007) afirmam que a madeira laminada colada horizontal pode ser dividida em dois grupos, de acordo com a classe de resistência das lamelas, sendo eles: lamelas homogêneas, ou seja, de mesma resistência, ou por combinação de lamelas com diferentes resistências ou de diferentes espécies, conforme Figura 2.6.

Figura 2.6– Tipo de MLC conforme a classe de resistência das lamelas



Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007)

Segundo Falk e Colling (1995), a colagem de lamelas resulta em vigas de maior resistência do que as lamelas individuais. Esse fenômeno é chamado efeito de laminação. Quando as lamelas são coladas, os defeitos tais como os nós e outras áreas de baixa rigidez são reforçados pelas lamelas adjacentes. Esse reforço fornece caminhos alternativos para que as tensões fluam ao redor dos defeitos por meio das lamelas adjacentes, conforme a Figura 2.7. O autor ainda retrata que as principais explicações para o efeito de laminação são o reforço dos defeitos e também o efeito da dispersão.

Figura 2.7– Redistribuição de tensões



Fonte: Adaptado de Falk e Colling (1995)

Para Moody et al. (1999), quase todas as espécies de madeira podem ser usadas para confecção de MLC, desde que suas propriedades mecânicas e físicas sejam apropriadas e também seja possível uma colagem adequada. Mantilla Carrasco (1989) evidencia algumas vantagens da MLC em relação às peças estruturais de madeira maciça, tais como:

- Facilidade na confecção de grandes peças estruturais a partir de peças com medidas comerciais, pois a utilização do adesivo permite criar diferentes espessuras, larguras, comprimentos e formas;
- Redução dos defeitos decorrentes da secagem das lamelas, tal como rachaduras;
- Possibilidade de criar grandes efeitos arquitetônicos;
- Possibilidade de utilização de lamelas de menor resistência em zonas de menor solicitação, bem como utilização de lamelas de maior resistência em zonas de maior solicitação, resultando em melhor eficiência estrutural que as peças equivalentes em madeira serrada.

De acordo com Azambuja (2005), a possibilidade do emprego de lamelas de melhor qualidade em regiões de alta solicitação, bem como o emprego de lamelas de qualidade inferior nas regiões de menor solicitação, propicia a fabricação de elementos estruturais com qualidade superior à madeira serrada, já que defeitos como os nós e medula são previamente classificados, não comprometendo a resistência e a rigidez da peça. De acordo com o mesmo autor, um dos principais aspectos favoráveis à utilização de MLC está na utilização de madeiras provenientes de reflorestamento, preservando assim as matas nativas.

Mantilla Carrasco (1989) afirma que a utilização de MLC apresenta diversas vantagens em relação aos outros materiais, tais como:

- Relação entre peso e a resistência da MLC é baixa, favorecendo o manuseio das peças gerando um baixo custo;
- As grandes dimensões da seção transversal condicionam a MLC ser mais resistente ao fogo do que estruturas de aço projetadas para o mesmo carregamento;
- Resistência excelente à corrosão;
- Fundações leves, devido ao baixo peso próprio dos elementos estruturais;
- Manutenção mínima em peças localizadas no interior da estrutura.

No entanto, o sistema de MLC possui algumas peculiaridades, como o preço final das peças, que se apresenta mais elevado quando comparado com a madeira serrada devido a fatores como a utilização de adesivo, mão de obra especializada, seleção da madeira e também o custo adicional elevado no transporte de grandes elementos estruturais. Outro fator importante é a alta perda, variando de 13% a 33%, tanto na madeira como no adesivo, que se

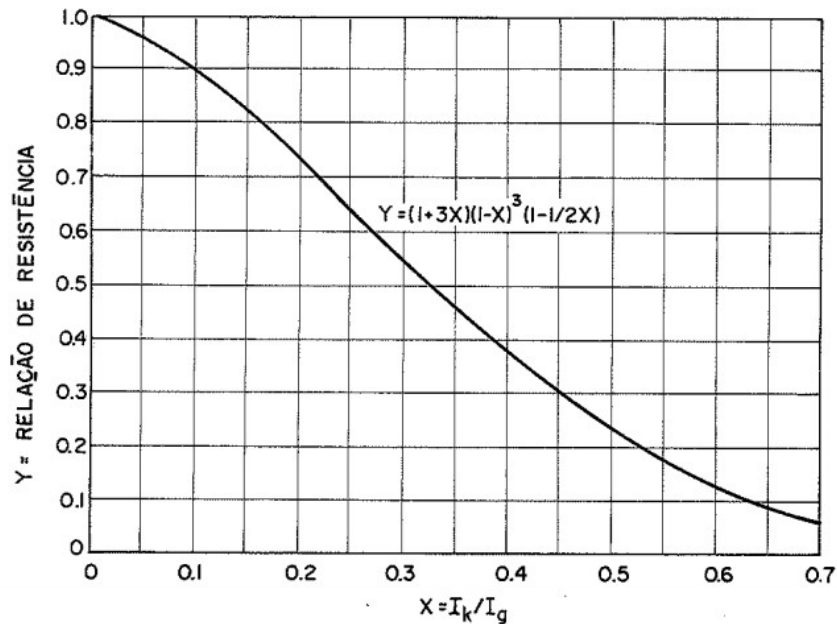
deve pela utilização de emendas, acabamentos e considerações de projeto (MANTILLA CARRASCO, 1989).

2.1.2 Fatores que influenciam a resistência da MLC

Segundo Mantilla Carrasco (1989), o aparecimento da madeira laminada colada contribuiu para utilização eficiente da madeira, uma vez que as lamelas podem ter seções e comprimentos pequenos possibilitando também a combinação de lamelas com qualidades diferentes. Segundo o mesmo autor, os principais fatores que influenciam na resistência de peças de MLC são: resistência da madeira, espécie da madeira, número de nós, direção das fibras, emendas longitudinais e transversais das lamelas, espessura e número de lamelas, qualidade e localização da lamela, módulos de elasticidade (E e G), dimensões da peça estrutural e a distribuição de tensões.

De acordo com Freas (1956), o efeito da presença de nós depende da sua forma e de sua posição na peça estrutural. Regiões de baixa tensão normal são menos afetadas pelos nós em comparação com regiões de alta tensão normal. Estudos realizados mostraram uma relação entre as propriedades de flexão e a razão entre I_k/I_g , sendo I_k o momento de inércia das áreas ocupadas pelos nós em um comprimento de 6 polegadas (15,24 centímetros), presentes na peça, e I_g representa o momento de inércia da peça, conforme Figura 2.8. A relação entre os fatores I_k/I_G mostra que é possível a utilização de lamelas com grandes nós na região central da peça e pequenos nós na parte externa, sem que haja uma redução considerável da resistência, quando comparado a uma viga em que todas as lamelas apresentem pequenos nós.

Figura 2.8– Relação entre nós e resistência da peça



Fonte: Adaptado de Freas (1956)

Mantilla Carrasco (1989) afirma que as emendas são um fator importante na resistência da MLC, pois representa uma região enfraquecida devido à descontinuidade da lamela. No entanto, o uso de emendas em grandes peças de MLC se torna imprescindível fazendo com que alguns cuidados devam ser tomados na fabricação da mesma, tais como: geometria da emenda, projeto de corte, montagem, cura do adesivo, pressão, temperatura, umidade e densidade da madeira, presença de madeira juvenil e inclinação das fibras.

2.1.3 Fabricação de MLC

Segundo Fiorelli (2005), a densidade da madeira é um fator primordial no desempenho de peças de MLC. De acordo com o autor, várias pesquisas retratam que devem ser utilizadas madeiras com densidade entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, as espécies de madeira mais indicadas devem apresentar densidade em torno de $0,50 \text{ g/cm}^3$.

Moody et al. (1999) afirmam que a fabricação de peças de MLC se divide em quatro etapas: a) secagem e classificação da madeira; b) realização das emendas; c) colagem das lamelas; d) acabamento.

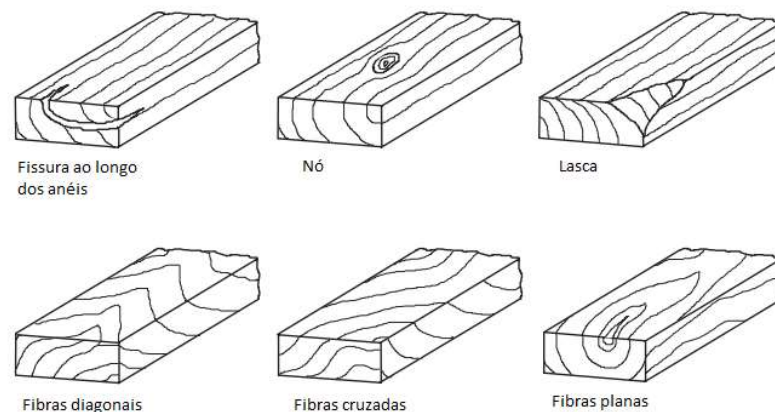
Na primeira etapa as lamelas de madeira passam por um processo de secagem, geralmente esse processo é feito em estufa visando minimizar as alterações dimensionais e se beneficiar do aumento das propriedades estruturais com a redução do teor de umidade da

madeira. Para diminuir as variações dimensionais da peça, a diferença de umidade entre as lamelas adjacentes deve ser no máximo de 5% (MOODY et al., 1999).

Segundo a ANSI/APA A190.1 (2012), o teor de umidade não deve exceder 16%. Stark et al. (2010) afirmam que a verificação do teor de umidade das lamelas de madeira, no momento da fabricação, tem fundamental importância para diminuição dos efeitos de retração e inchamento. Ainda segundo o autor, os fabricantes de MLC utilizam medidores para determinação do teor de umidade das peças de madeira que entram no processo produtivo, retirando assim as peças que apresentem teor de umidade acima do permitido, encaminhando para secagem.

Em seguida é feita a classificação visual e mecânica das peças de madeira. A classificação visual das peças serve para a verificação da presença e determinação do tamanho dos nós, direção das fibras, fissuras, lascas, conforme a Figura 2.9.

Figura 2.9– Defeitos a inspecionar na classificação visual



Fonte: Adaptado de Porteous e Kermani (2007)

A classificação mecânica da madeira é realizada por meio de ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade longitudinal das lamelas (E). Entre os ensaios estão: flexão estática, vibração transversal, MSR (*Machine Stress Rated*), ultrassom e *stress wave*, conforme mostra a Figura 2.10 (FIORELLI, 2002).

Figura 2.10– Equipamentos para classificação mecânica



Fonte: Fiorelli (2002)

Para a fabricação de peças de MLC com dimensões maiores às encontradas na madeira serrada, é necessário fazer união das lamelas por meio de emendas, correspondendo à segunda etapa do processo produtivo. Usualmente as emendas mais utilizadas são as dentadas, também conhecidas como *fingerjoints* (Figura 2.11), apresentando dentes de aproximadamente 28 mm de comprimento. Outras configurações também são aceitáveis, desde que atendam aos requisitos de resistência e durabilidade. As emendas têm fundamental importância para resistência da MLC. Assim, a execução de qualidade das emendas se torna um fator primordial no desempenho da peça. Deste modo, alguns cuidados são muito importantes durante a execução dessas emendas, tais como: qualidade das lamelas, fabricação da emenda, aplicação do adesivo, junção, aplicação de pressão e cura (STARK et al., 2010).

Figura 2.11 – Emenda dentada



Fonte: Miotto (2009)

De acordo com Moody et al. (1999), as emendas devem estar livres da presença de nós, pois prejudicaria a resistência das mesmas. Ainda segundo o autor, as emendas dentadas devem atingir no mínimo 75% da resistência das lamelas sem defeitos. Essa redução da resistência é adequada, pois na maioria das peças de madeira utilizadas para produção de MLC é permitida a presença de características naturais que reduzem até 25% da resistência da mesma.

Szücs et al. (2015) afirmam que a distribuição das emendas dentadas, ao longo das peças de MLC, deve respeitar alguns fatores, tais como:

- Em lamelas mais externas, ou seja, localizadas na quarta parte externa da altura da seção transversal de vigas, as emendas nas lamelas adjacentes devem respeitar o espaçamento mínimo de 20 vezes a espessura da lamela;
- Em lamelas dispostas na metade central da peça, o espaçamento entre as emendas em lamelas adjacentes deve ser no mínimo 12 vezes a espessura da lamela;
- No comprimento de 305 mm, o número de emendas não deve ultrapassar o número total de lamelas dividido por quatro.

Hernandez (2002, apud FIORELLI, 2005) afirma que o espaçamento entre as emendas dentadas, ao longo de uma mesma lamela, deve ser de no mínimo 1800 mm, enquanto que para lamelas adjacentes o espaçamento deve ser superior a 150 mm. Segundo ABNT NBR 7190:1997, o espaçamento mínimo entre as emendas adjacentes deve ser igual a $25t$ ou a altura h da viga, sendo t a altura da lamela.

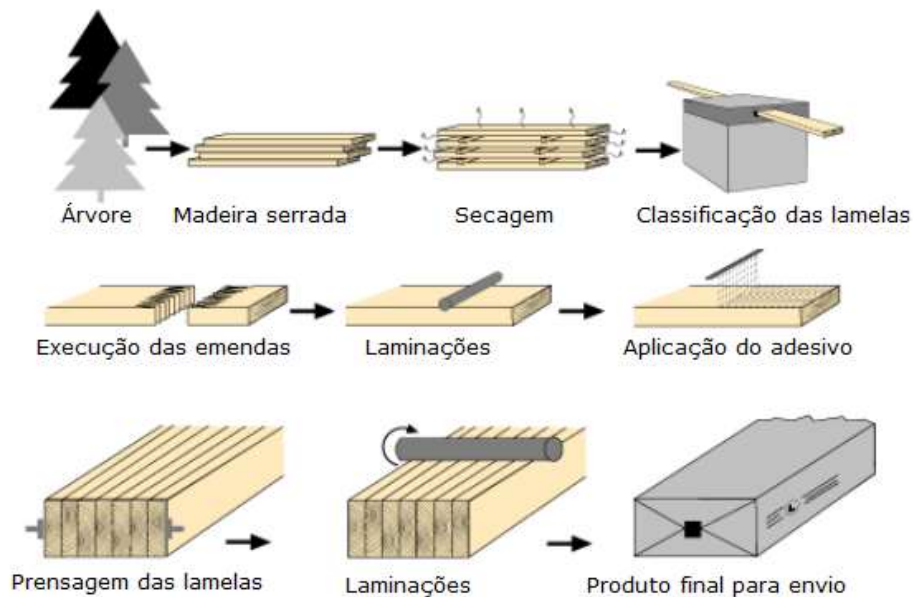
A terceira etapa do processo produtivo compreende a disposição e colagem das lamelas. Nesse estágio, laminações são feitas para aplainar as duas superfícies das lamelas deixando-as limpas, paralelas e aptas ao processo de colagem, garantindo uma aplicação uniforme da pressão. Logo após ocorre a aplicação do adesivo na superfície da lamela. Com a disposição correta das lamelas, ocorre a prensagem das peças. Geralmente a aplicação da pressão é feita por meio de braçadeiras ligadas a um sistema mecânico ou hidráulico. A cura da peça ocorre de 6 até 24 horas, podendo ser reduzida a alguns minutos pelo processo de radiofrequência (STARK et al., 2010).

De acordo com Fiorelli (2002), as lamelas de madeira podem ser arrançadas seletivamente para aumentar a resistência e rigidez da peça. Segundo o mesmo autor, lamelas de madeira com coeficiente de retração radial e tangencial muito diferentes não devem ser utilizadas na composição de uma peça de MLC. Segundo APA (2008), as vigas de MLC são produzidas

com lamelas de melhor resistência na parte superior e inferior da peça, onde ocorrem máximas tensões de tração e compressão. Esse conceito permite que lamelas de alta qualidade sejam dispostas em regiões de máximas tensões, enquanto que lamelas de madeira de baixa qualidade sejam utilizadas em regiões de baixa tensão, permitindo assim o uso mais eficiente da madeira.

Após a prensagem da peça de MLC começa a última etapa do processo de fabricação. As faces da peça são aplainadas e é retirado o excesso de adesivo que escorre durante o processo de prensagem. Em seguida são realizados os cortes finais, furos, instalação dos conectores e aplicação de selador, se especificado. Por fim qualquer proteção a mais nas peças de MLC depende de seu uso e deve ser especificado (STARK et al., 2010). A Figura 2.12 ilustra de forma generalizada o processo de fabricação de peças de MLC.

Figura 2.12– Processo generalizado da fabricação de MLC



Fonte: Adaptado de Malo e Angst (2008)

2.1.4 Adesivos

Segundo Mantilla Carrasco (1984), é fundamental compreender as propriedades dos adesivos para sua preparação e também aplicação. De acordo com Fiorelli (2005), a escolha do adesivo ideal na fabricação de peças de MLC depende do ambiente em que a peça estrutural está inserida, ou seja, depende de fatores como: temperatura e teor de umidade do ambiente. A ABNT NBR 7190:1997 estabelece que os adesivos utilizados devem ser à prova d'água.

De acordo com Szücs (2015), para escolha do adesivo deve-se observar a localização da peça de MLC, ou seja, se está no interior da edificação ou exposta a variação das condições atmosféricas tais como alternância de sol e chuvas, conforme Figura 2.13. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, deve ser avaliado na lâmina de adesivo a resistência à tração e ao cisalhamento, sendo que os resultados desses ensaios devem apresentar no mínimo 90% da resistência da própria madeira, quando a mesma for submetida aos mesmos ensaios.

Figura 2.13– Tipo de adesivo em função do uso da estrutura

| | boas condições atmosféricas | más condições atmosféricas | |
|--|--------------------------------------|----------------------------|---|
| | umidade da madeira | | exposição em atmosfera contendo produtos químicos opu exposição direta às |
| | < 18% | ≥ 18% | |
| temperatura elevada | resorcina caseína | resorcina | resorcina |
| temperatura normal | resorcina caseína uréia-formol | resorcina uréia-formol | resorcina |
| obs: As colas de resorcina-fenol devem oferecer as mesmas condições das colas de resorcina pura. Na dúvida, devem ser realizados ensaios de laboratório. | | | |

Fonte: Adaptado Szücs (2015)

Fiorelli (2002) explica que os adesivos podem ser definidos como substâncias com função de unir materiais por meio do contato entre suas superfícies. Os mesmos podem ser classificados de acordo com sua composição química em inorgânicos e orgânicos. Mantilla Carrasco (1984) retrata que os adesivos inorgânicos mais comuns são à base de silicatos, atingindo elevada resistência mecânica.

Mantilla Carrasco (1984) afirma que os adesivos orgânicos se dividem em dois grupos: adesivos sintéticos e adesivos naturais. Dentre os de origem natural os principais são: animal, caseína, soja, sangue, amido e celulósico. Segundo Fiorelli (2002), os adesivos sintéticos, devido a sua resistência à água e por não sofrerem ação de microrganismos, se apresentam como os mais utilizados na indústria madeireira, se dividindo em termofixos e termoplásticos.

Os termofixos se apresentam como adesivos que endurecem por meio de reações químicas ativadas pela temperatura ou catalisadores. Suas principais características são:

elevada resistência à umidade e ao calor. Nesse grupo pode-se destacar: resorcinol-formaldeído, fenol-formaldeído, uréia formaldeído, poliuretanos e epóxi (FIORELLI, 2002).

De acordo com Henriques de Jesus (2002), o adesivo resorcinol-formaldeído é geralmente utilizado em estruturas de madeira expostas à temperatura ambiente ou pouco aquecidas. Quando a colagem é realizada com aquecimento moderado são incorporadas resinas fenólicas, formando o fenol-resorcinol-formaldeído. Miotto (2009) retrata que o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído é frequentemente utilizado e conhecido pela designação comercial Cascophen. Segundo Peterson (1964 apud HENRIQUES DE JESUS, 2000), esses adesivos são impermeáveis, possuindo elevada resistência estrutural, ultrapassando a resistência da própria madeira.

Por sua vez, Carvalho (2005) ressalta que os adesivos poliuretanos pertencem ao grupo dos materiais compostos por macromoléculas possuindo repetidas ligações uretanas. Segundo Henriques de Jesus (2000), esse adesivo foi bastante utilizado na produção de chapas de madeira aglomerada na década de 60. Segundo o mesmo autor, estudos realizados sobre a colagem dessas chapas com adesivos a base de poliuretano indicaram propriedades superiores comparadas às chapas coladas com adesivo fenólico. De acordo com Stark et al. (2010), as poliuretanas comerciais possuem uma grande gama de viscosidade e são ofertadas em sistemas de mono ou bicomponente.

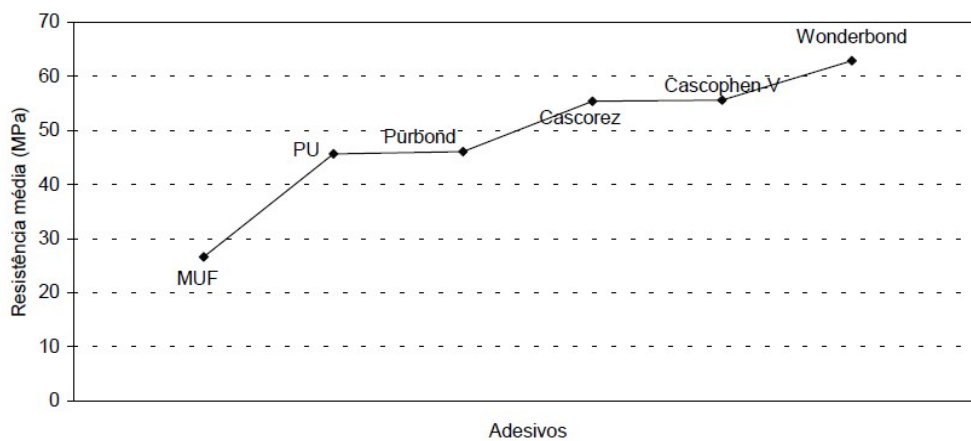
Miotto (2009) expõe adesivo poliuretano bicomponente melamina-uréia-formaldeído (MUF), o qual possui vantagens como menor tempo de cura e linha de cola transparente após a catalisação. O autor também cita outras duas resinas: a resina poliuretana mono componente, conhecida como Purbond HB530, fabricada pela Purbond, e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, que foi desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, possuindo um grande potencial para produção de MLC. Azambuja (2006) afirma que o adesivo Purbond vem sendo utilizado na Europa desde os anos 1990. Por ser um monocomponente, apresenta 100% (não contém solvente) de sólidos necessitando de uma menor quantidade de adesivo na sua utilização.

De acordo com Henriques de Jesus (2000), as resinas epóxi são produzidas a partir de resinas à base de epicloridrina e por resinas formadas por peroxidação. Fiorelli (2002) retrata que as resinas epóxi apresentam uma característica particular de transformar-se em um sólido termorrígido, a partir de um estado líquido. O autor afirma ainda que a resina epóxi no estado termoplástico possui características tais como: viscosidade, ponto de fusão, porcentagem de insaturação, peso molecular e distribuição de peso molecular.

Os adesivos termoplásticos têm como principal característica a cura reversível. O aumento da temperatura causa o amolecimento da resina que volta a se solidificar ao ser resfriada. Apresentam grande resistência à ação de microrganismos e não mancham a madeira, no entanto não devem ser usados em obras pesadas, onde a resistência das juntas deve ser alta, e em peças coladas sujeitas a intempéries (HENRIQUES DE JESUS, 2000).

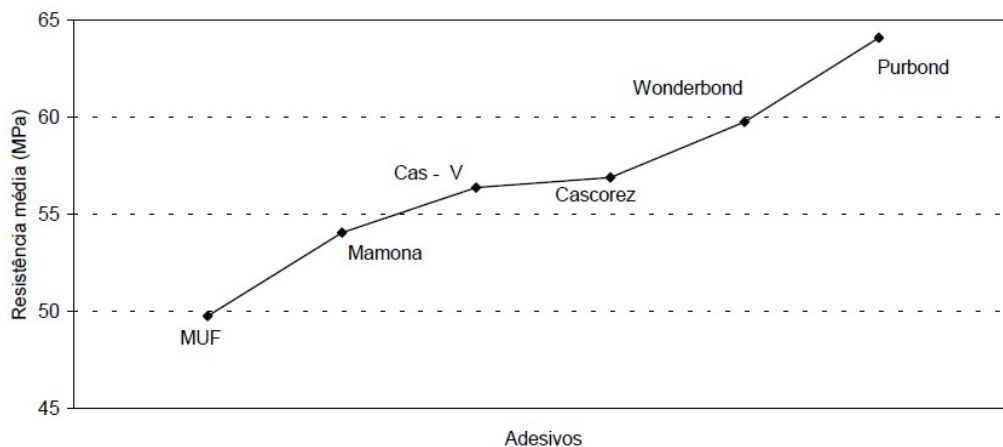
Azambuja (2006) realizou estudo comparativo entre os diversos adesivos na fabricação de madeira laminada colada. Os resultados da resistência à tração de lamelas de pinus e eucalipto coladas com adesivos: poliuretano à base de óleo de mamona, Cascophen, Cascorez, Wonderbond, MUF (melamina-uréia formaldeído) e Purbond encontram-se ilustrados nas Figuras 2.14 e 2.15.

Figura 2.14 - Resistência média para diferentes adesivos, para espécie Pinus



Fonte: Azambuja (2006)

Figura 2.15- Resistência média para diferentes adesivos, para espécie Eucalipto



Fonte: Azambuja (2006)

2.2 Estruturas de madeira reforçada com fibras

2.2.1 Reforço estrutural

Segundo Souza e Ripper (1998), as estruturas e seus materiais deterioram-se independente de uma manutenção bem planejada, tornando-se irreversível no limite. Falhas no projeto ou na execução resultam em um desempenho insatisfatório nos primeiros anos de vida da estrutura. Intervenções como recuperação, reforço, limitação de uso ou até mesmo a demolição da estrutura se tornam necessárias, dependendo do desempenho da estrutura.

Juvandes (2002) retrata que uma estrutura, ao longo do tempo, pode ser submetida a diversos fatores tais como: aumento das cargas, novas exigências normativas, acidentes, além de erros na fase de projeto ou construção, que obrigam a realização de reforço ou substituição da estrutura danificada por outra nova.

Segundo Carneiro (2004), a utilização de materiais compósitos de resinas e fibras surgiu há 20 anos. Dentre suas vantagens estão: a alta resistência à tração, boa resistência à corrosão, aos ataques químicos e às cargas dinâmicas, pequeno peso, boa capacidade de deformação, disponibilidade em várias formas, tipos e dimensões.

Os compósitos resultam da combinação de duas fases: uma chamada de *matriz* que envolve a segunda fase chamada de *fase dispersa*. Suas propriedades não dependem apenas das características da fibra como também do modo de como ocorre a transmissão dos esforços da matriz para as fibras, dado que somente uma pequena proporção da força aplicada é resistida pela matriz. A matriz deve apresentar ductilidade, módulo de elasticidade muito menor do que o da fibra, além de proteger as fibras de danos na superfície decorrentes de desgaste mecânico ou químico (CALLISTER, 2009).

Juvandes (2002) afirma que a engenharia civil desenvolveu interesse em aplicar esses materiais sob a forma de polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras, cuja sigla internacional é FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), empregados como armaduras não metálicas. De acordo com Carneiro (2004), a escolha da resina deve estar relacionada com o tipo de fabricação do compósito e no ambiente que será inserida. Por outro lado, a escolha da fibra está relacionada com a sua resistência, rigidez e durabilidade.

Para Juvandes et al. (1996), o desempenho de um compósito depende da orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras, das propriedades mecânicas da resina, além da interação entre as fibras e a matriz.

Para Miotto (2009), as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras dependem diretamente do tipo da fibra, orientação e arquitetura. Segundo este autor, os compósitos podem ser considerados como materiais anisotrópicos, viscoelásticos e com relação tensão-deformação linear até a ruptura. Pode-se dizer que os compósitos apresentam excelentes características sendo elas: alta resistência mecânica, dureza, resistência à fadiga e baixo peso, bem como alta resistência a: abrasão, corrosão e ataques químicos.

2.2.2 Fibras naturais

Miotto (2009) retrata que a utilização de fibras naturais acontece desde a Antiguidade. O autor ainda afirma que em 800 a.C. os israelitas usaram a palha como reforço na manufatura de tijolos e que a utilização de fibras naturais apresenta grande importância, pois possuem algumas vantagens, tais como: abundância, biodegradabilidade e baixo custo, quando comparado às fibras sintéticas.

Silva (2004) afirma que diversas fibras podem ser utilizadas como reforço sendo elas: fibra de bambu, fibra de sisal, fibra de eucalipto, fibra de juta, fibra de coco e fibra de banana. Carvalho (2005) realizou um estudo sobre a aplicabilidade das fibras de sisal como reforço das estruturas de madeira encontrando resultados satisfatórios. O autor avaliou o desempenho dos compósitos de sisal-epóxi em ensaios de flexão em vigas de madeira, no qual foi constatado o aumento médio 14,2 % na rigidez da peça.

Borri et al. (2013) realizaram ensaios de flexão de vigas de madeira de alta qualidade mecânica reforçadas com fibras de basalto e linho. Os autores obtiveram resultados satisfatórios conseguindo aumento médio da resistência de 29,2% para o reforço com duas camadas de linho e aumento de 25,9% para o reforço com duas camadas de basalto.

2.2.3 Fibras sintéticas

Segundo Miotto (2009), as fibras sintéticas – como a fibra de vidro – vêm sendo utilizadas como reforço em cimento desde a década de 30, nos Estados Unidos da América.

Cardoso (2009) afirma que a produção de fibras sintéticas surgiu como uma imitação e substituição das fibras naturais. De acordo com o mesmo autor, durante a década de 60 houve desenvolvimentos na área de engenharia possibilitando a inovação de processos, melhoria da qualidade e investimentos de funções na produção de fibras polivalentes. Na década de 80 foram desenvolvidas as fibras de alto desempenho também chamadas na época de superfibras, caracterizadas pelo grupo das fibras de carbono e fibras de aramida.

De acordo com Fiorelli (2005), as fibras mais utilizadas para compor os FRPs são: fibra de vidro, Kevlar (aramida) e fibras de carbono.

2.2.3.1 Fibra de Vidro

Segundo Hull (1995), a maioria das fibras de vidro são fabricadas a partir de sílica (SiO_2) com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Normalmente as fibras de vidro se apresentam como materiais amorfos, sendo que cristalizações podem ocorrer devido ao tratamento prolongado com altas temperaturas. As principais vantagens das fibras de vidro são: baixo custo, alta resistência à tração, alta resistência química e excelentes propriedades de isolamento (MALLICK, 2008).

Dois tipos de fibras de vidro são mais utilizados na composição dos FRP, sendo eles E-Glass e S-Glass. As fibras E-Glass apresentam menor custo dentre as fibras de vidro e conseqüentemente são as mais utilizadas. As fibras S-Glass foram inicialmente desenvolvidas para serem utilizadas em componentes de aeronaves, apresentam maior resistência à tração em relação aos outros tipos de fibra de vidro. No entanto, a diferença na composição e o maior custo as tornam menos utilizadas em relação às fibras E-Glass. Um terceiro tipo de fibra de vidro, conhecida como C-Glass, é utilizada em ambientes quimicamente agressivos, apresentando maior resistência à corrosão aos ácidos, conforme Tabela 2.1 (MALLICK, 2008).

Tabela 2.1– Características das fibras sintéticas

| Fibras | Características | | |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Densidade (g/cm ³) |
| Unidirecional vidro (E) | 900 | 76 | 2,55 |
| Orgânica (Kevlar) | 1500 | 125 | 1,44 |
| Unidirecional carbono | 2200 | 160-300 | 1,75 |
| Lâmina carbono | 2400 | 165-300 | 1,9 |

Fonte: Adaptado de Hull (1995)

De acordo com Fiorelli (2002), a fibra de vidro sob a forma de tecido unidirecional é a mais indicada para formação do FRP. Dentre esses tecidos podem-se destacar os multiaxiais, sendo estes compostos pela superposição de fibras unidirecionais unidas por costura de fio de poliéster, apresentam melhores condições de manuseio e excelente propriedade mecânica, conforme Figura 2.16.

Figura 2.16– Tecido multiaxial de fibra de vidro

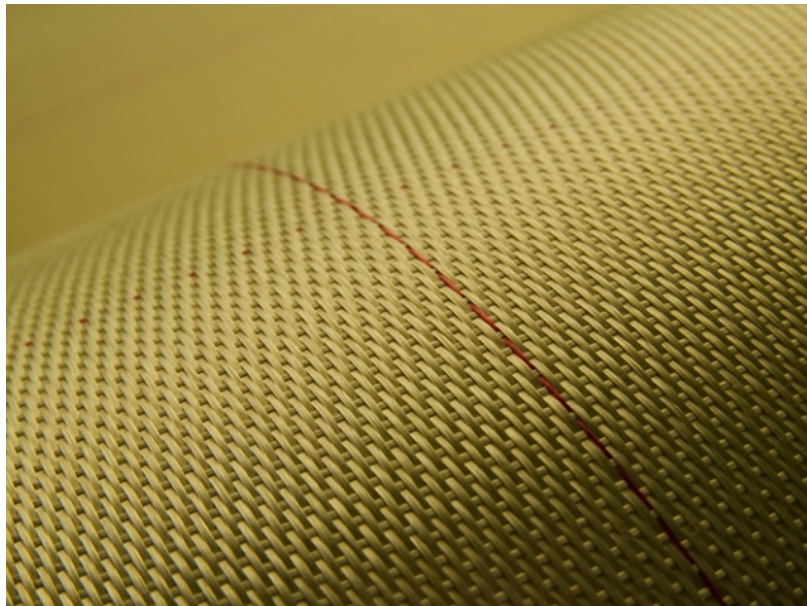
Fonte: Fibertex (2017)

2.2.3.2 Fibra de Aramida

As fibras orgânicas, conhecidas como Kevlar, marca registrada da empresa Dupont, são utilizadas principalmente na indústria aeroespacial e automobilística. No entanto, a busca por maior rigidez e leveza na indústria naval trouxe um aumento na utilização das fibras nos últimos anos. As fibras orgânicas podem apresentar três estruturas moleculares diferentes sendo elas: nylon, aramida e poliestireno (FIORELLI, 2002).

De acordo com Fiorelli (2002), as fibras orgânicas apresentam alta resistência específica (resistência/densidade) quando comparadas com as outras fibras comerciais. A Figura 2.17 retrata este tipo de material.

Figura 2.17– Fibra orgânica – Kevlar

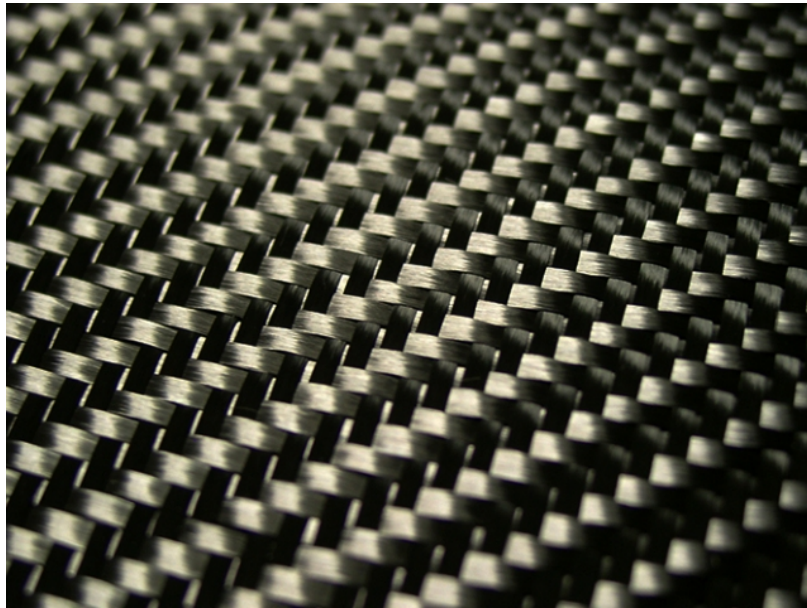


Fonte: Barracuda Composites (2017)

2.2.3.3 Fibra de Carbono

De acordo com Fiorelli (2002), as fibras de carbono (Fig. 2.18) nos últimos 50 anos vêm sendo utilizadas nas indústrias aeroespaciais, automotivas e de equipamentos esportivos devido a suas elevadas propriedades mecânicas de resistência e rigidez, baixo peso e fácil ligação aos outros materiais.

Figura 2.18– Fibra de Carbono



Fonte: Barracuda Composites (2017)

Ainda segundo Fiorelli (2002), as fibras de carbono são usualmente fabricadas a partir de uma fibra básica como Poliacrilonitrila (PAN), submetida a tratamentos como carbonização, oxidação e grafitização resultando em fibras com diversas configurações de resistência e módulo de elasticidade. Mallick (2008) afirma que as fibras de carbono provenientes da PAN podem ser classificadas em fibras de alta resistência e fibras de alto módulo de elasticidade.

Mallick (2008) afirma que as fibras de carbono comercialmente vendidas se apresentam com uma variedade de módulo de elasticidade, variando entre 207 GPa a 1035 GPa. As fibras com baixo módulo de elasticidade apresentam baixa densidade, baixo custo, alta resistência à tração e compressão quando comparadas com as fibras de alto módulo de elasticidade. Segundo Fiorelli (2002), as fibras de carbono apresentam baixo peso próprio, alta durabilidade, facilidade para assumir diversas formas, alta resistência e rigidez.

De acordo com Beber (2003), os polímeros reforçados com fibra de carbono, também conhecidos como *carbono fiber reinforced polymer* (CFRP), se destacam devido à:

- Alta relação das fibras de carbono entre a resistência e a rigidez com o seu peso próprio;
- Manutenção das propriedades de alta resistência e rigidez das fibras de carbono quanto submetidas à elevada temperatura;

- Fibras de carbono ficam protegidas à ação de vários solventes, ácidos, bases e umidade em temperatura ambiente;
- Versatilidade de aplicações em engenharia devido a diversidades de características físicas e mecânicas que a fibra apresenta.

Beber (2003) retrata dois sistemas de reforços utilizando CFRP, sendo eles: sistemas pré-fabricados e sistemas curados *in situ*. Segundo Juvandes (1999), o sistema pré-fabricado consiste em laminados semirrígidos de CFRP do tipo unidirecional. Esses laminados são produzidos por meio da impregnação de feixes ou camadas contínuas de fibra utilizando uma resina termorrígida. Em seguida ocorre a consolidação do compósito por um processo de pultrusão.

Juvandes (1999) ressalta que o sistema curado *in situ* é composto por fibras contínuas na forma de fios, mantas ou tecidos, podendo estar em estado seco ou pré-impregnado. Beber (2003) agrupou as principais características e técnicas de aplicação desses dois sistemas e realizou um panorama geral, conforme mostra a Tabela 2.2.

Segundo Fiorelli (2002), as lâminas e os tecidos são aplicados logo após a preparação da superfície da madeira ou concreto, sem que haja necessidade de qualquer instalação adicional. Atualmente, segundo o autor, os tecidos pré-impregnados vêm sendo escolhidos com frequência para realização de reforço. Esse tipo de tecido é fabricado a partir da impregnação, com resina, às fibras de carbono esticadas unidirecionalmente.

A empresa *S&P Clever Reinforcement Brasil* é uma companhia suíça situada entre as líderes mundiais na fabricação de FRP para reforço de estruturas. A empresa possui dentre seu catálogo de produtos as fibras de carbono na forma de mantas, laminados e cut-in. Dentre as fibras de carbono na forma de mantas vale destacar a fibra *S&P C-Sheet 640*, que é uma fibra unidirecional recomendada para aplicações em reforços ao cisalhamento.

Tabela 2.2– Característica e técnicas de aplicação das fibras de carbono

| Característica | Sistemas Pré-fabricados | Sistema curados <i>in situ</i> |
|---------------------------------------|--|---|
| Forma | tiras ou laminados | mantas ou tecidos |
| Espessura | 1,0 a 1,5 mm | 0,1 a 0,5 mm |
| Utilização | colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo | colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina (moldado e curado <i>in situ</i>) |
| Aspectos típicos da instalação | salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas Adesivo tixotrópico para colagem geralmente uma única camada rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada aplicação simplificada, maior garantia de qualidade (sistema pré-fabricado) | independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação frequentemente várias camadas aplicação do <i>putty</i> é necessária para prevenir o descolamento por imperfeições da superfície versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade |
| | controle de qualidade (má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas na integridade do reforço a longo prazo) | |

Fonte: Beber (2003)

2.2.3.4 Comparação entre as fibras

De acordo com Beber (2003), a combinação entre as fibras de carbono e uma matriz polimérica forma um compósito com excelentes qualidades para desempenho de recuperação e reforço das estruturas, devido a seus altos valores de resistência e módulo de elasticidade. A Tabela 2.3 agrupa as propriedades das fibras de carbono, vidro e orgânica, possibilitando fazer um comparativo entre as fibras.

Tabela 2.3– Características dos tecidos de fibras a 20°C

| Fibras | Características | | |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Densidade (g/cm ³) |
| Unidirecional vidro (E) | 900 | 76 | 2,55 |
| Orgânica (Kevlar) | 1500 | 125 | 1,44 |
| Unidirecional carbono | 2200 | 160-300 | 1,75 |
| Lâmina carbono | 2400 | 165-300 | 1,90 |

Fonte: Barracuda Composites (2000 apud FIORELLI, 2002)

De acordo com Fiorelli (2002), o obstáculo na utilização dos tecidos de fibra de carbono no Brasil está no alto custo do material, já que se trata de um material importado de alguns países tais como: Japão, Estados Unidos e Suíça, o que eleva o valor do material. Beber (1999, apud FIORELLI, 2002) acrescenta que o alto custo dos materiais leva ao emprego de reforços que não cobrem toda estrutura da peça, fazendo com que a instalação dos materiais em faixas seja adotada visando uma racionalização do material e diminuição do preço final da obra.

2.2.4 Madeiras reforçadas com fibras sintéticas

Segundo Miotto (2009), diversas tentativas foram feitas no que se refere ao reforço de peças de madeira. Segundo o autor, a utilização de placas de aço e de alumínio constitui as primeiras tentativas de reforço. A utilização de tiras de alumínio em peças de MLC se dava pela colagem de uma capa de alumínio nas partes externas da viga. As placas de aço são colocadas entre as lamelas de MLC, tanto verticalmente como horizontalmente. No entanto a principal desvantagem na utilização de placas de metal está no alto risco de corrosão, quando expostas em ambientes sujeitos às intempéries.

Miotto e Dias (2006) afirmam que existem dois tipos de reabilitação de estruturas de madeira, sendo elas: substituição das peças danificadas ou a junção de materiais à madeira que complementem a capacidade mecânica da estrutura. De acordo com os autores, a primeira dessas técnicas, mesmo sendo a mais usual, se depara com algumas limitações, tais como:

indisponibilidade de peças para devida substituição, elevado custo econômico e ambiental, além da escassez dos materiais envolvidos.

Segundo Carvalho (2005), além dos custos elevados na substituição das peças de madeira danificadas, os valores culturais dos elementos e as restrições econômicas e ambientais das espécies presentes nas construções históricas são fatores que dificultam a utilização desta técnica. Dessa maneira, surge a utilização de compósitos de FRP como uma segunda alternativa com o intuito de ultrapassar essas limitações (MIOTTO; DIAS, 2006).

A combinação de MLC com compósito de FRP forma uma estrutura que reúne as melhores características das madeiras como ótimas taxas de desempenho/custo e resistência/peso – e as inúmeras vantagens na utilização do FRP, como alta resistência e rigidez, além da versatilidade do material (DAGHER, 2006).

Dagher et al. (2010) expõem que o uso de FRP para reforço em estruturas de MLC possibilita a utilização de lamelas de madeira de menor qualidade, diminuição da altura da peça, como também manter a aparência e a natureza histórica da estrutura. De acordo com Miotto (2009), as vigas de MLC reforçadas com fibras e as vigas de MLC convencionais praticamente não possuem diferença de custos, uma vez que a aplicação de FRP possibilita uma menor utilização de madeira e uso de lamelas com qualidade inferiores.

De acordo com Dagher (2006), existem inúmeras razões do ponto de vista de engenharia, econômico e ambiental que sustentam a combinação de FRP e madeira, sendo elas:

- Aumento da resistência e rigidez;
- Aumento da ductilidade da peça, promovendo um mecanismo de ruptura mais seguro;
- Melhoria das características de fluência;
- Redução da variabilidade das propriedades mecânicas da peça, permitindo utilização de valores maiores no desenvolvimento do projeto;
- Redução do efeito volume em vigas de MLC;
- Utilização de madeira com qualidade inferior;
- Melhoria do desempenho estrutural e redução da peça e conseqüentemente redução do peso;
- Melhoria nas propriedades de conexões da madeira;
- Melhoria na execução da manutenção;
- Redução de custos;

- Redução da pressão sobre a oferta de madeira: uma vez que o reforço utilizando FRP reduz substancialmente o tamanho da peça e permite a utilização de madeira com qualidade inferior.

Segundo o mesmo autor, o sucesso do reforço em madeira utilizando compósitos de FRP pode ser relacionado com:

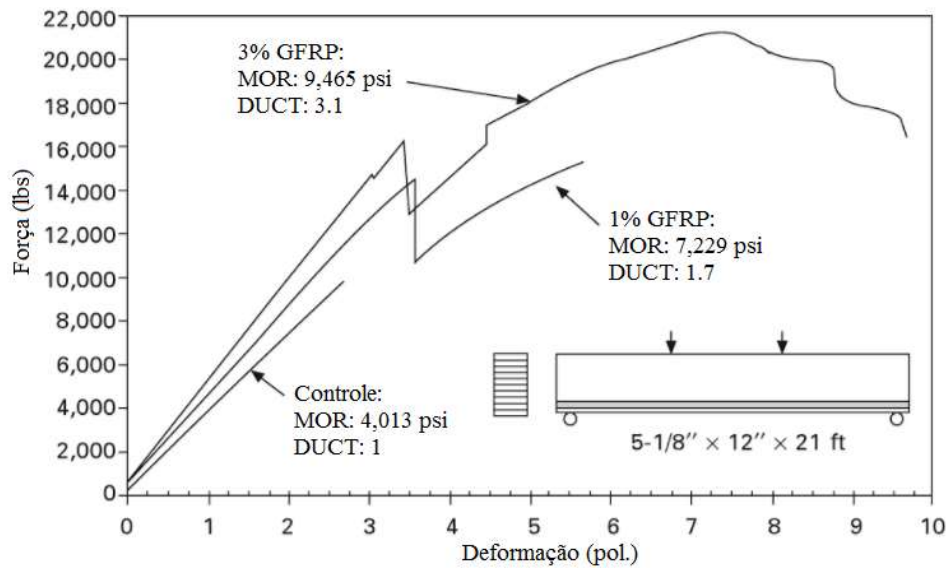
- A versatilidade das características físicas, mecânicas e químicas dos FRP. Além disso, os compósitos de FRP podem ser desenvolvidos para se ajustar e complementar as propriedades ortotrópicas da madeira, minimizando os possíveis problemas de compatibilidade entre os materiais;
- Compósitos de FRP podem ser incorporados ao processo produtivo de peças de MLC.

Segundo Miotto e Dias (2006), estudos realizados na Universidade de Maine (EUA) revelaram que as fibras de vidro, quando dispostas como reforço à razão de 2% a 3% na região tracionada de vigas de MLC, podem aumentar a resistência da peça em até 100% e a rigidez de 10% a 15%, dependendo da densidade da madeira. Fiorelli (2005) afirma que a porcentagem máxima de fibras de vidro, a ser utilizada como reforço de flexão em vigas de MLC, é de 3,3% da altura da peça, tendo em vista que a partir desse valor o reforço não proporciona ganhos significativos.

De acordo com Dagher (2000, apud MIOTTO, 2009), a incorporação de fibras nas peças de MLC provoca uma mudança quanto ao tipo de ruptura da peça. O reforço quando aplicado apropriadamente no lado tracionado da peça promove a alteração de um comportamento frágil para um comportamento dúctil.

Dagher (2006) retrata os resultados de testes realizados na Universidade de Maine, que consistiram na comparação da força e deformação de três vigas de MLC. As vigas foram reforçadas com fibras de vidro a uma taxa de 0%, 1% e 3% e os resultados foram compilados na Figura 2.19.

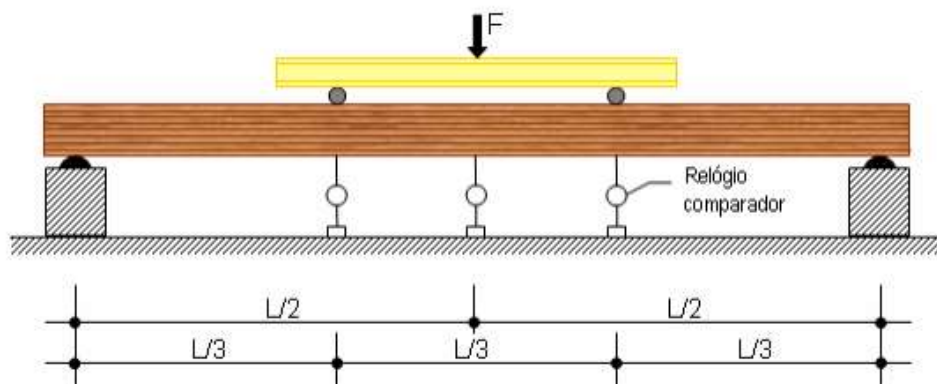
Figura 2.19– Comparação entre força e deformação de vigas de MLC



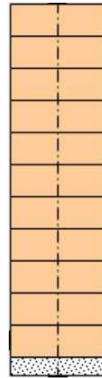
Fonte: Adaptado de Dagher (2006)

Miotto (2009) realizou um estudo sobre a utilização de fibras de vidro para reforço de vigas convencionais de MLC em ensaios de flexão, cujo arranjo encontra-se ilustrado na Figura 2.20. A madeira escolhida para estudo foi o *Lyptus*, que é um híbrido entre o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Foram ensaiadas 10 vigas com 5,4 metros de comprimento sendo 5,2 metros úteis, com largura em torno de 8,2 cm e altura média de 31,4 cm. Foram aplicadas 20 camadas de fibras de vidro na parte inferior da viga correspondente a aproximadamente 3,1% da área da seção transversal, conforme Figura 2.21. Os dados obtidos por esse estudo estão dispostos nas Tabelas 2.4 e 2.5.

Figura 2.20– Ensaio de flexão



Fonte: Miotto (2009)

Figura 2.21– Seção transversal da viga de MLC reforçada

Fonte: Adaptado de Miotto (2009)

Tabela 2.4– Força e modo de ruptura em vigas de MLC sem reforço

| Viga | FR (kN) | MOR (MPa) | Modo de ruptura |
|---------------|--------------------|----------------------|--|
| V7 | 101,7 | 67,6 | Ruptura na emenda dentada da lâmina inferior |
| V8 | 84,3 | 57,1 | Ruptura na penúltima lâmina inferior-nó |
| Média: | 93,0 | 62,3 | |

Fonte: Miotto (2009)

Tabela 2.5– Força e modo de ruptura em vigas de MLC com reforço

| Viga | FR (kN) | MOR (MPa) | Modo de ruptura |
|---------------|--------------------|----------------------|---|
| V3 | 112,5 | 66,0 | Ruptura por cisalhamento da 7ª lâmina |
| V5 | 121,3 | 67,1 | Ruptura em emenda dentada da última lâmina tracionada |
| Média: | 116,9 | 66,6 | |

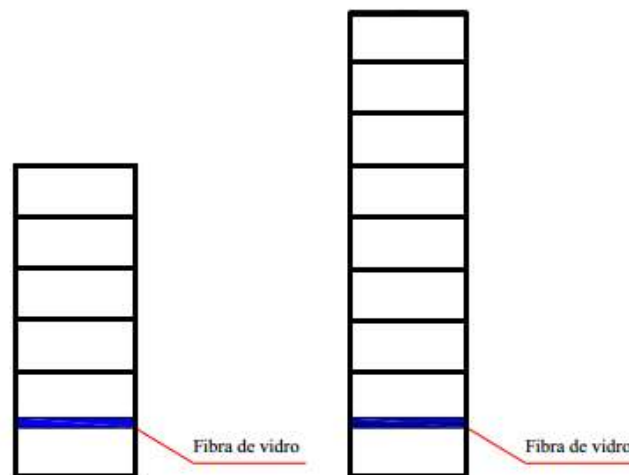
Fonte: Miotto (2009)

Os resultados obtidos por Miotto (2009) apontam que a dispersão dos dados diminuiu nas vigas com a aplicação de reforço de fibras de vidro, ou seja, a diferença de 20% na força de ruptura observada nas vigas convencionais de MLC passou para aproximadamente 8% nas vigas com reforço. Também fica evidenciado o aumento médio de aproximadamente 25% da força de ruptura.

Fiorelli (2005) realizou avaliação do desempenho de vigas de MLC reforçadas com fibras de vidro, também por meio do ensaio de flexão. Foram investigadas 12 vigas de MLC, utilizando madeira da espécie *Pinus caribea var. hondurensis*. As vigas foram divididas de acordo com suas dimensões de 6x20x400 cm e 6x30x400 cm e a porcentagem de fibra de fibras sendo: 0% ou sem reforço, 1,2% da altura da viga e 3,3% da altura da viga. A razão entre o comprimento da viga e a altura da mesma ficou a uma taxa de 5 e 7,5. As fibras de vidro foram posicionadas entre a penúltima e a última camada de madeira, conforme ilustra a Figura 2.22.

Os resultados obtidos por Fiorelli (2005) foram dispostos na Tabela 2.6. O modo de ruptura das vigas sem reforço aconteceu na última camada quando atingido o momento fletor máximo, e a propagação da ruptura ocorreu basicamente por cisalhamento. Para as vigas com reforço, em um primeiro momento ocorreu a ruptura da lamela situada logo após a camada de fibras. No entanto, a viga mostrou ainda capacidade de receber força atingindo uma segunda ruptura, representando o momento fletor máximo. A propagação da ruptura nas vigas reforçadas aconteceu pela combinação de compressão, tração e cisalhamento.

Figura 2.22– Seção transversal da viga de MLC reforçada



Fonte: Adaptado de Fiorelli (2005)

Tabela 2.6– Valores de rigidez e momento fletor resistente

| Viga | Porcentagem de reforço | Seção transversal | | EI (kN.cm ²) | Momento fletor (kN.cm) | | Flecha (cm) |
|------|------------------------|-------------------|------|--------------------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | | | M ₁ | M ₂ | |
| 1 | - | 6,9 | 20,0 | 6488396,0 | 2489 | - | 8 |
| 2 | - | 6,9 | 20,5 | 6914197,0 | 2273 | - | 8 |
| 3 | 1,2% FV | 6,9 | 20,5 | 6644274,0 | 2381 | 2814 | 11 |
| 4 | 1,2% FV | 6,9 | 20,2 | 6766187,0 | 2056 | 2887 | 13 |
| 5 | 3,3% FV | 7 | 20,5 | 7022504,0 | 2561 | 3283 | 16 |
| 6 | 3,3% FV | 7 | 24,0 | 9980947,0 | 3210 | 3694 | 12 |
| 7 | - | 7,7 | 28,9 | 16826463,0 | 3824 | - | 6 |
| 8 | - | 7,5 | 28,7 | 17179260,0 | 4220 | - | 5 |
| 9 | 1,2% FV | 7,6 | 30,4 | 22050998,0 | 6200 | 7835 | 12 |
| 10 | 1,2% FV | 7 | 30,2 | 19278948,0 | 6143 | 6875 | 9 |
| 11 | 3,3% FV | 6,9 | 30,8 | 24255268,0 | 8173 | 8906 | 12 |
| 12 | 3,3% FV | 7 | 30,6 | 21978306,0 | 7948 | 8568 | 10 |

Fonte: Adaptado de Fiorelli (2005)

De acordo com a Tabela 2.6, pode-se observar o aumento do momento fletor máximo de acordo com o incremento da porcentagem de reforço, bem como as dimensões das vigas. Constata-se que as vigas de dimensão 6x20x400 cm apresentaram um aumento do momento fletor máximo médio de aproximadamente 20% e 47% para incrementos de 1,2% e 3,3% de fibra de vidro, respectivamente. Enquanto que as vigas com dimensão 6x30x400 cm apresentaram um aumento do momento fletor máximo médio de aproximadamente 83% e 117%, para incrementos de 1,2% e 3,3% de fibra de vidro, respectivamente.

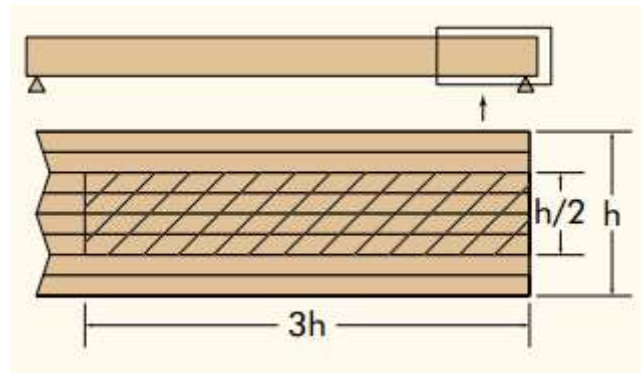
2.3 Cisalhamento em vigas de MLC

Segundo Rammer e Soltis (1994), o dimensionamento de vigas de madeira é realizado considerando-se critérios como: cisalhamento, flexão, compressão normal às fibras, estabilidade lateral e deflexão. Frequentemente o cisalhamento é considerado como um fator determinante no projeto de vigas até certa razão entre comprimento e altura da viga. De acordo com Yeh et al. (1999), no dimensionamento de algumas estruturas, tais como: vigas em estruturas de pisos altamente carregados, longarinas de pontes, vigas em balanço e vigas

contínuas, as tensões de cisalhamento podem se apresentar como fator determinante no dimensionamento da estrutura.

De acordo com APA (2007), as zonas críticas de cisalhamento nas vigas de MLC estão tipicamente posicionadas nas extremidades da viga e próximas à linha neutra, numa região de comprimento igual a três vezes a altura da viga e de largura igual à metade da altura da viga, como mostra a Figura 2.23. De acordo com Lahr (1983), os efeitos de cisalhamento se tornam desprezíveis para cálculos de deslocamentos para relação vão/altura (l/h) maior que 21.

Figura 2.23– Região de máximas tensões de cisalhamento em vigas de MLC



Fonte: APA(2007)

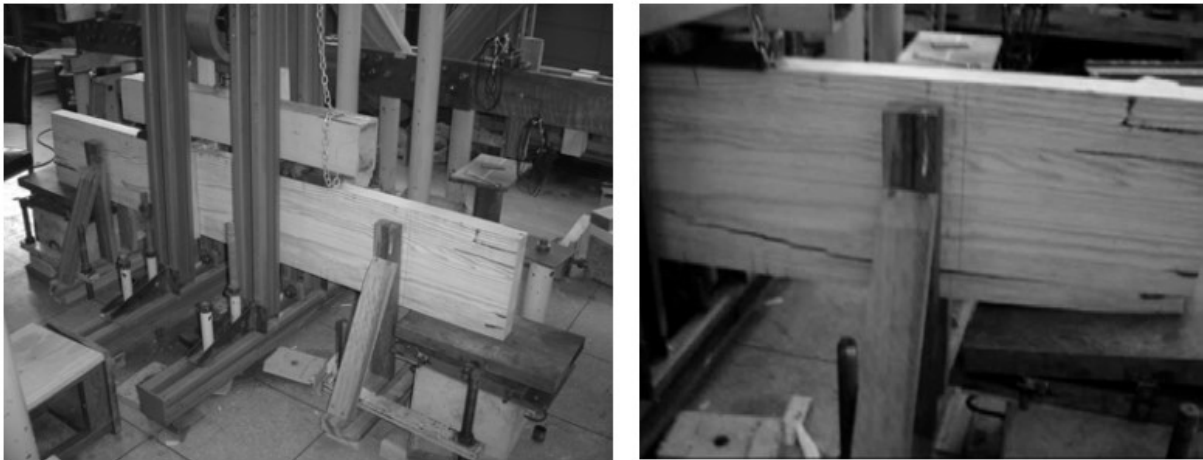
Azambuja (2006) avaliou o comportamento de 14 vigas de MLC submetidas a ensaio de flexão de três pontos. Foram produzidas sete vigas da espécie *Pinus caribea var. hondurensis* e sete vigas produzidas com madeira da espécie *Eucalyptus Grandis*. Para cada espécie de madeira foram utilizados três tipos de adesivos, sendo eles: poliuretano à base de óleo de mamona, Cascophen e Purbond. As dimensões das vigas foram em média 5,8 cm de largura, 30,0 cm de altura e com vãos variando de 185 cm a 190 cm, resultando em uma relação vão/altura de aproximadamente 6. Os modos de ruptura estão dispostos na Tabela 2.7. Pode-se observar a frequência da ruptura por cisalhamento principalmente nas vigas de Pinus, conforme Figura 2.24.

Tabela 2.7– Formas de ruptura de vigas de MLC

| Viga | Espécie | Adesivo | Formas de ruptura |
|-------------|----------------|----------------|---|
| 1 | Pinus | Mamona | ruptura predominante na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas |
| 2 | Pinus | Mamona | ruptura predominante na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas |
| 3 | Pinus | Mamona | ruptura na linha de cola |
| 4 | Pinus | Cascophen | ruptura predominante na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas |
| 5 | Pinus | Cascophen | ruptura predominante na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas |
| 6 | Pinus | Cascophen | ruptura predominante na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas |
| 7 | Pinus | Purbond | ruptura por tração na borda inferior, propagando por cisalhamento |
| 8 | Eucalipto | Mamona | esmagamento na região do apoio |
| 9 | Eucalipto | Mamona | esmagamento na região do apoio |
| 10 | Eucalipto | Mamona | ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes |
| 11 | Eucalipto | Cascophen | esmagamento na região do apoio |
| 12 | Eucalipto | Cascophen | esmagamento na região do apoio |
| 13 | Eucalipto | Cascophen | ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes |
| 14 | Eucalipto | Purbond | ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes |

Fonte: Adaptado de Azambuja (2006)

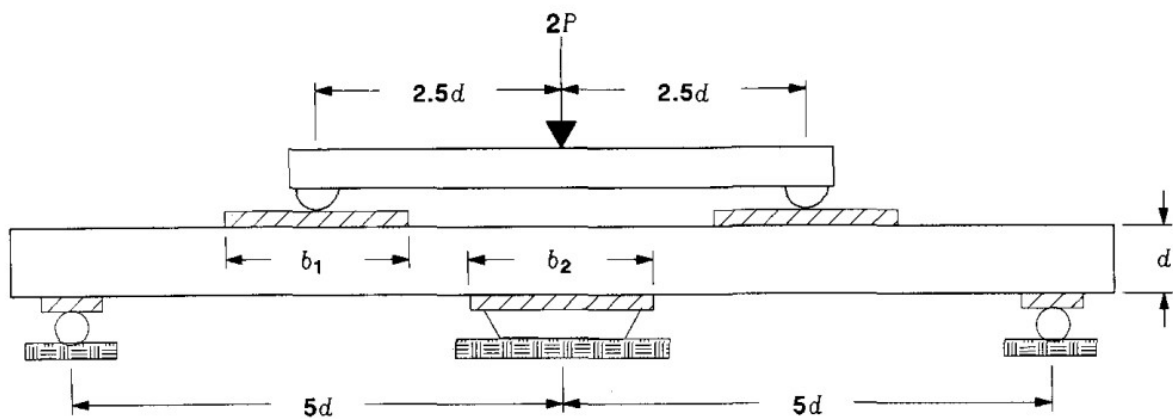
Figura 2.24– Ruptura predominante por cisalhamento



Fonte: Azambuja (2006)

Rammer e Soltis(1994) realizaram estudos para determinação da resistência ao cisalhamento de vigas de MLC, produzidas a partir das espécies *Southern Pine* e *Douglas-fir*. Para promover altas falhas por cisalhamento foi utilizado o teste de flexão de cinco pontos, conforme Figura 2.25. No total foram 330 vigas ensaiadas, divididas de acordo com a espécie de madeira, qualidade das lamelas (alta qualidade e baixa qualidade) e dimensão da seção, totalizando em 11 configurações diferentes. A relação comprimento e altura das vigas ficou em uma taxa de aproximadamente 10. Além disso, foi realizado o ensaio em corpos de prova de cisalhamento isentos de defeitos, para comparação com os resultados de cisalhamentos obtidos da experimentação de vigas de MLC.

Figura 2.25– Ensaio de flexão de cinco pontos



Fonte: Rammer e Soltis (1994)

Os dados obtidos pelos autores foram agrupados e dispostos na Tabela 2.8, em que a sigla BQ representa a presença de lamelas de baixa qualidade, enquanto que a sigla AQ representa a presença de lamelas de alta qualidade.

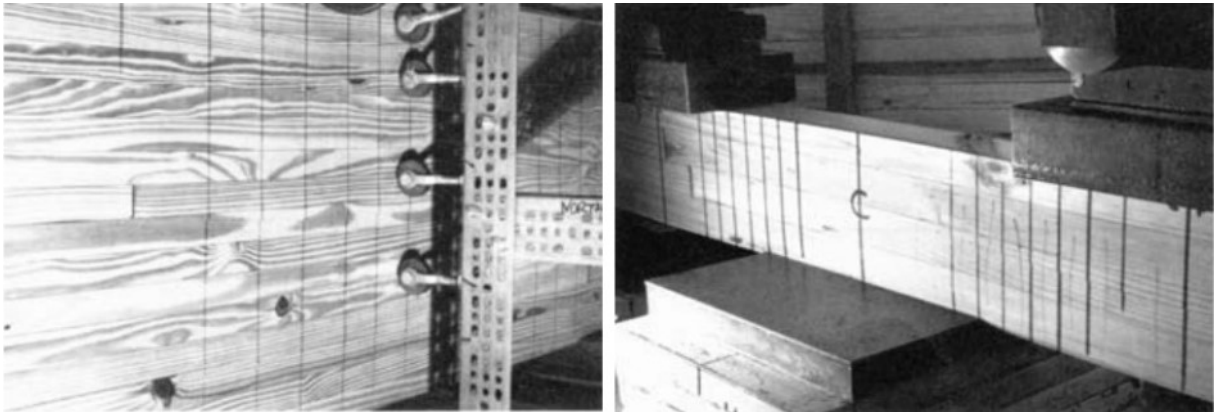
Tabela 2.8– Resultados de resistência ao cisalhamento de vigas e corpos de prova

| Espécie | Secção | | Ruptura por cisalhamento/Total de vigas ensaiadas | Resistência de Cisalhamento das vigas (MPa) | Resistência de cisalhamento dos corpos de prova (MPa) |
|------------------|-----------|-------------|---|---|---|
| | Base (mm) | Altura (mm) | | | |
| Southern Pine | 34,80 | 104,90 | 12/22 | 13,65 | 9,52 |
| Southern Pine BQ | 60,45 | 143,26 | 22/39 | 11,31 | 9,38 |
| Southern Pine AQ | 59,94 | 136,91 | 28/37 | 11,17 | 9,58 |
| Southern Pine | 76,20 | 304,80 | 20/20 | 9,24 | 9,79 |
| Southern Pine | 127,00 | 558,80 | 20/20 | 6,69 | 9,24 |
| Douglas-fir BQ | 35,05 | 128,27 | 26/31 | 9,86 | 7,72 |
| Douglas-fir AQ | 35,05 | 132,08 | 28/32 | 9,86 | 8,48 |
| Douglas-fir BQ | 62,48 | 165,10 | 14/19 | 8,62 | 8,48 |
| Douglas-fir AQ | 62,48 | 156,72 | 32/37 | 8,83 | 9,03 |
| Douglas-fir | 77,98 | 302,51 | 20/20 | 6,90 | 7,65 |
| Douglas-fir BQ | 109,98 | 294,89 | 15/16 | 6,55 | 10,96 |
| Douglas-fir AQ | 110,24 | 299,47 | 16/17 | 6,48 | 10,62 |
| Douglas-fir | 128,52 | 605,79 | 20/20 | 5,31 | 6,62 |

Fonte: Adaptado de Rammer e Soltis (1994)

A resistência de cisalhamento, de uma maneira geral, diminuiu com o aumento da seção. Os resultados de resistência ao cisalhamento nas vigas, na maioria dos casos, foram maiores que os encontrados nos corpos de prova. Pode-se observar também o alto índice de modo de ruptura por cisalhamento, chegando a uma taxa de aproximadamente 73,9% para vigas da espécie *Souther Pine* e 89% para vigas da espécie *Douglas-fir*, conforme Figura 2.26.

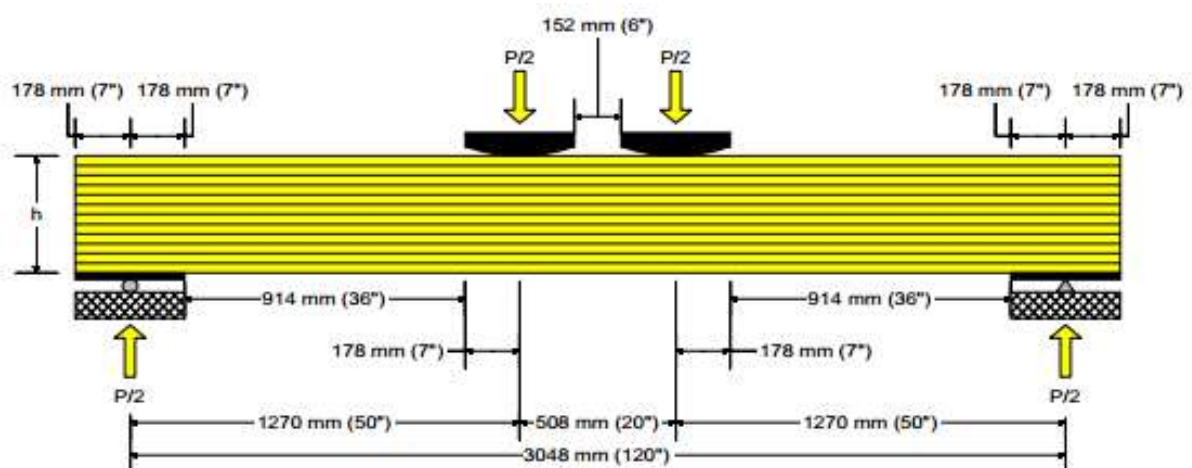
Figura 2.26– Ruptura por cisalhamento em vigas de MLC



Fonte: Rammer e Soltis (1994)

Yeh et al. (1999) realizaram ensaios de flexão para determinação da resistência ao cisalhamento de vigas de MLC, em escala real, conforme mostra Figura 2.27. Foram experimentadas 201 vigas de MLC das espécies *Douglas Fir*, *Southern Pine* e *Spruce-Pine-Fir*, com dimensões de 457 mm de altura e 3048 mm de vão. As larguras das peças foram de 79 mm, 105 mm e 171 mm. A relação de comprimento e altura da peça ficou a uma taxa de aproximadamente 6,7.

Figura 2.27– Esquema de ensaio de flexão

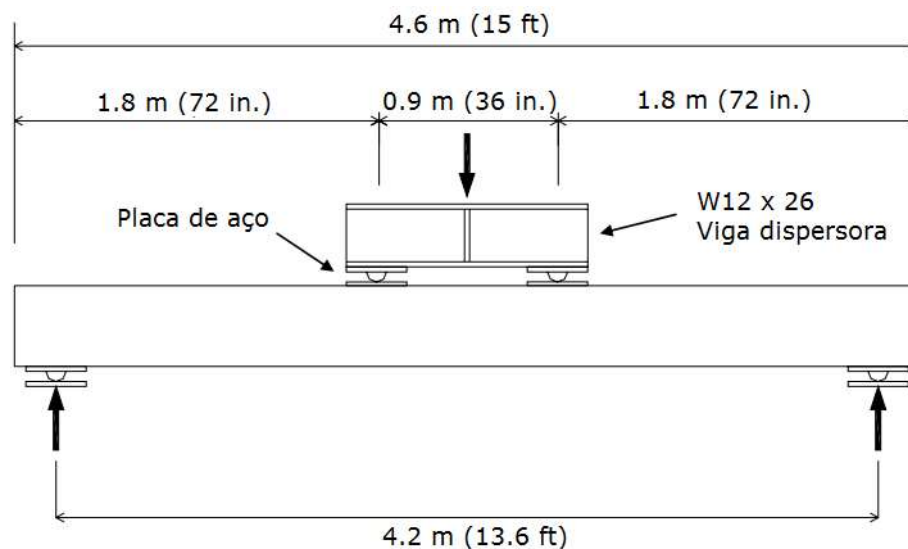


Fonte: Yeh et al.(1999)

De acordo com os autores, ocorreu predominantemente ruptura por cisalhamento, em uma taxa de 70% das vigas de MLC ensaiadas. Foi observado que a ruptura teve início nas extremidades das peças localizadas próximas à linha neutra ou localizadas na metade inferior da peça.

Lamanna et al. (2007) realizaram estudos em longarinas de madeira proveniente de uma estrada ferroviária na cidade de San Marcos, no Estado do Texas, nos Estados Unidos da América, tendo como objetivo avaliar a eficiência de reforços em vigas de madeira que mostravam sinais de fendas horizontais provocadas por tensões de cisalhamento. O ensaio de flexão foi dividido em três etapas: avaliação da resistência de longarinas testemunhas, avaliação da capacidade de carga das longarinas originais com a presença de fendas e posteriormente avaliação da resistência das longarinas originais com presença de fendas reforçadas, conforme esquema ilustrado na Figura 2.28. Foram ensaiadas 60 longarinas de madeira com 420 cm de comprimento com 19,10 cm de largura e uma altura de 40,6 cm, resultando em uma viga com razão comprimento por altura a uma taxa de aproximadamente 10.


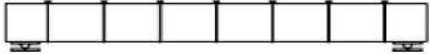
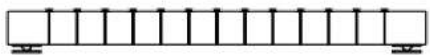



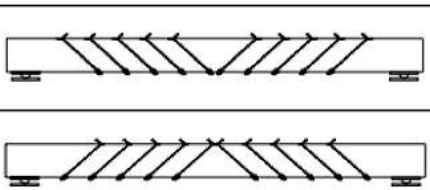
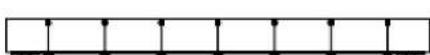
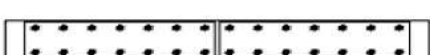

Figura 2.28– Ensaio de flexão em longarinas de madeira



Fonte: Adaptado de Lamanna et al. (2007)

De acordo com os autores, as longarinas convencionais apresentaram modo de ruptura predominante por cisalhamento horizontal. Em seguida as vigas foram reforçadas com diversas configurações de reforço, conforme Figura 2.29.

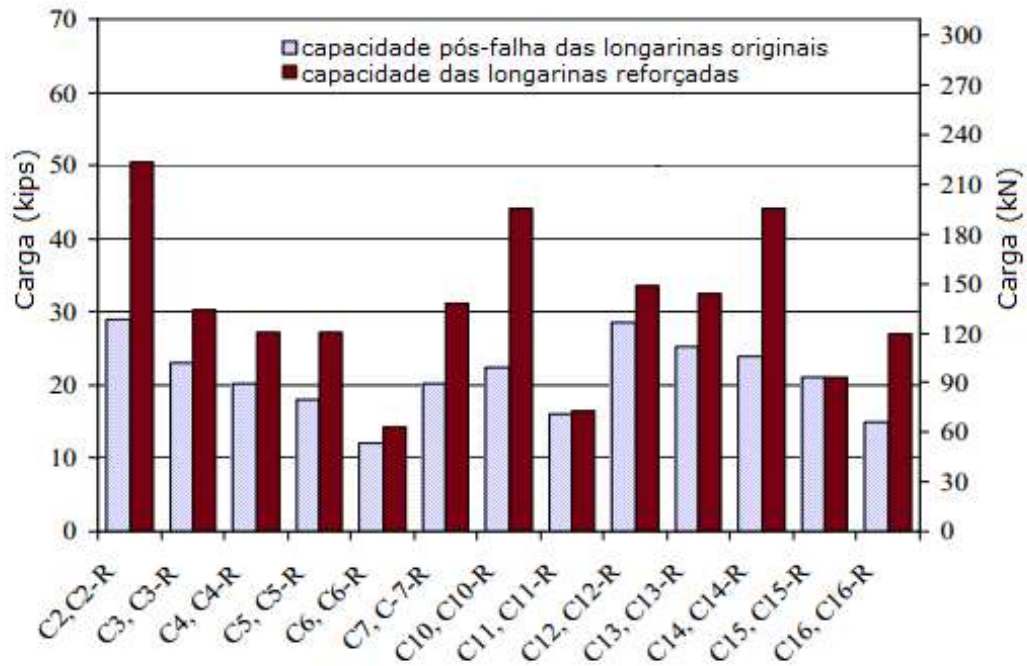
Figura 2.29– Métodos de reforços das longarinas

| Longarinas de Madeira | Métodos de reforços | Representação do método de reforço |
|-----------------------|---|--|
| C1 | Longarina de controle, sem reforço |  |
| C2-R C3-R | Parafusos sextavados com 406 mm de comprimento, aplicados com resina epóxy e dispostos a cada 610 mm |  |
| C4-R | Parafusos sextavados com 406 mm de comprimento, aplicados com resina epóxy e dispostos a cada 310 mm |  |
| C5-R | Parafusos sextavados com 508 mm de comprimento, aplicados com placas de metal e dispostos a cada 305 mm |  |
| C6-R | Parafusos longos com 406 mm de comprimento, dispostos a cada 305 mm |  |
| C11-R C15-R | Parafusos longos com 406 mm de comprimento, dispostos a cada 610 mm |  |
| C7-R C10-R | Parafusos longos aplicados à 45°, dispostos a cada 305 mm |  |
| C12-R | Parafusos longos com 406 mm de comprimento e faixa de GRFP localizada na parte inferior da peça |  |
| C13-R | Placas laterais de madeira compensada fixadas mecanicamente |  |
| C14-R C16-R | Placas laterais de GFRP fixadas mecanicamente |  |

Fonte: Adaptado Lamanna et al. (2007)

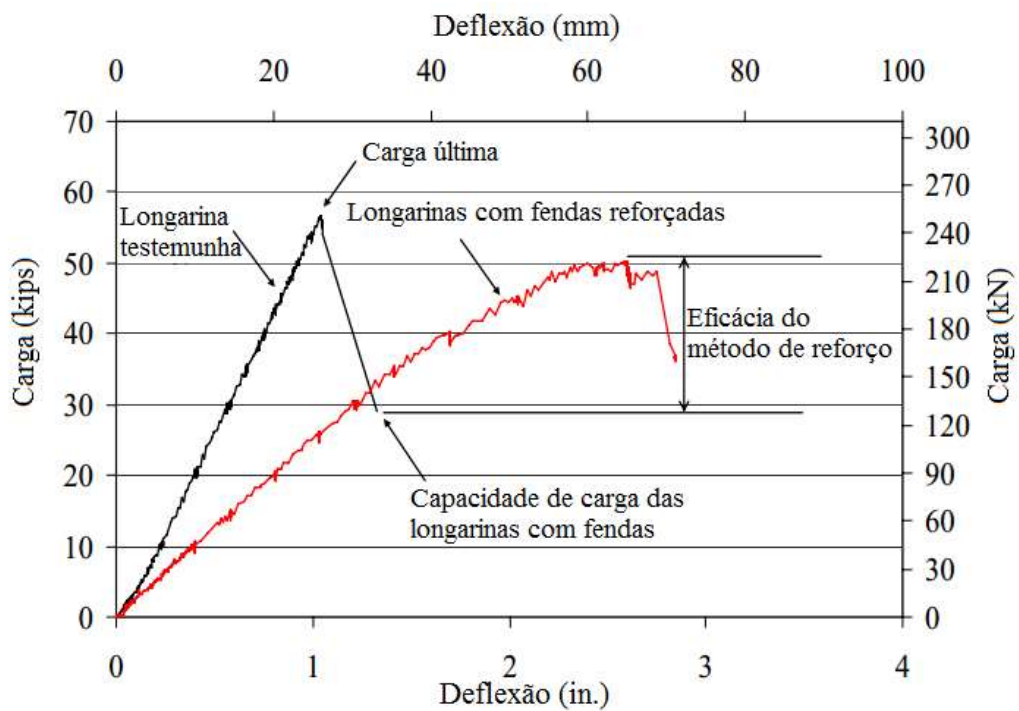
Segundo os autores, o modo predominante de ruptura foi alterado de anteriormente cisalhamento horizontal para tensão de flexão. Os dados obtidos no ensaio de flexão das longarinas sem reforço e com reforço foram compilados em dois gráficos, conforme mostram as Figuras 2.30 e 2.31.

Figura 2.30– Comparativo entre longarinas pós-falha e longarinas reforçadas



Fonte: Adaptado Lamanna et al. (2007)

Figura 2.31– Comparativo entre longarina testemunha e longarinas reforçadas



Fonte: Adaptado Lamanna et al. (2007)

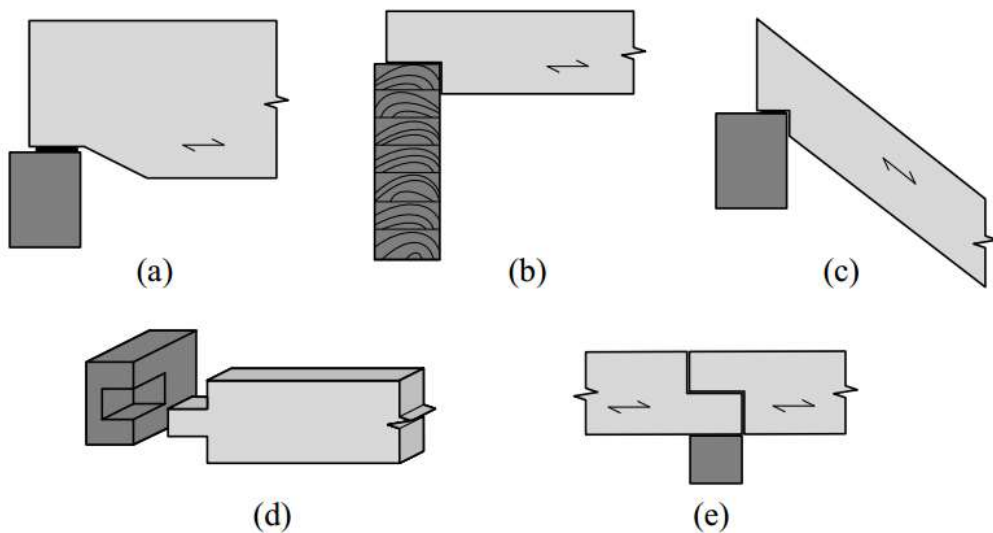
De acordo com Lamana et al. (2007), a série de vigas C14 e C14-R reforçadas com placas de FRP mostrou um aumento da resistência de aproximadamente 90%. Segundo os autores, longarinas com severas fendas devem ser reforçadas utilizando placas de GFRP.

2.3.1 Entalhes em vigas de MLC

De acordo com Jockwer (2014), a presença de entalhes provoca diminuição considerável da capacidade resistente da viga, pois a mudança brusca de seção transversal promove o acúmulo de tensões no canto do entalhe. No entanto, sua presença se faz necessária em várias situações, como mostram as Figuras 2.32, 2.33 e 2.34 respectivamente. Os fatores que resultam na presença dos entalhes são:

- Limitação da altura na construção;
- Estabilização do elemento estrutural na extremidade;
- Suporte para elementos inclinados;
- Encaixe entre elementos;
- Intersecções de elementos estruturais.

Figura 2.32– Entalhes em diferentes situações



Fonte: Adaptado de Jockwer (2014)

Figura 2.33– Entalhe na região do apoio



Fonte: Adaptado de Archdaily (2018)

Figura 2.34– Entalhes na intersecção



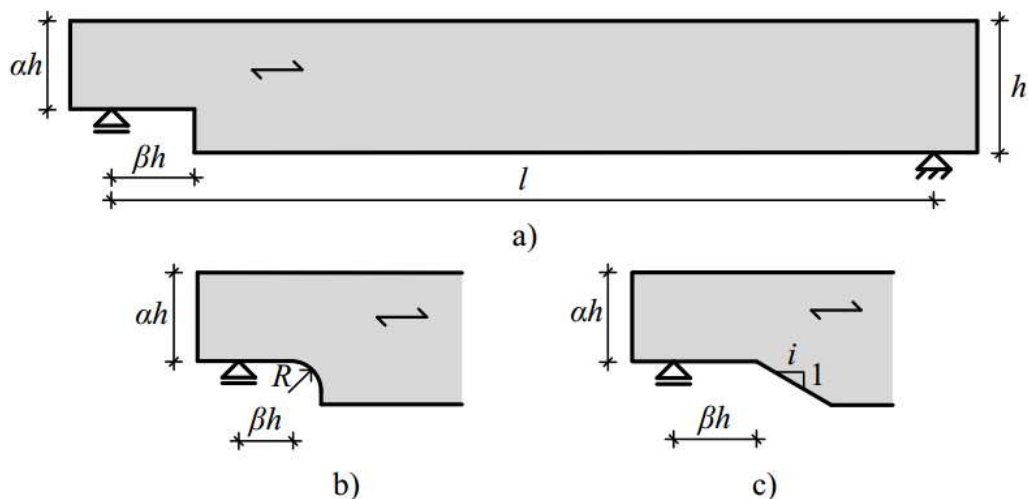
Fonte: Adaptado de BauNetz (2018)

Segundo Jockwer (2014), a posição do entalhe e o tipo de carregamento acarretam em diferentes efeitos na região do entalhe. O resultado das tensões existentes na quina do mesmo podem ser tensões de tração ou compressão, dependendo do entalhe estar localizado na região tracionada ou comprimida da peça, bem como se as forças de cisalhamento provocam compressão ou tração normal às fibras das lamelas.

Jockwer (2014) ressalta que a capacidade de carga de vigas de MLC com presença de entalhes está relacionada com alguns parâmetros, tais como:

- Geometria do entalhe, conforme Figura 2.35;
- Variação do teor de umidade;
- Localização do entalhe.

Figura 2.35– Geometria dos entalhes



Fonte: Jockwer (2014)

Em que:

- ah é altura efetiva da peça;
- βh é largura do entalhe;
- R é o raio;
- i é a inclinação do entalhe;
- l é o vão da viga.

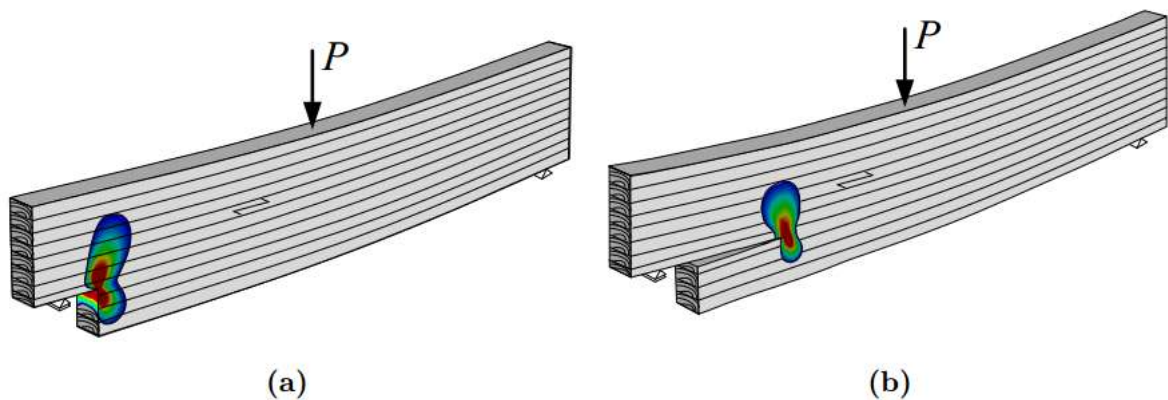
Segundo Jockwer (2014), a inclinação e o raio fazem com que ocorra uma transição suave entre a seção inteira da peça para a seção reduzida, diminuindo também a concentração

de tensões no canto do entalhe. Rosa (2002) afirma que os pontos de acúmulos de tensões devem ser suavizados por meio do aumento do raio de concordância, bem como desviar o fluxo de tensões do ponto crítico.

As variações no teor de umidade da madeira causam tensões internas devido ao inchamento e retração da peça. As concentrações de tensões normais às fibras e tensões de cisalhamento, juntamente com a exposição à intempérie das fibras do canto do entalhe, favorecem o aparecimento de falhas induzidas pela variação do teor de umidade (JOCKWER, 2014).

Smith et al. (1996) afirmam que a resistência dos entalhes localizados na parte comprimida da peça se apresentam cerca de 10 vezes mais resistentes quando comparados àqueles localizados na parte tracionada da peça. Segundo Jockwer (2014), a abertura de fissuras se apresenta como principal mecanismo de falha nas peças quando o entalhe se encontra na região tracionada da peça, devido à baixa resistência da madeira à tração normal às fibras, conforme Figura 2.36.

Figura 2.36– Acúmulo de tensões no canto do entalhe

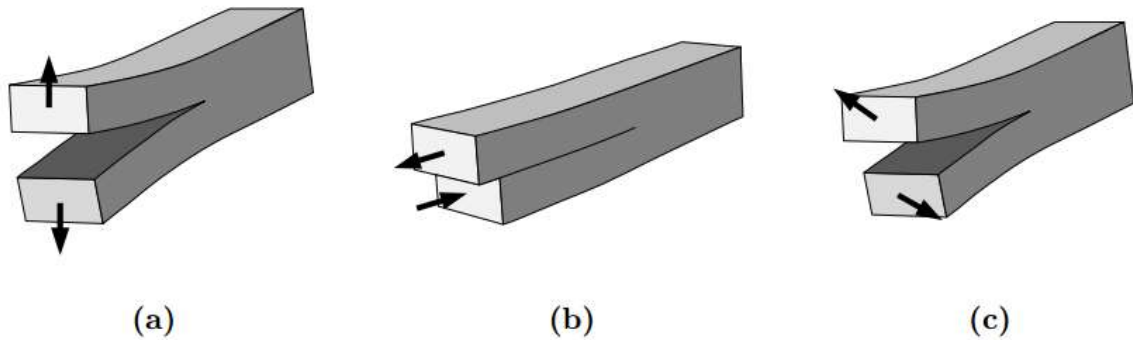


Fonte: Jockwer (2014)

As altas concentrações de tensões normais às fibras da madeira, bem como as tensões de cisalhamento no canto do entalhe, são responsáveis pelo início da abertura de fissuras na região. Essa concentração de tensões se deriva da mudança brusca da seção da peça, promovendo três tipos de ruptura, sendo caracterizados por modo 1, modo 2 e modo misto. O mecanismo de falha denominado modo 1 se caracteriza por falha puramente ocasionada pelas tensões normais às fibras, como mostra Figura 2.37 (a). O mecanismo de falha modo 2 é resultante de tensões de cisalhamento, ilustrado na Figura 2.37 (b). O último modo de ruptura

é denominado modo misto, resultante da combinação entre as tensões normais e as tensões de cisalhamento, conforme Figura 2.37 (c) (JOCKWER, 2014).

Figura 2.37 – Modos de ruptura com início na região dos entalhes



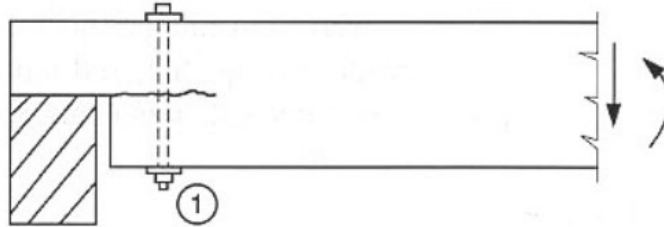
Fonte: Jockwer (2014)

Segundo Aguayere e Vigil (2017), o efeito negativo das concentrações de tensões na capacidade resistente das vigas pode ser reduzido por meio do reforço interno e externo da viga ao longo de sua altura. Os mesmos autores retratam que o reforço interno se caracteriza pela utilização de parafusos verticais e parafusos roscáveis, enquanto que o reforço externo consiste na utilização de compósitos de fibras na forma “U”, ambos próximos ao canto do entalhe. Os reforços, por sua vez, além de melhorar a capacidade de carga da viga também previnem a peça de possíveis falhas frágeis e aberturas de fissuras normalmente iniciadas no canto do entalhe.

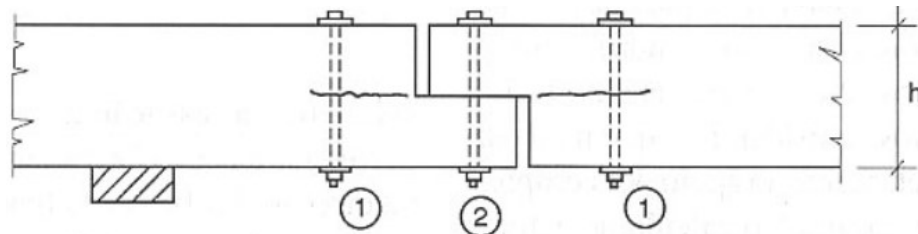
Pfeil e Pfeil (2003) relatam alguns exemplos de aplicação de parafusos como reforço em vigas entalhadas. Os parafusos têm como função absorver o esforço de tração normal às fibras, limitando o fendilhamento da peça, conforme mostra a Figura 2.38. Os autores afirmam também que os parafusos verticais, quando aplicados em vigas altas, necessitam de reaperto posterior, devido à retração da madeira.

Figura 2.38– Reforço em vigas entalhadas para limitar o fendilhamento

- a) Viga com entalhe na região do apoio, reforçada por parafuso para absorção de tração normal às fibras



- b) Viga com rótula intermediária, com fixação da rótula pelo parafuso “2” e possuindo parafuso “1” para absorção dos esforços de tração normal às fibras



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

2.3.1.1 Critérios de entalhes segundo ABNT NBR 7190:1997

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, para as peças com variações bruscas da seção transversal em qualquer posição, conforme ilustradas na Figura 2.39, deve-se multiplicar a tensão de cisalhamento de cálculo (τ_d) na seção mais crítica, de altura h_1 , pelo fator de majoração h/h_1 , resultando na Equação [2.1].

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b \cdot h_1} \times \left(\frac{h}{h_1} \right) \quad [2.1]$$

Em que:

τ_d é a tensão de cisalhamento de cálculo;

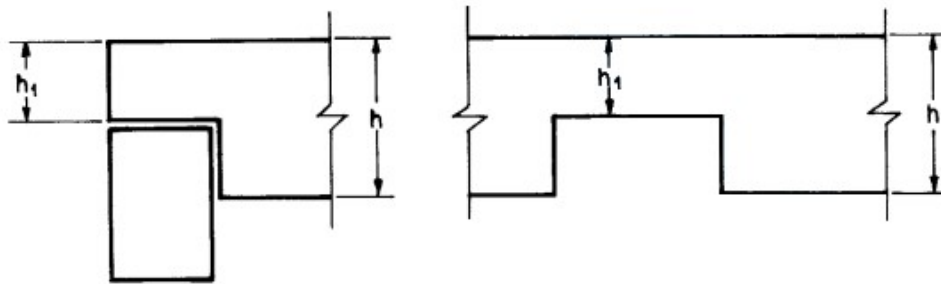
V_d é a força cortante de cálculo;

b é a largura da viga;

h é a altura total da viga;

h_1 é a altura da viga na região do apoio.

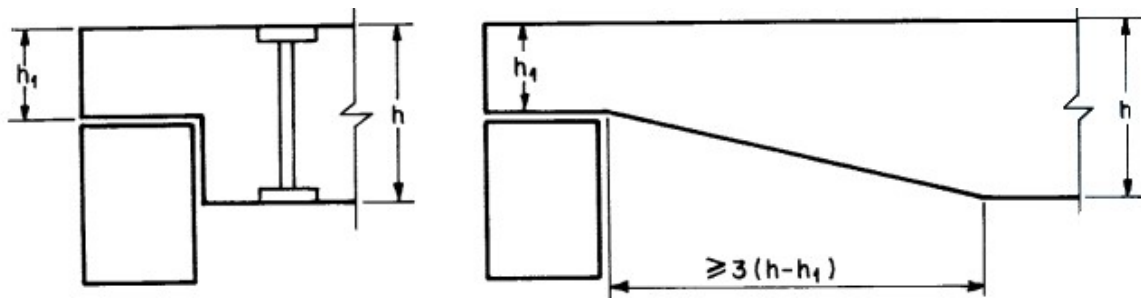
Figura 2.39– Posição dos entalhes em vigas



Fonte: NBR 7190 (1997)

As vigas entalhadas devem respeitar restrições geométricas tais como $h_1 > 0,75.h$. Caso essa restrição não seja atendida, deve-se utilizar parafusos verticais dimensionados à tração axial ou utilizar mísulas com comprimento maior que três vezes à altura do entalhe, no entanto deve ser sempre respeitado o limite absoluto de $h_1/h \geq 0,5$, sendo h a altura da peça, conforme Figura 2.40.

Figura 2.40– Detalhes construtivos de vigas entalhadas



Fonte: NBR 7190 (1997)

2.3.1.2 Critérios de entalhes segundo NDS (2015)

De acordo com a norma norte-americana NDS (2015), os entalhes na região tracionada e comprimida da peça, em uma mesma seção transversal, não são permitidos. Entalhes retos na região tracionada da peça são permitidos nas regiões dos apoios onde a altura do entalhe não deve exceder 1/10 da altura da peça ou 7,62 centímetros.

Os entalhes retos na região comprimida da peça são permitidos na região dos apoios onde a altura do entalhe não deve exceder 2/5 da altura da peça. Para os entalhes na região comprimida com mísulas deve ser respeitada a altura máxima de 2/3 da altura total e largura menor que três vezes a altura da peça.

Alguns critérios para o dimensionamento de vigas entalhadas, baseados nos estudos de Scholten (1935, apud JOCKWER, 2014), retratam que para uma viga de largura (b) e altura (d) a redução da resistência ao cisalhamento devido ao entalhe é proporcional à razão entre a altura da viga na região do entalhe (d_0) e a altura total da seção transversal. Deste modo, o esforço cortante solicitante (V) pode ser obtido pela Equação [2.2].

$$V = \frac{2}{3} \cdot q \cdot b \cdot d_0 \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right) \quad [2.2]$$

Em que:

V é o esforço cortante;

q é a tensão de cisalhamento;

b é a largura da seção transversal;

d_0 é a altura da seção transversal na região do entalhe;

d é a altura total da seção transversal.

De acordo com a norma norte-americana NDS (2015), para peças fletidas com seção retangular de largura (b) e altura (d), possuindo entalhes na região tracionada da seção transversal, o esforço cortante na peça (V'_r) deve ser calculado de acordo com a Equação [2.3].

$$V'_r = \frac{2}{3} \cdot F'_v \cdot b \cdot d_n \cdot \left(\frac{d_n}{d}\right)^2 \quad [2.3]$$

Em que:

V'_r é o esforço cortante na peça;

F'_v é a tensão cisalhante ajustada no entalhe;

b é a largura da seção transversal;

d_n é a altura da seção transversal devido ao entalhe;

d é a altura total da seção.

Nas peças de seção circular, com a presença de entalhes na região tracionada, o esforço cortante na peça (V'_r) deve ser calculado de acordo com a Equação [2.4].

$$V'_r = \frac{2}{3} \cdot F'_v \cdot A_n \cdot \left(\frac{d_n}{d}\right)^2 \quad [2.4]$$

Em que:

A_n é a área da seção transversal da viga.

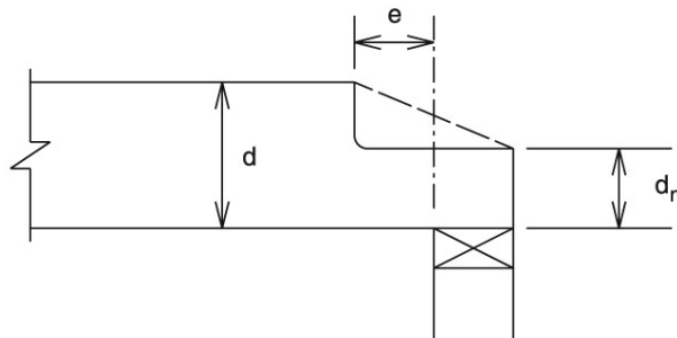
Quando a presença do entalhe estiver na região comprimida da viga, conforme Figura 2.41, o esforço cortante (V'_r) deve ser calculado de acordo com a Equação [2.5].

$$V'_r = \frac{2}{3} \cdot F'_v \cdot b \cdot \left[d - \left(\frac{d - d_n}{d_n}\right) \cdot e \right] \quad [2.5]$$

Em que:

“e” é a distância entre a face do suporte e o canto do entalhe, conforme ilustra a Figura 2.41. Essa distância deve ser menor ou igual à altura da seção transversal devido ao entalhe (d_n).

Figura 2.41– Entalhe na região comprimida da viga



Fonte: NDS (2015)

As vigas com mudança gradual de seção transversal, ilustrada pela linha tracejada da Figura 2.41, em comparação com vigas de entalhes retos, apresentam uma diminuição na tensão de cisalhamento paralela às fibras. O valor dessa tensão se apresenta próximo ao de uma viga sem entalhes com altura d_n .

A norma norte-americana retrata dois métodos de cálculo para a determinação da tensão cisalhante ajustada no entalhe (F'_v), em vigas de madeira laminada colada. O primeiro modelo, denominado “*Allowable stress design*”, e designado pela sigla ASD, leva em

consideração as tensões admissíveis, sendo representado pela Equação [2.6]. O segundo modelo, denominado “*Load and Resistance Factor Design*”, designado pela sigla LRDF e conhecido no Brasil como Método dos Estados Limites, leva em consideração os fatores de carregamento e resistência, representados pela Equação [2.7].

$$F'_v = F_v \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_{vr} \quad [2.6]$$

Em que:

F_v é a resistência ao cisalhamento no entalhe;

C_D é o fator de duração de carregamento, dado conforme a Seção 2.3.2 da NSD (2015);

C_M é o fator de umidade de serviço, dado conforme as Tabelas 5A, 5B, 5C e 5D da NSD (2015);

C_t é o fator de temperatura, dado conforme Apêndice C da NSD (2015);

C_{vr} é o fator de redução de cisalhamento, que apresenta valor de 0,72 conforme Seção 5.3.10 da NSD (2015).

$$F'_v = F_v \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_{vr} \cdot K_F \cdot \phi \quad [2.7]$$

Em que:

K_F é o fator de conversão de forma, que apresenta valor de 2,88 conforme Tabela 5.3.1 da NSD (2015);

Φ é o fator de resistência, apresenta valor de 0,75 conforme Tabela 5.3.1 da NSD (2015).

2.3.1.3 Critérios de entalhe segundo a CSA O86 (2010)

De acordo com a norma canadense CSA O86 (2010), o cálculo da resistência ao cisalhamento (V_r) de vigas de madeira laminada colada com entalhes na região do apoio pode ser realizado por dois métodos. O primeiro método consiste em um modelo simplificado para vigas de volume inferior a 2 m³, descrito pela Equação [2.8].

$$V_r = \phi \cdot F_v \cdot \frac{2 \cdot A_g}{3} \cdot K_N \quad [2.8]$$

Em que:

V_r é a tensão de cisalhamento;

A_g é a área da seção transversal;

ϕ é uma constante igual a 0,9, dado conforme Seção 6.5.7.2.1 da CSA O86 (2010);

K_N é o fator de modificação, dado conforme Seção 6.5.7.2.2 da CSA O86 (2010);

F_v é a resistência ao cisalhamento calculada conforme a Equação [2.9].

$$F_v = f_v \times (K_D \cdot K_H \cdot K_{SV} \cdot K_T) \quad [2.9]$$

Em que:

f_v é a resistência específica ao cisalhamento¹, dado conforme Tabela 6.3 da CSA O86 (2010);

K_D é o coeficiente de duração de carregamento, dado de acordo com a Tabela 4.3.2.2 da CSA O86 (2010);

K_H é o coeficiente de sistema, dado pela Seção 6.4.3 da CSA O86 (2010);

K_{SV} é o coeficiente para as condições de serviço, dado pela Tabela 6.4.2 da CSA O86 (2010);

K_T é o coeficiente de tratamento, dado conforme Seção 6.4.4 da CSA O86 (2010).

O segundo método consiste em um modelo geral para vigas de qualquer volume, conforme mostra Equação [2.10]. De acordo com o *Canadian Wood Council* (2011), este modelo leva em consideração os efeitos de volume e configuração de carregamento para a determinação da capacidade de resistência ao cisalhamento da viga. Para ambos os métodos, a resistência ao cisalhamento deve ser menor ou igual à soma dos carregamentos (W_f) ao qual a viga é submetida.

$$V_r = \phi \cdot F_v \cdot 0,48 \cdot A_g \cdot K_N \cdot C_V \cdot Z^{-0,18} \geq W_f \quad [2.10]$$

¹ Os valores de resistência específica são tabelados pela CSA O86 (2010), sendo que variam de acordo com espécie, tipo de classificação da madeira, condição de duração de aplicação do carregamento e as condições de serviço da estrutura. Valores esses baseados em mais de 50 anos de pesquisas em estrutura de MLC.

Em que:

C_v é o fator de carregamento, dado conforme Seção 6.5.7.3 da CSA O86 (2010);

Z é o volume da viga;

W_f é combinação das cargas atuantes na viga, dado conforme Seção 4.2 da CSA O86 (2010).

O fator de entalhe (K_N) varia de acordo com a sua localização na peça, ou seja, para região tracionada da peça o valor é dado pela Equação [2.11].

$$K_N = \left(1 - \frac{d_n}{d}\right)^2 \quad [2.11]$$

Em que:

K_N é o fator de entalhe;

d é a altura da seção;

d_n é a altura do entalhe.

Para vigas com a presença de entalhe na região comprimida, o valor de K_N é dado pelas Equações [2.12] e [2.13].

$$p/e > d \quad K_N = 1 - \frac{d_n}{d} \quad [2.12]$$

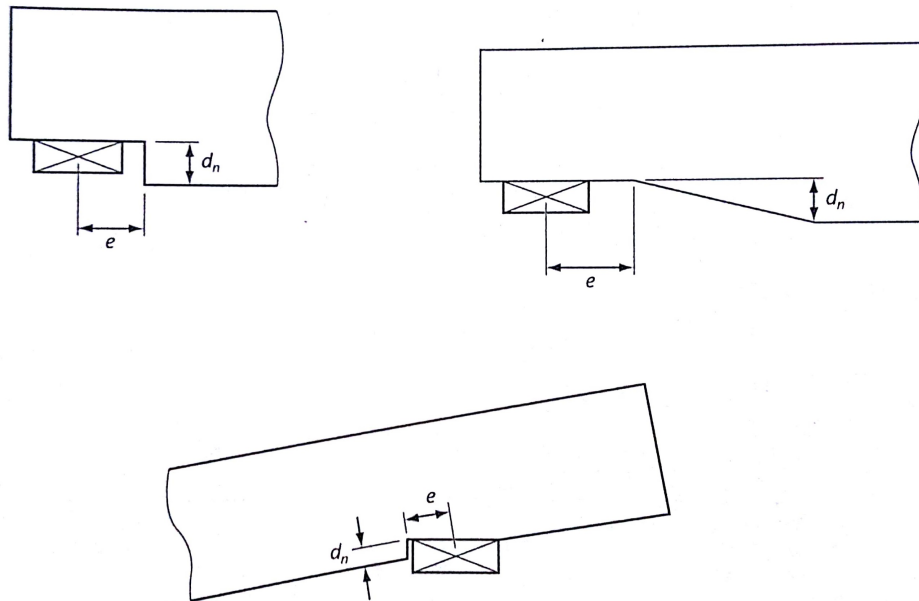
$$p/e < d \quad K_N = 1 - \frac{d_n \cdot e}{d \cdot (d - d_n)} \quad [2.13]$$

Em que:

“ e ” é a distância entre canto do entalhe e o apoio (Figura 2.42).

De acordo com a norma canadense CSA O86 (2010), a altura do entalhe (d_n) deve ser inferior a 0,25 da altura da seção (d). Os parâmetros dos entalhes são ilustrados na Figura 2.42.

Figura 2.42– Parâmetros dos entalhes segundo CSA O86



Fonte: CSA O86 (2010)

2.3.1.4 Critérios de entalhe segundo a DIN 1052 (2004)

A norma alemã DIN 1052 (2004) estabelece um procedimento para o dimensionamento de vigas retangulares entalhadas na região dos apoios. A concentração de tensões na região do entalhe é levada em consideração por meio de um coeficiente de redução (k_v), que integra a Equação de verificação [2.14].

$$1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h_e} \leq k_v \cdot f_{v,d} \quad [2.14]$$

Em que:

V_d é a valor da força cortante atuante na peça;

h_e é a menor altura da seção devido ao entalhe;

b é a largura da seção transversal;

$f_{v,d}$ é a resistência ao cisalhamento de projeto.

O fator de redução (k_v) possui valor igual a 1 para o caso de entalhe na região comprimida da peça. Por outro lado, na presença de entalhe na região tracionada, a norma recomenda para k_v o menor valor entre os valores dados pela Equação [2.15].

$$k_v = \text{mín.} \left\{ \frac{1}{k_{90} \cdot k_\varepsilon} \right\} \quad [2.15]$$

O parâmetro k_ε é calculado de acordo com a Equação [2.16]

$$k_\varepsilon = 1 + \frac{1,1}{\tan \varepsilon + \sqrt{h} \cdot \tan \varepsilon} \quad [2.16]$$

O parâmetro k_{90} é calculado de acordo com a Equação [2.17]

$$k_{90} = \frac{k_n}{\sqrt{h} \times \left(\sqrt{\alpha \cdot (1 - \alpha)} + 0,8 \cdot \frac{c}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \quad [2.17]$$

Em que:

h é a altura total da seção transversal;

c é a distância entre a aplicação da força e o canto do entalhe, valor em mm;

ε ângulo de inclinação do entalhe;

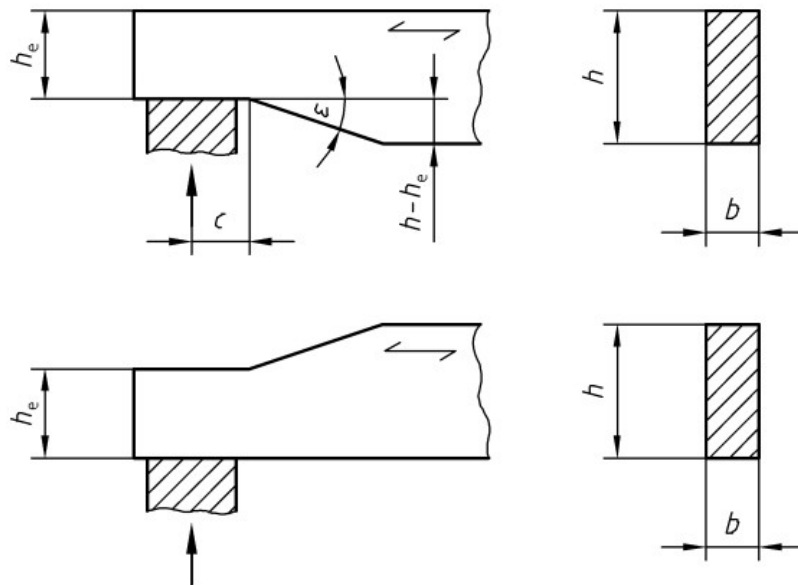
α é razão entre a menor altura da seção devido ao entalhe (h_{ef}) e a altura total da seção (h);

k_n é um coeficiente dado de acordo com o tipo de madeira, podendo assumir os seguintes valores abaixo:

- Para madeira composta (LVL)= 4,5;
- Para madeira maciça= 5,0;
- Para madeira laminada colada= 6,5.

Os parâmetros retratados nas equações acima estão ilustrados na Figura 2.43.

Figura 2.43– Parâmetros dos entalhes segundo a DIN 1052



Fonte: DIN 1052 (2004)

De acordo com esta norma, a Equação de verificação [2.14] é válida quando:

- $\alpha \geq 0,5$;
- $c/h \leq 0,4$.

Quando a Equação de verificação [2.14] não é atendida, a norma recomenda o reforço da viga, que segundo a mesma pode ser realizado por meio de parafusos ou uso de materiais colados externamente. Primeiramente é feito o cálculo da força de tração ($F_{t,90,d}$), conforme Equação [2.18].

$$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d \cdot [3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3] \quad [2.18]$$

Para utilização de parafusos como reforço das vigas entalhadas, a norma alemã apresenta uma Equação de verificação [2.19].

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{K1,d}} \leq 1 \quad [2.19]$$

A tensão de cisalhamento efetiva ($\tau_{ef,d}$) é calculada por meio da Equação [2.20].

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{n \cdot d_r \cdot \pi \cdot l_{ad}} \quad [2.20]$$

Em que:

l_{ad} é o comprimento efetivo de ancoragem;

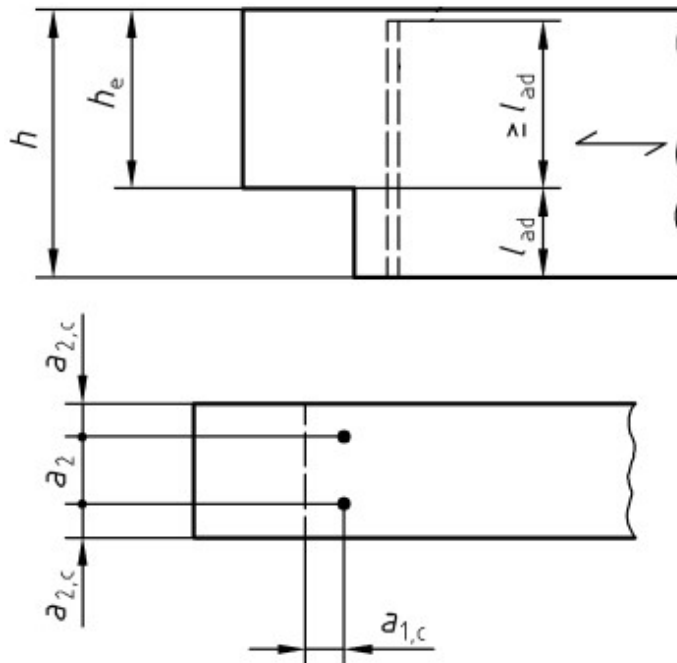
n é o número de parafusos;

d_r é o diâmetro externo dos parafusos;

$f_{k1,d}$ é a classificação da força na linha adesiva, dado conforme Tabela F.23 da DIN 1052 (2004).

O comprimento mínimo de cada parafuso é de duas vezes o comprimento efetivo de ancoragem (l_{ad}) e o diâmetro máximo deve ser menor ou igual a 20 mm. Os parâmetros encontrados nas Equações [2.18] e [2.19] estão ilustrados na Figura 2.44.

Figura 2.44– Reforço por meio de parafusos



Fonte: DIN 1052 (2004)

Os parâmetros $a_{1,c}$, a_2 e $a_{2,c}$, ilustrados na Figura 2.41, são dados de acordo com a Tabela 10 presente na norma DIN 1052 (2004). Para o caso de reforço externo dos entalhes, a norma apresenta uma expressão para a verificação na linha adesiva, conforme Equação [2.21].

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{K2,d}} \leq 1 \quad [2.21]$$

A tensão de cisalhamento efetiva ($\tau_{ef,d}$) é dada pela Equação [2.22].

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 \cdot (h - h_e) \cdot l_r} \quad [2.22]$$

Em que:

l_r é a largura do reforço;

$f_{K2,d}$ é a classificação da força na linha adesiva, dado conforme Tabela F.23 da DIN 1052 (2004).

Após a verificação na linha adesiva, a norma apresenta a Equação [2.23] para a verificação no reforço.

$$k_K \cdot \frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,d}} \leq 1 \quad [2.23]$$

A tensão de tração no reforço ($\sigma_{t,d}$) é calculada pela Equação [2.24].

$$\sigma_{t,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 \cdot t_r \cdot l_r} \quad [2.24]$$

Em que:

t_r é a espessura do reforço;

k_K é o coeficiente de distribuição de tensão, podendo assumir o valor de 2,0 para os casos em que não se têm o valor;

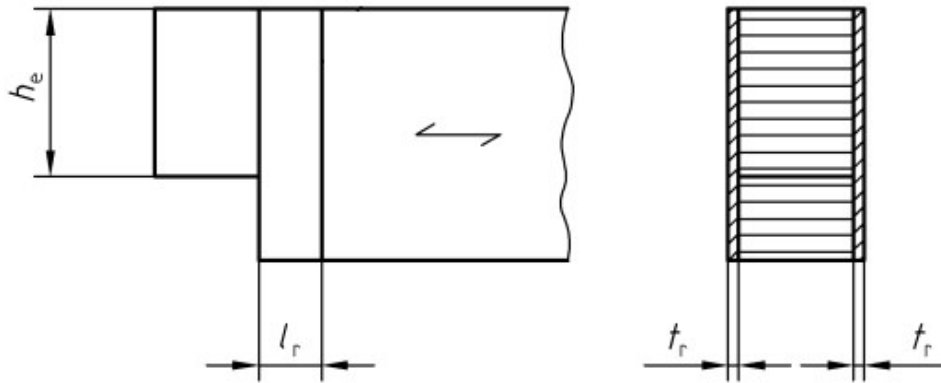
$f_{t,d}$ é a resistência à tração do material de reforço.

Por fim, o reforço deve respeitar a verificação disposta na Equação [2.25].

$$0,25 \leq \frac{l_r}{h - h_e} \leq 0,5 \quad [2.25]$$

Os parâmetros utilizados para o reforço externo são ilustrados por meio da Figura 2.45.

Figura 2.45– Reforço externo em vigas entalhadas



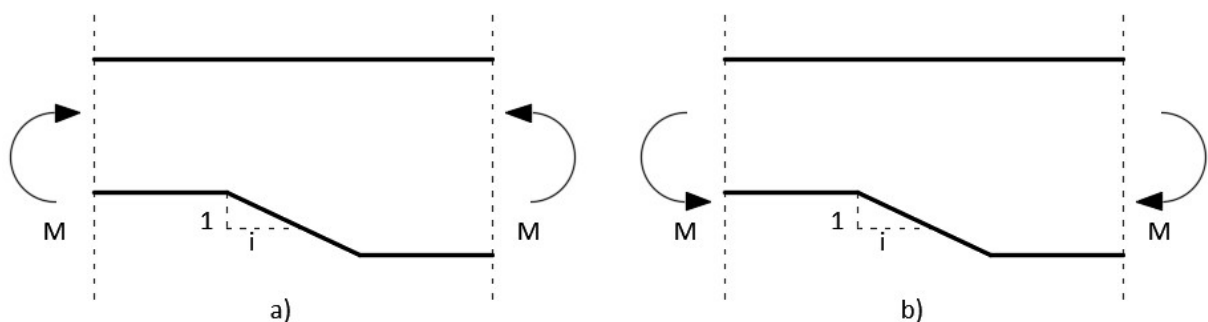
Fonte: DIN 1052 (2004)

2.3.1.5 Critérios de entalhes segundo EN 1995-1-1 (2004)

Segundo a norma europeia, os efeitos da concentração de tensão no entalhe devem ser levados em consideração na determinação da resistência da peça. No entanto, são apresentadas situações nas quais esses efeitos podem ser desprezados, tais como:

- Tração ou compressão paralela às fibras da madeira;
- Flexão com entalhes na região tracionada da peça, em que a inclinação deve ser menor do que 1:i, sendo $i \geq 10$ conforme Figura 2.46 (a);
- Flexão com entalhes na região comprimida da peça, conforme Figura 2.46 (b);

Figura 2.46– Flexão em viga entalhada



Fonte: EN 1995-1-1 (2004)

Em seguida, a norma traz critérios de verificação da peça. A tensão de cisalhamento é calculada com a altura efetiva da viga (h_{ef}) e a resistência de cisalhamento é diminuída por um fator de minoração (k_v). A verificação da peça se dá pela Equação [2.26].

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h_{ef}} \leq k_v \cdot f_{v,d} \quad [2.26]$$

Em que:

V_d é a força cortante atuando na peça;

b é a largura da seção transversal;

h_{ef} é a menor altura da seção devido ao entalhe;

k_v é o fator de redução;

$f_{v,d}$ é a resistência ao cisalhamento de projeto .

O fator de redução (k_v) para entalhes localizados no lado oposto do apoio assume o valor de 1,0. Para os entalhes localizados no mesmo lado do apoio, o fator é definido de acordo com a Equação [2.27].

$$k_v = \min. \left\{ \frac{1}{k_n \times \left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}, \frac{1}{\sqrt{h} \times \left(\sqrt{\alpha \cdot (1 - \alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \right\} \quad [2.27]$$

Em que:

i é a inclinação da mísula;

h é a altura total da viga;

x é a distância entre a linha de reação do apoio e o início da mísula;

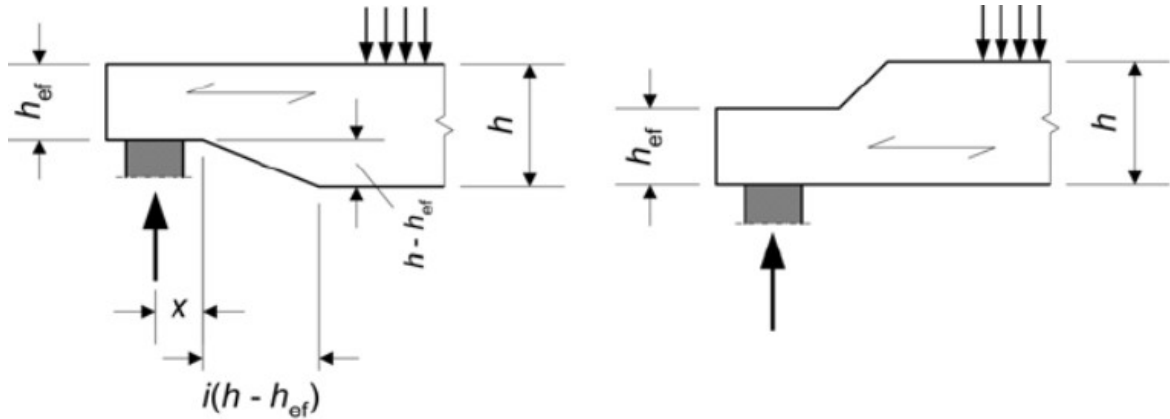
α é a razão entre a altura efetiva da viga (h_{ef}) e a altura total da viga (h);

k_n é um coeficiente dado de acordo com o tipo de madeira, podendo assumir os seguintes valores abaixo:

- Para madeira composta (LVL)= 4,5;
- Para madeira maciça= 5,0;
- Para madeira laminada colada= 6,5.

Os parâmetros utilizados nas Equações [2.26] e [2.27] estão ilustrados na Figura 2.47.

Figura 2.47– Parâmetros de vigas entalhadas nas extremidades



Fonte: EN 1995-1-1 (2004)

2.3.1.6 Comparação entre os critérios

Analisando primeiramente a posição do entalhe em vigas de madeira laminada colada, pode-se notar que as normas NDS (2015), CSA O86 (2010) e DIN 1052 (2004) são mais conservadoras, considerando que os entalhes na região tracionada da peça devem estar localizados na região dos apoios. Já a ABNT NBR 7190 (1997) e a EN 1995-1-1 (2004) não trazem restrições quanto à posição do entalhe. No entanto, esta última trata todos os entalhes como mísulas, reduzindo consideravelmente a concentração de tensões no entalhe, portanto sua consideração é favorável à segurança quando comparada com a ABNT NBR 7190 (1997).

Quando se observam as dimensões dos entalhes, a EN 1995-1-1 (2004) não apresenta restrições. No entanto, prescreve uma limitação na inclinação da mísula, a qual sendo menor ou igual $i:10$ os efeitos de concentração de tensões podem ser desprezados. Já a ABNT NBR 7190 (1997) e a DIN 1052 (2004) apresentam um limite absoluto no qual a altura do entalhe não deve ultrapassar 50% da altura total da peça. A norma CSA O86 (2010) e a NSD (2015) são mais conservadoras, sendo que a primeira retrata que a altura do entalhe não deve ultrapassar 25% da altura da viga, enquanto que a segunda apresenta uma restrição mais rígida com relação aos entalhes localizados na região tracionada da peça, nos quais a altura não deve exceder a 10% da altura total.

A NDS (2015), CSA O86 (2010), EN 1995-1-1 (2004) e DIN 1052 (2004) têm como fator importante no dimensionamento das peças que contêm entalhe, a distância entre a reação do apoio (ou face do mesmo) até o início do entalhe. A norma alemã ainda retrata um limite

de 0,4 da altura da peça entre a linha de reação do apoio até o início do entalhe. Já a ABNT NBR 7190:1997 não leva em consideração essa distância.

A consideração do entalhe no dimensionamento das vigas é feita de forma semelhante entre a ABNT NBR 7190 (1997) e a NDS (2015), sendo que ambas consideram um fator de majoração da tensão cisalhante atuante na peça. No entanto, a norma NDS (2015) apresenta-se mais conservadora, visto que apresenta o mesmo fator de majoração exposto pela norma brasileira, porém elevado ao quadrado. As normas CSA O86 (2010), EN 1995-1-1 (2004) e a DIN 1052 (2004) apresentam fatores de minoração de resistência do material. A primeira apresenta um fator de modificação (K_N) e as outras duas apresentam um fator de redução (K_v).

A exigência de reforço de vigas entalhadas não é evidente e também não é especificada nas normas NDS (2015), CSA O86 (2010) e o EN 1995-1-1 (2004). A ABNT NBR 7190 (1997) recomenda o uso de parafusos verticais quando a altura do entalhe é maior que 0,25 da altura da viga, no entanto também não traz informação detalhada a respeito no uso desses parafusos verticais. Por fim, a norma DIN 1052 (2004) apresenta um procedimento de cálculo para o reforço das vigas entalhadas por meio de parafuso verticais e também por meio de reforço externo.

2.3.1.7 Estudos realizados em vigas entalhadas

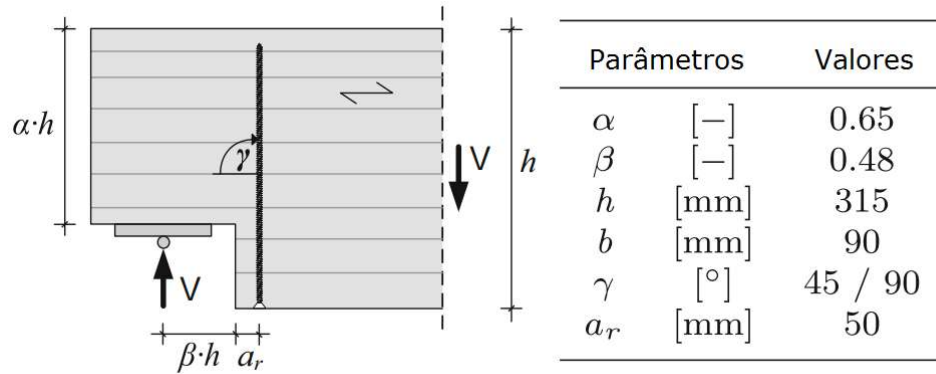
Jockwer (2012) realizou uma série de ensaios para determinação da capacidade resistente e modo de ruptura de vigas de MLC com a presença de entalhe no apoio. Foram realizados ensaios de flexão de três pontos, com distância entre o centro de aplicação da carga e o apoio no entalhe igual a 1150 mm. As dimensões das peças ensaiadas estão ilustradas na Figura 2.48.

Foram ensaiadas cinco configurações de vigas diferentes, conforme segue:

- a. Vigas sem reforço;
- b. Vigas reforçadas com parafusos SFS WR-T-13 de 13 mm de diâmetro e inclinação de 45°;
- c. Vigas reforçadas com parafusos SFS WR-T-13 de 13 mm de diâmetro e inclinação de 90°;
- d. Vigas reforçadas com fibra de carbono unidirecional Sika Wrap 230C/45 com 50 mm de largura e inclinação de 45°;

- e. Vigas reforçadas com fibra de carbono unidirecional Sika Wrap 230C/45 com 50 mm de largura e inclinação de 90°.

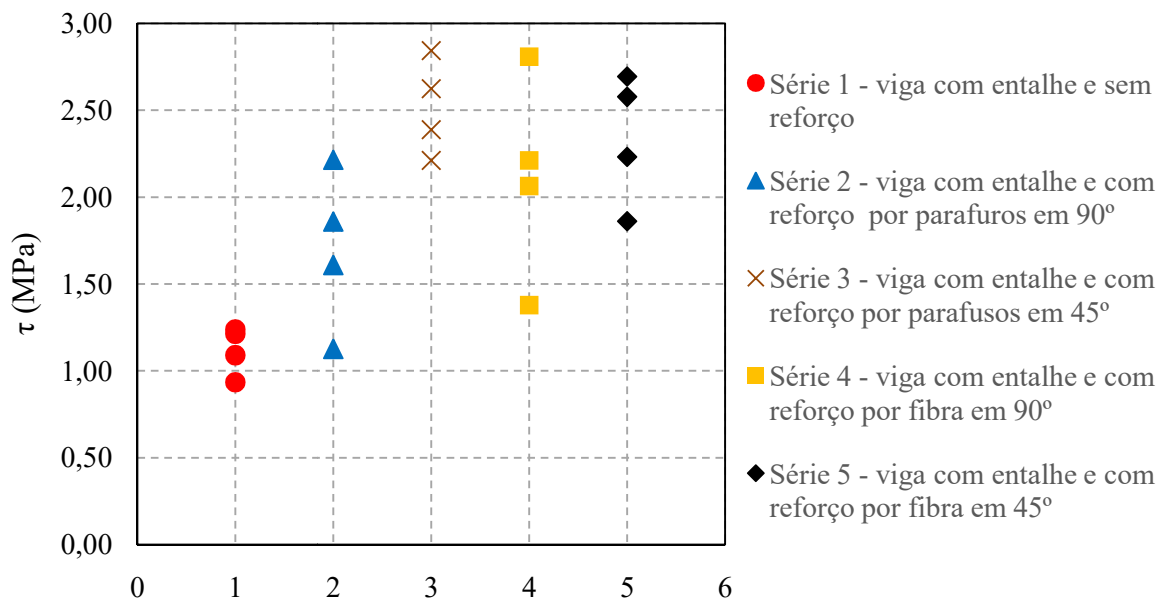
Figura 2.48– Dimensões da viga de MLC com a presença de entalhes



Fonte: Adaptado de Jockwer et al. (2015)

Jockwer(2012) observou que a ruptura ocorreu pelo aumento da fissura iniciada no canto do entalhe. Segundo o autor, o reforço atuou como limitador de abertura excessiva de fissuras e o modo de ruptura nas peças reforçadas aconteceu por cisalhamento. Os reforços utilizados aumentaram significativamente a capacidade de resistência das vigas, como se pode analisar pela Figura 2.49.

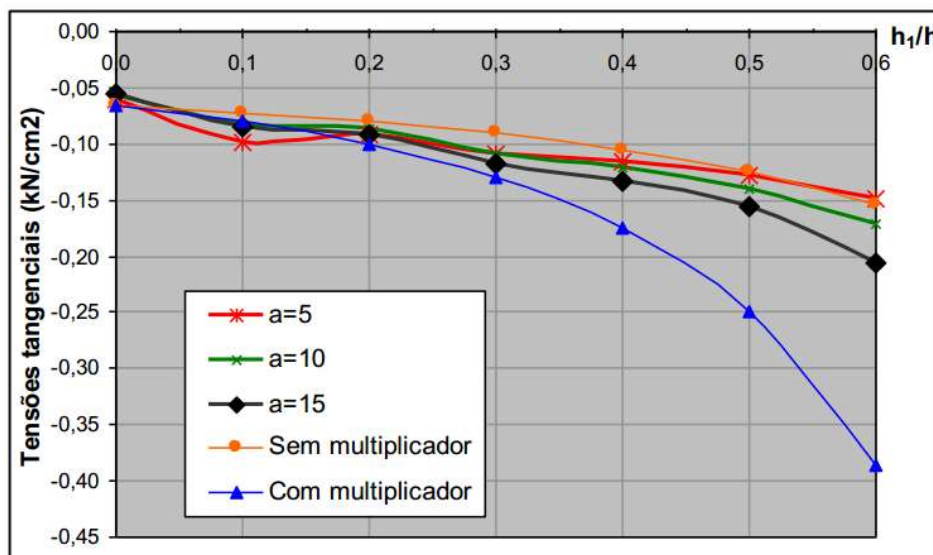
Figura 2.49– Resistências ao cisalhamento das vigas de MLC



Fonte: Adaptado de Jockwer (2012)

Gesualdo e Souza Jr. (2008) realizaram estudo acerca da abordagem numérica de vigas de madeira entalhadas. Analisaram a influência da altura e largura do entalhe na resistência da viga e também a influência do fator de majoração (h_1/h), disposto na ABNT NBR 7190:1997. A análise foi realizada para larguras (a) variando de 5 cm; 10 cm; 15 cm, também para a razão entre a altura do entalhe pela altura da viga variando de 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e por fim evidencia duas curvas sendo a primeira chamada de “sem multiplicador” que equivale ao cálculo da tensão tangencial sem o fator de majoração da solicitação e a segunda chamada de “com multiplicador” que equivale à recomendação da ABNT NBR 7190:1997, para o cálculo da tensão de cisalhamento. Os dados obtidos estão dispostos na Figura 2.50.

Figura 2.50– Variação da tensão tangencial em função da altura e largura do entalhe

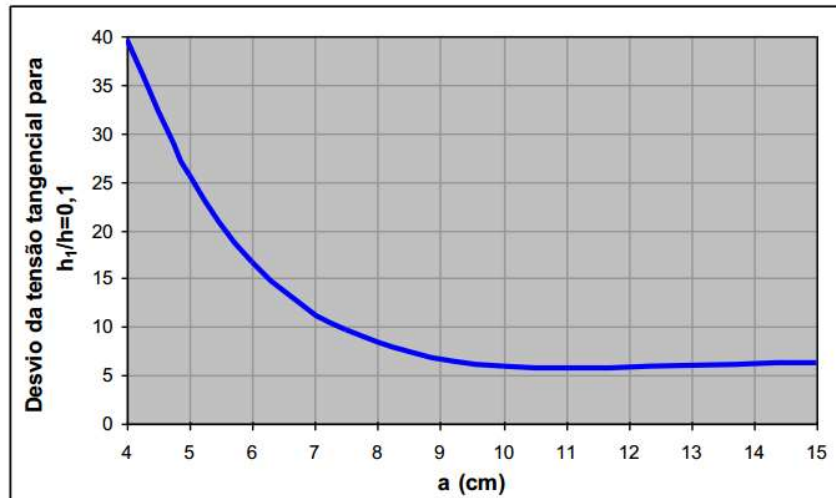


Fonte: Gesualdo e Souza Jr. (2008)

De acordo com Gesualdo e Souza Jr. (2008), foi possível observar que o fator de majoração é exagerado para a determinação da tensão tangencial, para os caso sem que h_1/h é maior que 0,17. Os autores também retratam que para faixa de validade definida pela ABNT NBR 7190:1997, $h_1/h \leq 0,25$ há interferência da largura do entalhe (a), mostrando que quanto menor é a largura do mesmo maior é o erro obtido na determinação da tensão tangencial.

A Figura 2.51 mostra um comparativo entre a tensão tangencial para o caso de h_1/h igual a 0,1 e o valor indicado pela ABNT NBR 7190:1997. Os dados evidenciam uma diferença de até 40% entre os resultados, para largura de 4 cm.

Figura 2.51– Desvio da tensão tangencial para $h_1/h=0,1$, em comparação com a NBR 7190 (1997)



Fonte: Gesualdo e Souza Jr. (2008)

Diante do exposto, pelos trabalhos apresentados, percebe-se a importância do estudo das vigas de MLC com entalhes por meio de ensaios, visando melhor compreender seu comportamento mecânico e comprovar a eficiência dos critérios normativos propostos em normas internacionais.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos para execução e os métodos de ensaios que foram realizados para avaliar a resistência ao cisalhamento de vigas de madeira laminada colada em quatro diferentes configurações: sem entalhe e sem reforço, com entalhe e sem reforço, com entalhe e com reforço de fibras de carbono aplicadas em ângulo de 90° e 45° em relação às fibras da madeira. Para cada uma das configurações foram ensaiadas três vigas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Campo Mourão.

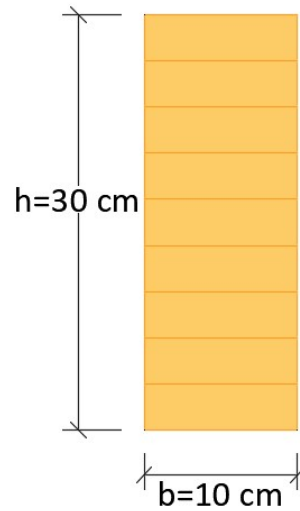
Todo procedimento experimental está embasado nas recomendações das normas pertinentes, sendo também baseadas em publicações correlatas. A determinação das dimensões do entalhe, bem como as do reforço externo, foi baseada nas recomendações da norma alemã DIN 1052 (2004, em virtude de a mesma apresentar uma maior especificação no dimensionamento do entalhe e também no dimensionamento do reforço.

Por fim, serão apresentados os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de caracterização da madeira laminada colada, bem como ensaios de caracterização da madeira empregada na produção da MLC, conforme o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. Para realização dos ensaios foram utilizadas vigas de MLC produzidas com *Pinus Taeda* em ambiente industrial pela empresa REWOOD, evitando-se as maiores variações de resistência das vigas produzidas artesanalmente. Os reforços externos nos entalhes foram compostos pela colagem de tecido de fibras de carbono, adquirido junto à empresa *S&P Clever Reinforcement Brasil*.

3.1 Dimensões das vigas

Para maximizar o efeito das tensões de cisalhamento foram adotadas dimensões para as vigas de MLC que atendam à relação comprimento (l) por altura (h) menor que 10. Deste modo, para uma viga com altura de 30 cm foi adotado um vão livre (distância entre o centro dos apoios) de 200 cm, obtendo uma relação entre vão e altura da ordem de aproximadamente 6,7. A largura (b) da viga foi padronizada em 10 cm, conforme indica Figura 3.1.

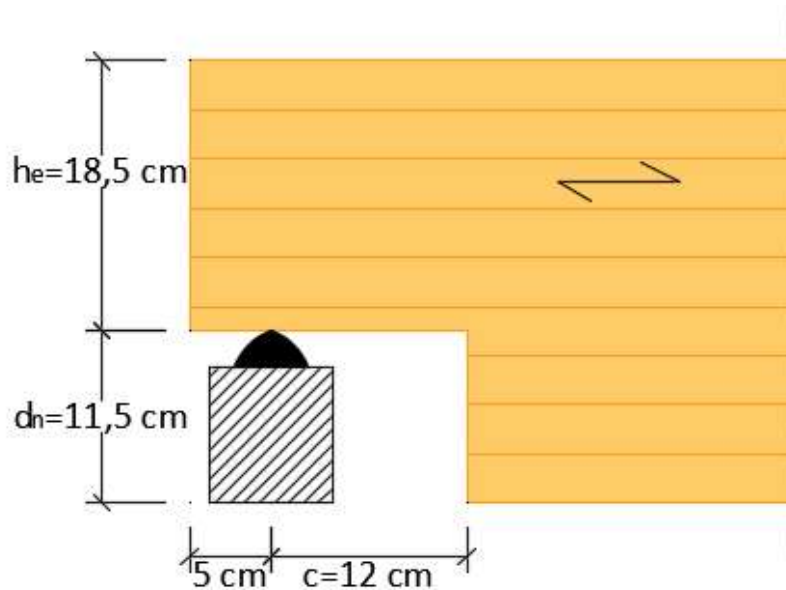
Figura 3.1– Detalhes da seção total da viga



Fonte: O Autor (2018)

As dimensões do entalhe foram adotadas respeitando-se as recomendações da norma DIN 1052 (2004), ou seja, $\alpha \geq 0,5$ e $c/h \leq 0,4$. Deste modo, a distância entre o centro do apoio e o início do entalhe, denominada de “c”, foi equivalente a 12 cm. Adotou-se o parâmetro α igual a 0,62 resultando em uma altura efetiva da viga (h_e) de 18,5cm e a altura do entalhe (d_n) de 11,5 cm como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2– Detalhe das dimensões do entalhe



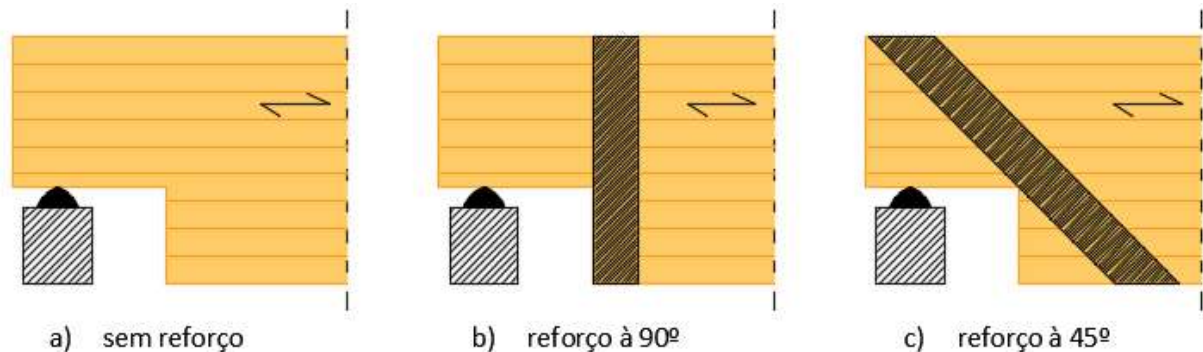
Fonte: O Autor (2018)

3.2 Configurações dos reforços externos

Para a realização do reforço externo optou-se pela fibra de carbono, na forma de tecido unidirecional, que foi adquirida junto à empresa *S&P Clever Reinforcement Brasil*. Para se analisar a influência dos reforços externos na resistência da viga foram planejadas quatro configurações: vigas com entalhe (sem reforço), vigas com entalhe e reforço aplicado em 90°, vigas com entalhe e reforço aplicado em 45°, ambos em relação à direção das fibras da madeira, e vigas sem entalhe. As configurações com entalhe estão ilustradas na Figura 3.3.

A largura do reforço deve respeitar o parâmetro imposto pela norma DIN 1052 (2004), dada pela Equação 2.25, obtendo-se o seguinte intervalo para a largura do reforço (l_r): $25\text{mm} \leq l_r \leq 50\text{mm}$. Para este trabalho foi adotado o valor de l_r igual a 50mm. A espessura do reforço é de 0,190 mm e as especificações técnicas do tecido de fibras de carbono estão agrupadas na Tabela 3.1. Segundo o fabricante, a determinação da resistência das fibras de carbono foi feita em conformidade com a ASTM D 3039 (2000).

Figura 3.3– Detalhes das configurações das vigas ensaiadas



Fonte: O Autor (2018)

O adesivo utilizado para aplicação do reforço externo foi também adquirido junto à empresa *S&P Reinforcemet Brasil*, sendo constituído por dois componentes: *S&P Resin 50 Primer* e *S&P Resin 55 Laminação*. Segundo a empresa, o primeiro consiste numa resina epóxi bicomponente, recomendada para melhorar a aderência entre a manta impregnada e a viga de madeira laminada colada, sendo que suas características se encontram na Tabela 3.2 e Tabela 3.3. O segundo também consiste numa resina epóxi bicomponente, recomendada para impregnação e colagem de compósitos, sendo suas características dispostas na Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.1– Especificações da fibra de carbono

| Dados técnicos (unidirecional) - S&P C-Sheet 240 | |
|--|-------|
| Módulo Elástico (kN/mm ²) | 240 |
| Resistência à tração (N/mm ²) | 3800 |
| Gramatura da fibra (g/m ²) [direção principal] | 300 |
| Gramatura por unidade de área de manta (g/m ²) | 330 |
| Densidade (g/m ³) | 1,7 |
| Alongamento máximo (%) | 1,55 |
| Espessura (mm) | 0,176 |
| Fator de redução (Recomendação S&P) | 1,2 |
| Força de tração última para 1000 mm de largura (kN) | 557,3 |
| Força de tração para 1000 mm de largura com 0,6% de alongamento (kN) | 211 |

Fonte: Adaptado *S&P Reinforcement Clever Brasil* (2017)

Tabela 3.2– Características dos componentes da resina primer

| Propriedades | Resina Componente A | Endurecedor Componente B |
|---|-----------------------------|--------------------------|
| Aparência | líquido translúcido viscoso | líquido âmbar |
| Viscosidade à 25°C | 1000 a 1500 | 200 a 600 |
| Peso específico à 25°C (g/cm ³) | 1,2 ± 0,01 | 1,00 ± 0,02 |

Fonte: Adaptado *S&P Reinforcement Clever Brasil* (2017)

Tabela 3.3– Especificações de manipulação da resina primer

| Propriedades | Especificação |
|--|-----------------------|
| Proporção de mistura (Resina: Endurecedor) | 100:50 partes em peso |
| Viscosidade da mistura à 25°C | 600 a 900 |
| Temperatura ideal de manipulação (°C) | 18 - 35 |
| Tempo de utilização da mistura à 25°C | 90 a 120 minutos |
| Tempo de endurecimento da mistura (100 ml, 25°C) | 8 a 10 horas |
| Cura total à 25°C | 72 a 120 horas |

Fonte: Adaptado *S&P Reinforcement Clever Brasil* (2017)

Tabela 3.4– Características dos componentes da resina de laminação

| Propriedades | Resina Componente A | Endurecedor Componente B |
|--|-----------------------------|--------------------------|
| Aparência | líquido translúcido viscoso | líquido âmbar |
| Viscosidade à 25°C | 4000 a 7000 | 200 a 600 |
| Peso específico à 25°C (g/cm ³) | 1,1 ± 0,01 | 1,00 ± 0,02 |
| Índice tixotrópico | Mín. 1,5 | Mín. 1,0 |

Fonte: Adaptado *S&P Reinforcement Clever Brasil* (2017)

Tabela 3.5– Especificações de manipulação da resina primer

| Propriedades | Especificação |
|---|-----------------------|
| Proporção de mistura (Resina: Endurecedor) | 100:50 partes em peso |
| Viscosidade da mistura à 25°C | 1500 a 2500 |
| Temperatura ideal de manipulação (°C) | 18 - 35 |
| Tempo de utilização da mistura à 25°C | 90 a 120 minutos |
| Tempo de endurecimento da mistura (100 ml, 25°C) | 8 a 10 horas |
| Cura total à 25°C | 72 a 120 horas |

Fonte: Adaptado *S&P Reinforcement Clever Brasil* (2017)

De acordo com o fabricante, primeiramente deve ser aplicada a *Resin 50 Primer* na região da viga de MLC que receberá o reforço para aumentar a aderência entre a viga e o compósito. Na sequência deve-se impregnar o tecido com a resina *Resin 55* e aplicá-lo na região do reforço. Deve-se fazer uso também de um rolo desaerador para eliminar as possíveis bolhas, que prejudicariam a eficiência do reforço externo.

3.3 Preparação das vigas de MLC

A preparação das vigas de MLC que fariam parte do programa de ensaios estabelecido nesta pesquisa foi realizada nos meses de novembro e dezembro do ano de 2017 e foi dividida em duas etapas: realização dos entalhes e aplicação dos reforços externos. As quinze vigas de MLC adquiridas foram separadas de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6– Detalhamento das vigas de MLC

| Viga | Detalhamento |
|-------------|---|
| 2 | viga piloto, com entalhe e sem reforço |
| 1 | viga com entalhe e sem reforço |
| 6 | viga com entalhe e sem reforço |
| 9 | viga com entalhe e sem reforço |
| 10 | viga piloto, com entalhe e com reforço em 90° |
| 3 | viga com entalhe e com reforço em 90° |
| 4 | viga com entalhe e com reforço em 90° |
| 13 | viga com entalhe e com reforço em 90° |
| 7 | viga piloto, com entalhe e com reforço em 45° |
| 12 | viga com entalhe e com reforço em 45° |
| 14 | viga com entalhe e com reforço em 45° |
| 15 | viga com entalhe e com reforço em 45° |
| 5 | viga sem entalhe e sem reforço |
| 8 | viga sem entalhe e sem reforço |
| 11 | viga sem entalhe e sem reforço |

Fonte: O Autor (2018)

Primeiramente foram selecionadas 12 vigas dentre as 15 vigas adquiridas junto à empresa Rewood para realização dos entalhes nas extremidades. Logo após, com a ajuda de um paquímetro universal com resolução de cinco centésimos de milímetro, foi delimitada a região do entalhe, conforme mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4– Delimitação do entalhe



Fonte: O Autor (2018)

Em seguida, com a ajuda de uma serra circular foram realizados os cortes para a obtenção dos entalhes, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5– Realização dos cortes do entalhe



Fonte: O Autor (2018)

Para um melhor acabamento dos recortes no canto dos entalhes, utilizou-se uma serra sabre da marca Makita, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6- Acabamento nos cantos dos entalhes



Fonte: O Autor (2018)

Logo após para que se obter na região do entalhe uma superfície plana e no esquadro (importante para distribuição dos esforços na região do apoio) foi utilizado primeiramente uma grosa para retirar imperfeições maiores e posteriormente uma lixadeira orbital da marca Makita para retirar as imperfeições menores. Por fim, verificou o esquadro da peça com a ajuda de um esquadro, conforme a Figura 3.7. Os valores médios das dimensões das vigas foram dispostos na Tabela 3.7.

Figura 3.7– Verificação do esquadro dos entalhes



Fonte: O Autor (2018)

Tabela 3.7– Dimensões das vigas de MLC

| Viga | Largura (mm) | Altura (mm) | Altura viga no entalhe (mm) | Largura do Entalhe (mm) | Parâmetros | |
|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| | | | | | α | β |
| 1 | 100,05 | 300,93 | 185,39 | 118,38 | 0,62 | 0,39 |
| 2 | 99,88 | 300,35 | 185,13 | 120,10 | 0,62 | 0,40 |
| 3 | 100,08 | 300,62 | 184,39 | 119,38 | 0,61 | 0,40 |
| 4 | 100,03 | 300,68 | 186,10 | 119,58 | 0,62 | 0,40 |
| 5 | 100,10 | 300,92 | - | - | - | - |
| 6 | 100,23 | 300,10 | 184,53 | 118,20 | 0,61 | 0,39 |
| 7 | 100,05 | 300,55 | 185,60 | 117,10 | 0,62 | 0,39 |
| 8 | 100,03 | 300,57 | - | - | - | - |
| 9 | 100,10 | 300,20 | 183,53 | 118,80 | 0,61 | 0,40 |
| 10 | 99,57 | 300,15 | 185,69 | 120,15 | 0,62 | 0,40 |
| 11 | 100,12 | 300,30 | - | - | - | - |
| 12 | 100,07 | 300,37 | 184,66 | 119,20 | 0,61 | 0,40 |
| 13 | 100,42 | 300,83 | 185,60 | 119,13 | 0,62 | 0,40 |
| 14 | 100,17 | 300,62 | 185,01 | 118,03 | 0,62 | 0,39 |
| 15 | 100,05 | 300,25 | 184,57 | 118,98 | 0,61 | 0,40 |
| Média: | 100,06 | 300,50 | 185,02 | 118,92 | 0,62 | 0,40 |

Como se pode observar na Tabela 3.7, foram realizados entalhes em 12 vigas, sendo que nas vigas 5, 8 e 11 não foram realizados entalhes.

Após as operações para a realização dos entalhes, procedeu-se à inspeção visual das vigas adquiridas, de modo a seleccionar quatro vigas para cada série de ensaios. As vigas que não apresentavam nós e emendas do tipo *fingerjoints* próximos às extremidades foram

destinadas para a série de vigas com entalhe e sem reforço e as demais vigas foram divididas entre as séries com entalhe e com reforço em 45° e 90°. Em seguida iniciou-se a etapa de aplicação dos reforços externos constituídos por tecido de fibras de carbono em oito vigas de MLC. A etapa de moldagem foi definida por:

1. Recorte da tira de fibra de carbono

O comprimento da fibra de carbono cortado foi tal que quando aplicado ocorresse uma sobreposição, com objetivo de ancorar a fibra de carbono. Para as vigas com reforço em 90° a sobreposição foi de tamanho igual à largura da viga, conforme Figura 3.8. Para as vigas com reforço em 45° foi aplicada uma tira de fibras de carbono na região inferior da viga, conforme Figura 3.9.

Figura 3.8– Transpasse das fibras no reforço em 90°



Fonte: O Autor (2018)

Figura 3.9– Transpasse das fibras no reforço em 45°



Fonte: O Autor (2018)

2. Regularização da superfície

Com o objetivo de melhorar a aderência entre o compósito e a madeira foi realizada a regularização da superfície com a ajuda de uma lixadeira, eliminando assim possíveis ondulações que poderiam comprometer a eficácia do reforço, conforme Figura 3.10.

Figura 3.10– Regularização da superfície



Fonte: O Autor (2018)

3. Dosagem e aplicação da resina primer nas proporções 2/1 de resina/endurecedor respectivamente, conforme Figura 3.11.

Figura 3.11– Dosagem da resina



Fonte: O Autor (2018)

A aplicação da resina primer (Figura 3.12) se deu para melhorar as condições de aderência entre a peça e a fibra de carbono impregnada. De acordo com o fabricante deve-se esperar um período de 8 a 24 horas para chegar na consistência ideal para aplicação do reforço.

Figura 3.12– Aplicação da resina primer

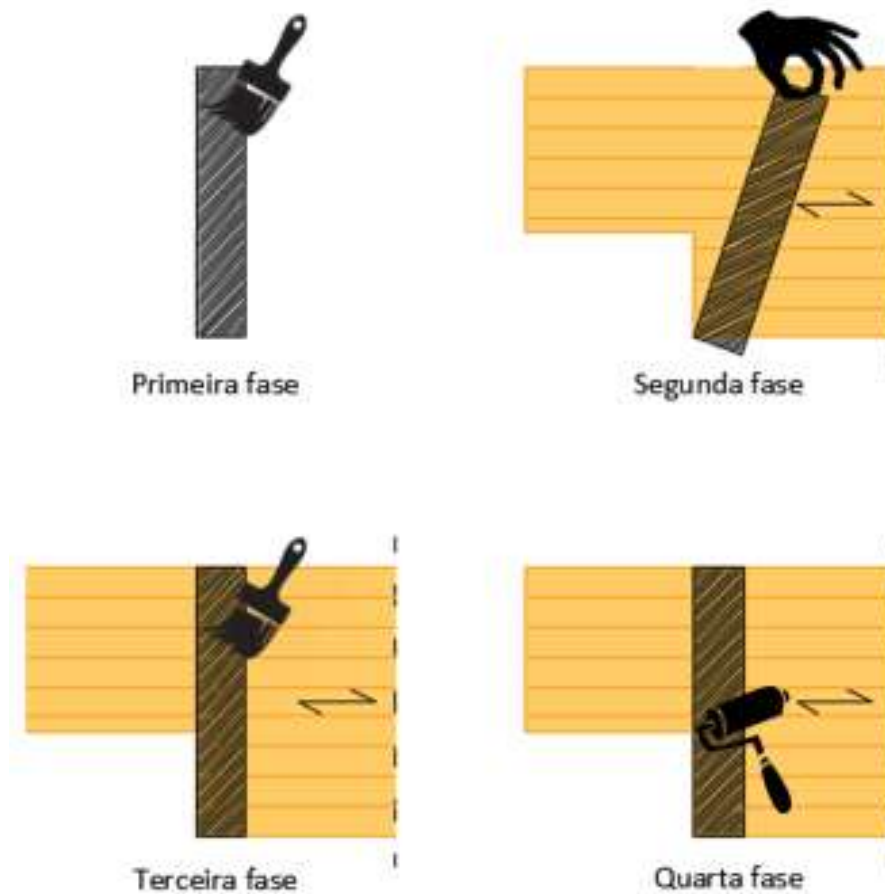


Fonte: O Autor (2018)

4. Dosagem e aplicação da resina epóxi nas proporções 2/1 de resina/endurecedor, respectivamente.

A dosagem da resina epóxi bicomponente foi efetuada do mesmo modo que a resina primer. A aplicação do adesivo aconteceu em quatro fases: primeira fase a fibra de carbono foi impregnada com adesivo epóxi; na segunda fase foi posicionada a fibra de carbono impregnada sobre a viga; na terceira fase foi aplicada mais uma camada de adesivo sobre a fibra; na quarta fase foi aplicado um rolo desaerador para expulsar possíveis bolhas que poderiam comprometer a eficiência da colagem, bem como influenciar na capacidade do reforço externo. O fluxograma do processo está representado pela Figura 3.13.

Figura 3.13- Ciclo de aplicação do reforço externo



Fonte: O Autor (2018)

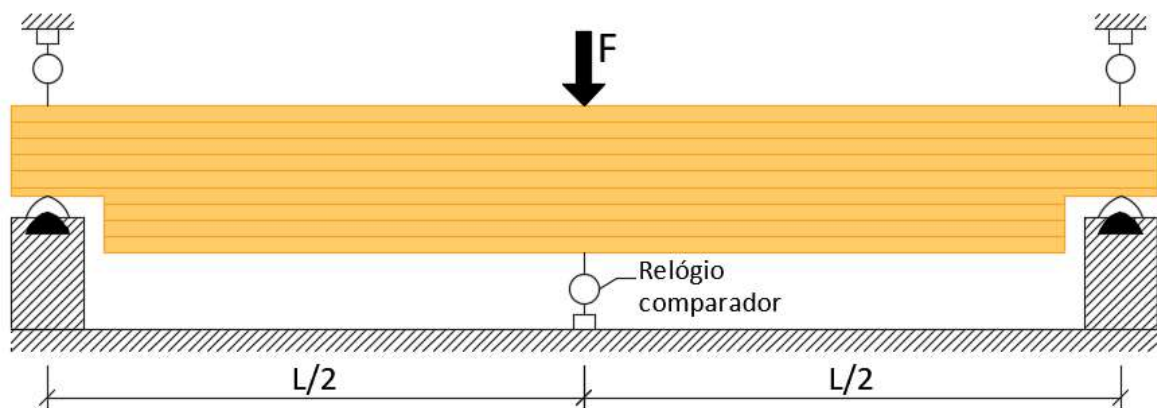
5. Cura do adesivo

Por fim ocorreu a cura do adesivo que, de acordo com o fabricante, acontece de 72 a 120 horas. Devido ao fato do reforço ter sido aplicado no mês de dezembro e os ensaios nas vigas de MLC terem sido realizados somente nos meses de março e abril de 2018, houve tempo suficiente para a completa cura do adesivo.

3.4 Método de Ensaio das vigas

Segundo as recomendações da ASTM D 198 (2005), com esquema de ensaio representado na Fig. 3.14, foram confeccionadas doze vigas visando o ensaio de flexão estática, para determinação de seus respectivos módulos de elasticidade (MOE), em seguida as vigas foram carregadas até a ruptura para determinação dos módulos de ruptura (MOR).

Figura 3.14 – Ensaio de flexão de três pontos



Fonte: O Autor (2018)

Para a determinação do MOE, a norma ABNT NBR 7190:1997 determina que devam ser efetuados ciclos de carga e descarga. Deste modo foram produzidas vigas gêmeas para cada série de ensaios: sem reforço, reforço em 90° e reforço em 45°, para a determinação da força de ruptura ($F_{M,est}$). A rigidez foi determinada no último ciclo de carregamento, por meio da obtenção do incremento de deslocamento quando ocorre o aumento da força aplicada, de um valor correspondente a 10% do $F_{M,est}$ até aproximadamente 35% do $F_{M,est}$.

Os valores dos MOE's, MOR's e tensões de cisalhamento foram calculados em conformidade com a ASTM D 198 (2005), sendo eles:

[1] Módulo de elasticidade à flexão aparente (desprezando-se a deformação por cisalhamento) calculado pela expressão:

$$\frac{PL^3}{4bh^3\Delta} \quad [3.1]$$

[2] Módulo de elasticidade à flexão (considerando-se a deformação por cisalhamento), calculado pela expressão:

$$\frac{PL^3}{4bh^3\Delta\left(1 - \frac{3PL}{10bhG\Delta}\right)} \quad [3.2]$$

[3] Módulo de ruptura, calculado pela expressão:

$$\frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad [3.3]$$

[4] Tensão de Cisalhamento, calculada pela expressão:

$$\frac{3P_{max}}{4bh} \quad [3.4]$$

Em que:

P é o incremento de forças aplicadas, dentro do regime elástico linear (em N);

$P_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada (em N);

h é a altura da viga (em mm);

b é a largura da viga (em mm);

L é o vão (em mm);

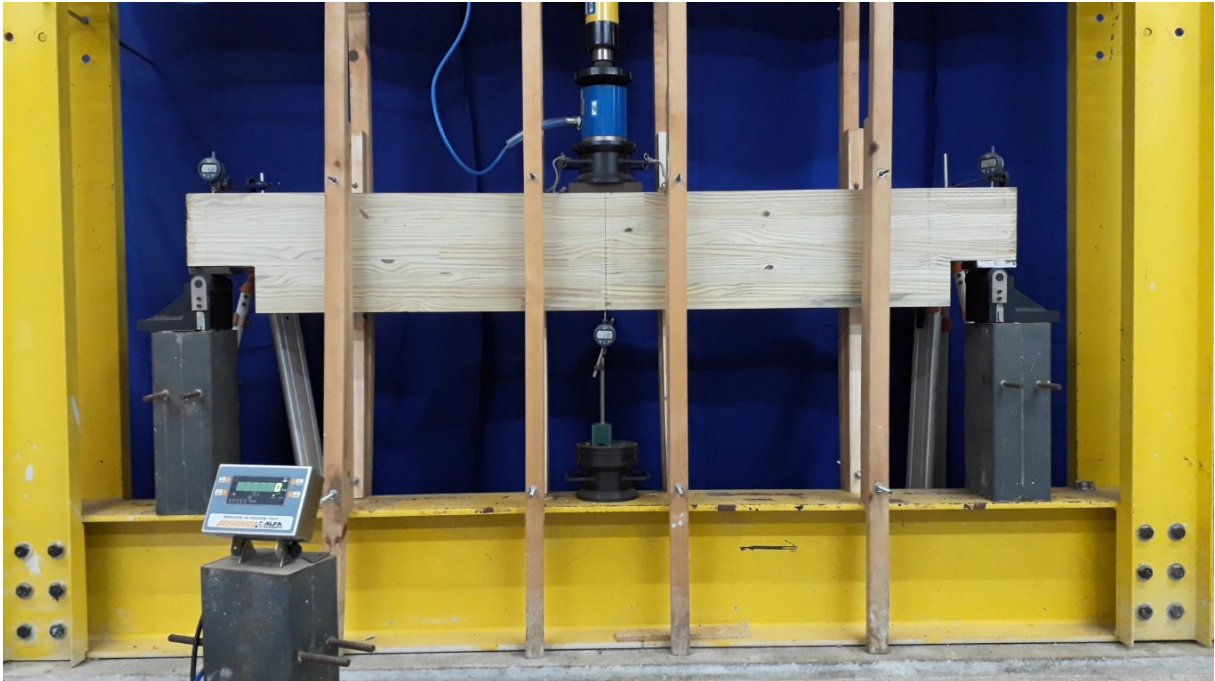
Δ é o incremento de descolamentos verticais, medido no meio do vão, correspondente às forças aplicadas (em N);

G é o módulo de elasticidade transversal, calculado por $G=E/20$ (em MPa), conforme relação proposta pela ABNT NBR 7190:1997.

Para a realização do ensaio foi utilizado o pórtico de reações, em que a força foi aplicada por meio de um conjunto composto por: uma bomba hidráulica da marca Enerpac modelo P392 e um pistão atuador hidráulico da marca Enerpac modelo RC 256 com capacidade de 25 toneladas. A norma ASTM D 198 (2005) determina que o tempo de ensaio ideal até a ruptura deve ter duração de 10 minutos, no entanto determina limites de no mínimo 6 minutos e no máximo 20 minutos.

As forças foram registradas pelo conjunto composto por: uma célula de carga e um indicador de pesagem da marca Alfa. Foram coletados também as deflexões por meio de três relógios comparadores digitais da marca Mitutoyo, modelo 543-390B, com resolução de milésimo de milímetros, posicionados na região do apoio na parte superior da viga, com a função de detectar possíveis esmagamentos da madeira, e também na região central da viga. O esquema de ensaio está representado pela Figura 3.15.

Figura 3.15– Esquema de ensaio das vigas



Fonte: O Autor (2018)

Na Figura 3.15 também se observa a utilização de quatro elementos de contraventamento, necessários para evitar a torção da viga durante o ensaio. Durante o ensaio das vigas piloto constatou-se a necessidade de instalação dos elementos de contraventamento. As vigas foram carregadas até aproximadamente 35% da força de ruptura estimada ($F_{M,est}$), e em seguida as vigas foram carregadas até a ruptura.

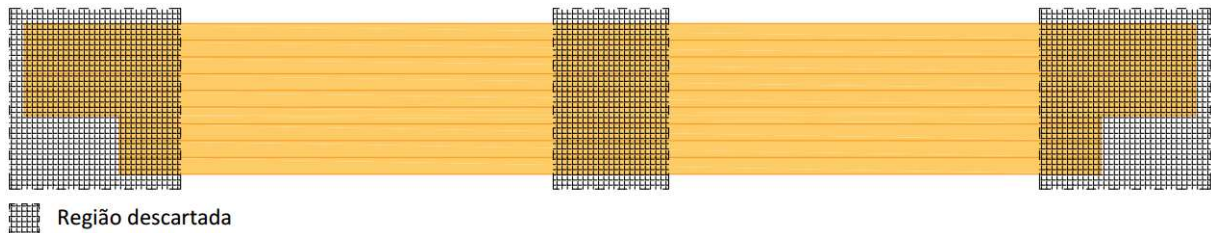
3.5 Confeção dos corpos de prova para caracterização da MLC e da madeira

Após a realização dos ensaios de flexão, foram extraídos os corpos de prova para realizar os ensaios de cisalhamento na lâmina de cola, tração normal às fibras na posição da lâmina de cola, além de ensaios de caracterização da madeira como: cisalhamento paralelo às fibras da madeira, tração normal às fibras, compressão paralela às fibras, determinação da umidade e densidade. Esses ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.

A confeção dos corpos de prova para caracterização aconteceu em seis etapas. Primeiramente foi delimitada a região para extração dos mesmos, já que os corpos de prova foram retirados após a ruptura das vigas. Com intuito de eliminar a influência de qualquer

danificação ocasionada pelo ensaio, os corpos de prova foram retirados de posições de menor solicitação. Deste modo, foram excluídas as partes da viga localizadas na região dos apoios, numa dimensão em torno de 35 a 40 cm, bem como 30 cm da região central da peça, conforme Figura 3.16.

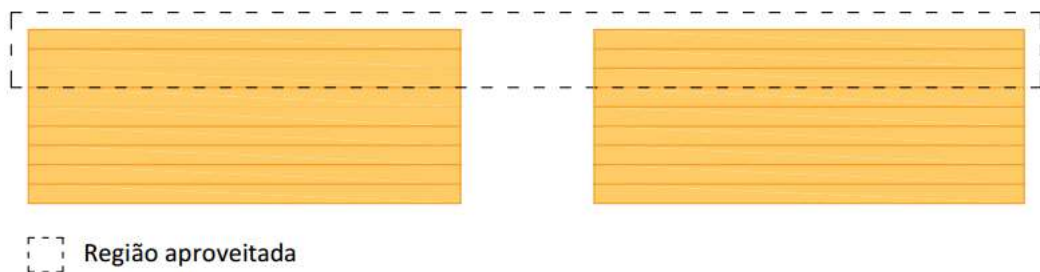
Figura 3.16- Delimitação da madeira na região dos apoios e no centro da viga



Fonte: O Autor (2018)

Do material remanescente foram utilizadas somente as lâminas da parte superior da viga, entre a primeira e a terceira lâmina, visando obter resultados mais homogêneos, conforme Figura 3.17.

Figura 3.17– Delimitação da madeira na altura



Fonte: O Autor (2018)

Para esta etapa foi utilizada uma serra circular, para excluir a região dos apoios e da parte central das vigas de MLC, além de uma serra esquadrejadeira da marca Omil, modelo SCEO/IR 2950, conforme Figura 3.18.

Figura 3.18– Extração dos corpos de prova para caracterização da MLC



Fonte: O Autor (2018)

Na segunda etapa, do material remanescente e selecionado na etapa anterior, foi determinado como seriam extraídos os corpos de prova para caracterização da madeira e para caracterização da MLC, conforme Figura 3.19.

Figura 3.19– Seleção das peças de madeira para extração dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2018)

Logo após foi iniciado o processo de aplainamento das superfícies e diminuição da espessura da peça, até se atingir a espessura de 5 cm. Para esse processo foi utilizada uma desgrossadeira da marca Baldan, modelo DGR-4 400 mm, que por recomendações técnicas do laboratório da UTFPR foi respeitada a remoção de camadas com no máximo 4 mm por vez, conforme Figura 3.20. Uma vez próximo de obter a espessura de 5 cm, foi conferido o esquadro de cada peça e quando necessário colocar a peça no esquadro, utilizou-se a plainadora da marca Baldan.

Figura 3.20 – Desgrossadeira Baldan



Fonte: O Autor (2018)

Na terceira etapa, já com as peças na espessura de 5 cm e em esquadro, foi desenhado em cada peça os modelos dos corpos de prova, ou seja, foram desenhados os corpos de prova de tração na lâmina de cola e de tração na madeira, bem como os corpos de prova de cisalhamento na madeira e na lâmina de cola. Em seguida, com a ajuda de uma serra circular, foram recortadas as peças no comprimento requerido pela ABNT NBR 7190:1997. Nessa etapa foram obtidos os corpos de prova para compressão paralela às fibras. Foram eliminados os possíveis defeitos, como nós e fissuras, os quais poderiam comprometer os resultados.

Na quarta etapa os corpos de prova foram separados de acordo com cada caracterização e em seguida foram desenhados, em cada corpo de prova, as regiões a serem removidas para continuar a moldagem dos mesmos, conforme Figura 3.21.

Figura 3.21– Desenho dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2018)

Na quinta etapa foram finalizados os corpos de prova para o ensaio de tração, conforme Figura 3.22.

Figura 3.22– Moldagem dos corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: O Autor (2018)

Na sexta etapa foram moldados os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento, conforme Figura 3.23.

Figura 3.23– Moldagem dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento



Fonte: O Autor (2018)

3.6 Ensaios de caracterização da madeira e da MLC

Após a confecção dos corpos de prova foram realizados os ensaios de cisalhamento na lâmina de cola, tração normal às fibras na posição da lâmina de cola, além de ensaios de caracterização da madeira como: cisalhamento paralelo às fibras da madeira, tração normal às fibras e compressão paralela às fibras. Também foram determinados a densidade e o teor de umidade das peças. Esses ensaios foram realizados de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, empregando-se a máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 30000, com capacidade para 300 kN.

3.6.1 Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola

Os corpos de prova extraídos da viga para determinação da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola foram ensaiados de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo a resistência calculada conforme Equação [3.5].

$$f_{g,v} = \frac{F_{V0,máx.}}{A_{gV,0}} \quad [3.5]$$

Em que:

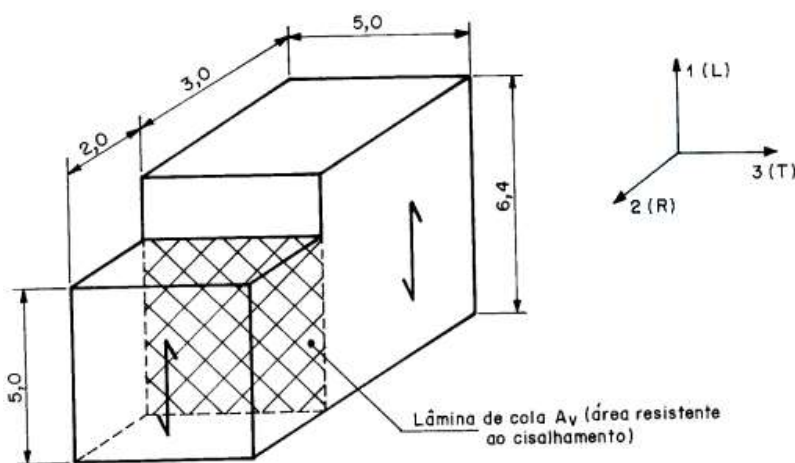
f_{gv} é a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras da madeira laminada colada (em Pa);

$F_{V0,máx.}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova (em N);

$A_{gV,0}$ é a área inicial da lâmina de cola, em um plano paralelo às fibras da madeira (em m^2).

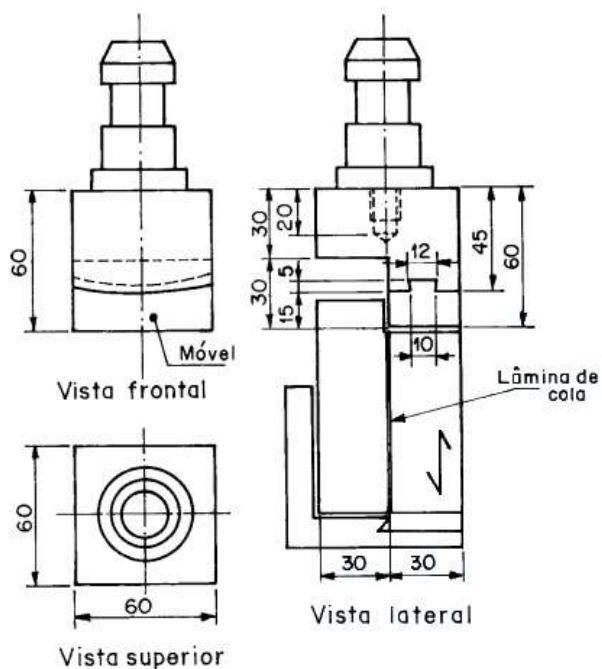
Seguindo as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, os corpos de prova foram confeccionados conforme indicado pela Figura 3.24. O ensaio foi realizado com aplicação de um carregamento monotônico crescente, a uma taxa de 2,5 MPa/min. Além disso, a norma também aconselha que para o ajuste do corpo de prova à máquina, deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. O esquema de ensaio, de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, está ilustrado na Figura 3.25, enquanto que o esquema de ensaio realizado em laboratório está ilustrado pela Figura 3.26. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.24— Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.25– Arranjo de ensaio para cisalhamento na lâmina de cola



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.26– Ensaio de cisalhamento



Fonte: O Autor (2018)

3.6.2 Ensaio de tração normal à lâmina de cola

A determinação da resistência da lâmina de cola à tração normal ($f_{gt,90}$) foi realizada de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo calculada conforme Equação [3.6].

$$f_{gt,90} = \frac{F_{t90,máx.}}{A_{g90}} \quad [3.6]$$

Em que:

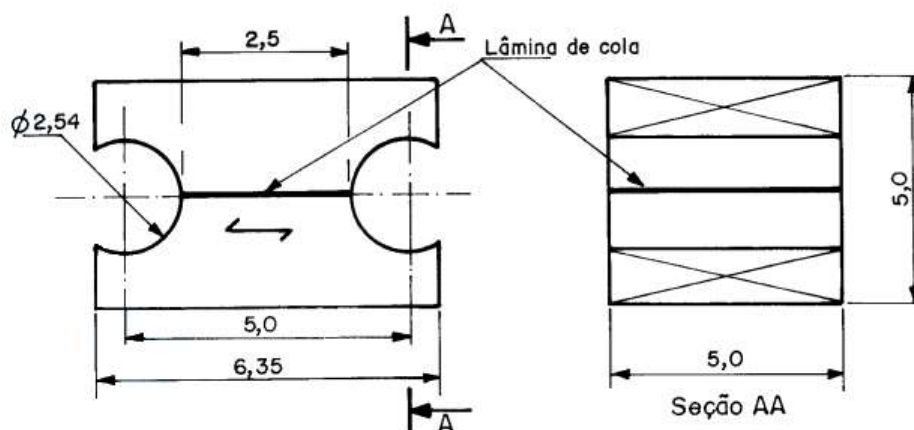
$f_{gt,90}$ é a resistência da lâmina de cola à tração normal da madeira laminada colada (em Pa);

$F_{t90,máx}$ é a máxima força de tração normal aplicada (em N);

A_{g90} é a área inicial da lâmina de cola tracionada (em m²).

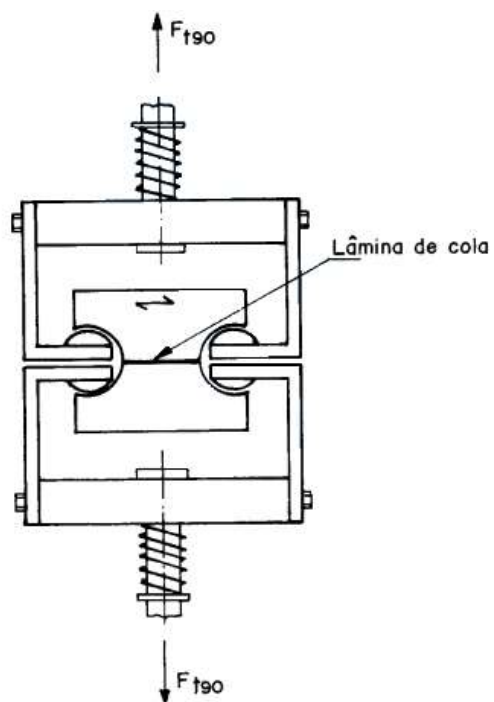
Seguindo as recomendações desta norma, os corpos de prova foram moldados de acordo com as dimensões ilustradas na Figura 3.27. É recomendado também realizar o ajuste entre a máquina de ensaio mecânico e o corpo de prova com a ajuda de uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. O ensaio foi realizado com aplicação de um carregamento monotônico crescente a uma taxa de 2,5 MPa/min. O arranjo do ensaio está ilustrado na Figura 3.28, enquanto que o esquema de ensaio realizado em laboratórios está ilustrado na Figura 3.29. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.27– Corpo de prova para ensaio de tração normal à lâmina de cola



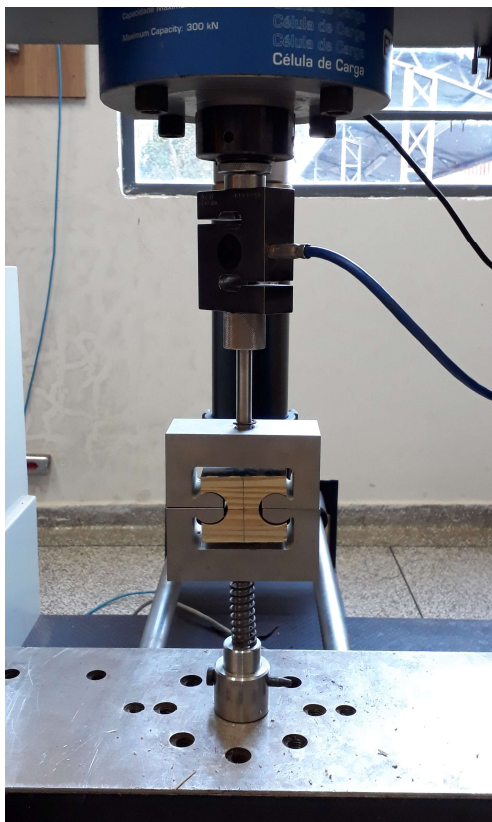
Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.28– Dispositivo para ensaio de tração normal à lâmina de cola



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.29– Arranjo para ensaio de tração normal à lâmina de cola



Fonte: O Autor (2018)

3.6.3 Ensaio de cisalhamento paralelo as fibras

A determinação da resistência ao cisalhamento paralelo as fibras (f_{v0}) ocorreu de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo calculada conforme Equação [3.7].

$$f_{v0} = \frac{F_{V0,máx.}}{A_{V0}} \quad [3.7]$$

Em que:

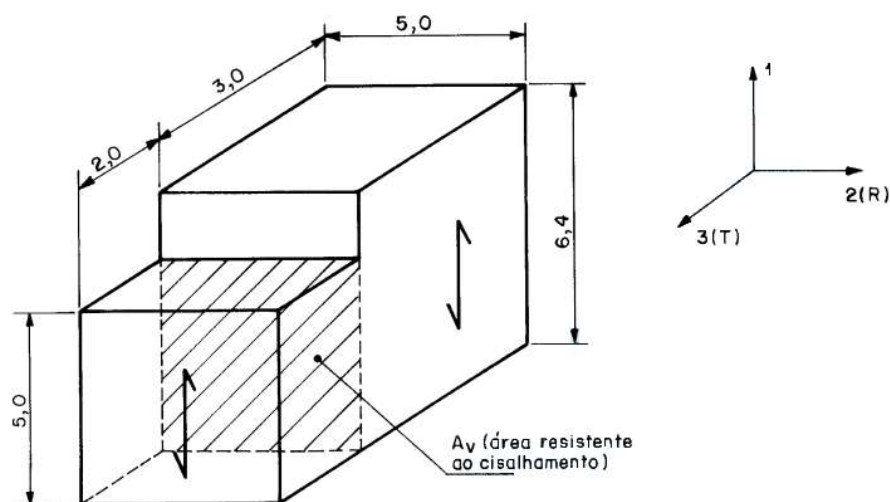
f_{V0} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (em Pa);

$F_{V0,máx.}$ é a máxima força cisalhante (em N);

A_{V0} é a área inicial da seção crítica em um plano paralelo às fibras (em m²).

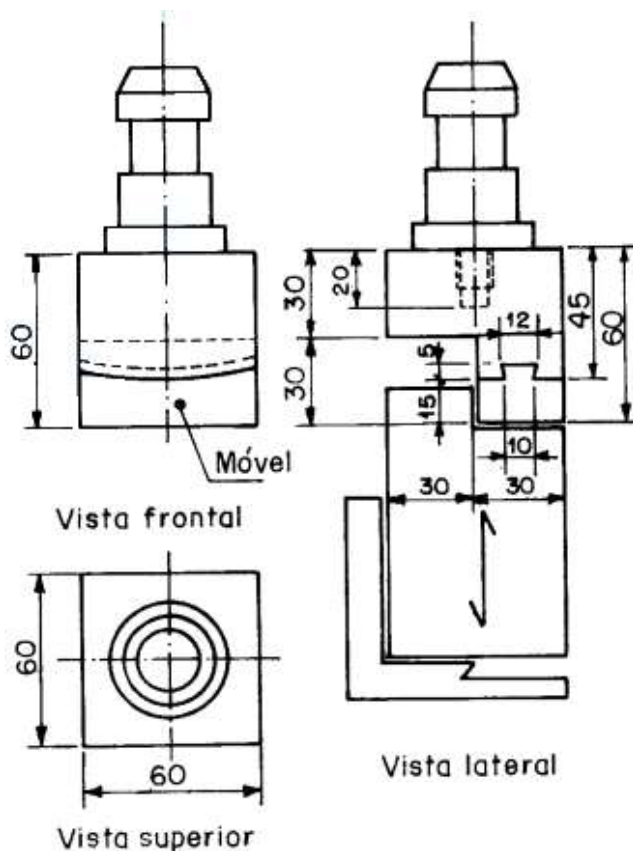
Os corpos de prova foram moldados de acordo com as dimensões ilustradas na Figura 3.30. É recomendado também realizar o ajuste entre a máquina de ensaio mecânico e o corpo de prova com a ajuda de uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. O ensaio foi realizado com aplicação de um carregamento monotônico crescente a uma taxa de 2,5 MPa/min. O arranjo do ensaio está ilustrado na Figura 3.31, enquanto que o esquema de ensaio realizado em laboratório está ilustrado na Figura 3.26. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.30– Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.31– Dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

3.6.4 Ensaio de tração normal às fibras

A determinação da resistência à tração normal ($f_{wt,90}$) ocorreu de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo calculada conforme Equação [3.8].

$$f_{wt,90} = \frac{F_{t90,máx.}}{A_{t90}} \quad [3.8]$$

Em que:

$f_{wt,90}$ é a resistência à tração normal às fibras (em Pa);

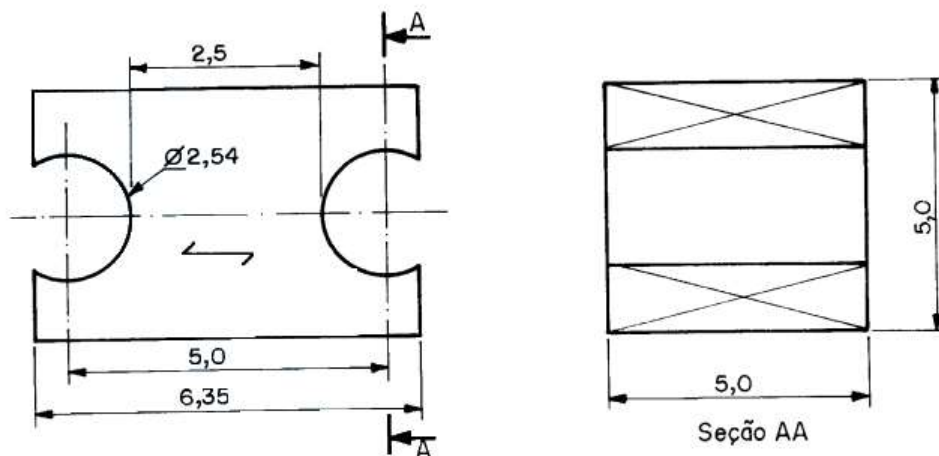
$F_{t90,máx}$ é a máxima força de tração normal (em N);

A_{t90} é a área inicial da seção transversal tracionada (em m²).

Os corpos de prova foram moldados de acordo com as dimensões ilustradas na Figura 3.32. É recomendado também realizar o ajuste entre a máquina de ensaio mecânico e o corpo

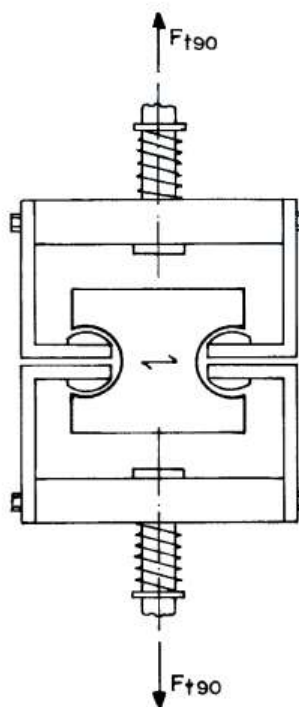
de prova com a ajuda de uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. O ensaio foi realizado com aplicação de um carregamento monotônico crescente a uma taxa de 2,5 MPa/min. O arranjo do ensaio está ilustrado na Figura 3.33, enquanto que o arranjo do ensaio realizado em laboratório está ilustrado na Figura 3.29. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.32– Corpo de prova para ensaio de tração normal às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.33– Dispositivo para ensaio de tração normal às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

3.6.5 Ensaio de compressão paralela às fibras

A determinação da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) ocorreu de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo calculada conforme Equação [3.9].

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx.}}{A} \quad [3.9]$$

Em que:

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras (em Pa);

$F_{c0,máx.}$ é a máxima força de compressão (em N);

A é a área inicial da seção transversal comprimida (em m²).

O módulo de elasticidade da madeira é obtido a partir dos dados relativos ao trecho linear do diagrama de tensão x deformação, sendo a inclinação da reta secante definida pelos pontos correspondentes a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, como mostra a Equação [3.10].

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad [3.10]$$

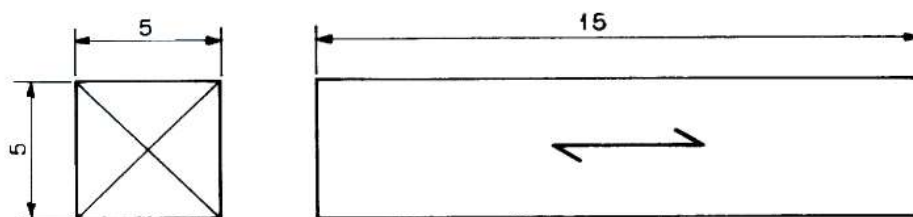
Em que:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ são as deformações específicas correspondentes a valores de 10% e 50% de resistência.

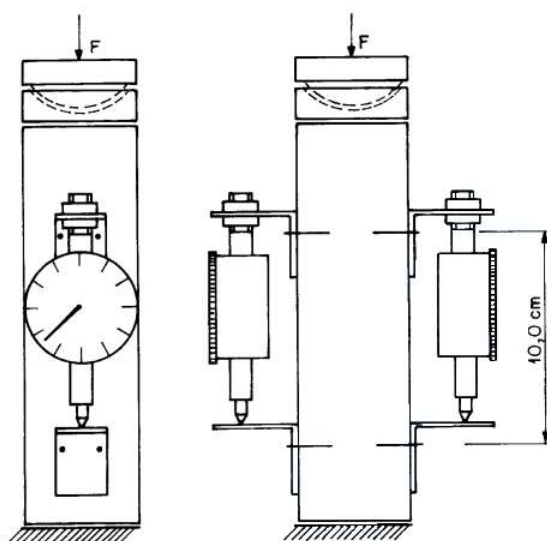
Os corpos de prova foram moldados de acordo com as dimensões ilustradas na Figura 3.34. Para determinação do módulo de elasticidade devem ser realizadas medidas de deformação em pelo menos duas faces opostas dos corpos de prova. Foram realizados dois ciclos de carga e descarga a uma taxa de carregamento de 10 MPa/min. O arranjo do ensaio está ilustrado na Figura 3.35, enquanto que o arranjo do ensaio realizado em laboratório está ilustrado pela Figura 3.36. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.34– Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras



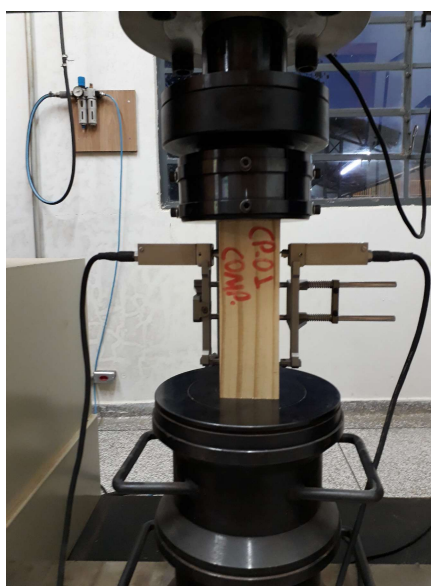
Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.35– Arranjo de ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: NBR 7190 (1997)

Figura 3.36– Ensaio de compressão



Fonte: O Autor (2018)

3.6.6 Ensaio de caracterização da umidade e da densidade

A umidade (U) e a densidade básica (ρ_{bas}) foram calculadas de acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo calculadas conforme a Equação [3.11] e a Equação [3.12], respectivamente.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad [3.11]$$

Em que:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

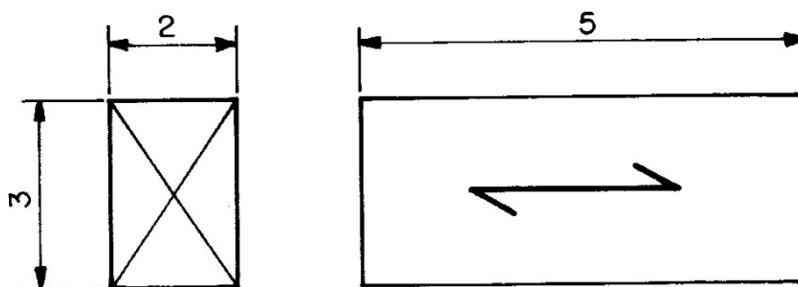
$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad [3.12]$$

Em que:

V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

Os corpos de prova devem apresentar seção retangular com dimensões de 2,0 cm por 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm, conforme Figura 3.37. Após a determinação da massa inicial (m_i) os corpos de prova foram levados para secagem em temperatura máxima de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Os resultados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 3.37– Corpo de prova para ensaio de umidade e densidade



Fonte: NBR 7190 (1997)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados, bem como as discussões referentes primeiramente aos ensaios de caracterização da madeira e posteriormente os resultados dos ensaios das vigas de MLC.

4.1 Ensaios de caracterização da madeira

Os valores médios e característicos dos ensaios de caracterização da madeira foram compilados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. No Apêndice A se encontram os dados completos referentes aos ensaios realizados, bem como os valores médios, desvio padrão, variância e coeficiente de variação.

Tabela 4.1– Propriedades físicas e mecânicas – valores médios

| Propriedades | Valores médios |
|---|------------------------|
| Teor de umidade | 10,63% |
| Densidade aparente (ρ_{ap}) | 0,50 g/cm ³ |
| Módulo de elasticidade na direção das fibras ($E_{c0,m}$) | 8.533,03 MPa |

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 4.2- Propriedades mecânicas - valores característicos

| Propriedades | Valores característicos (MPa) |
|---|-------------------------------|
| Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) | 27,72 |
| Resistência à tração normal às fibras na madeira ($f_{t90,k}$) | 1,76 |
| Resistência à tração normal às fibras na lâmina de cola ($f_{gt90,k}$) | 1,81 |
| Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na madeira ($f_{v0,k}$) | 7,53 |
| Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na lâmina de cola ($f_{gv,k}$) | 7,79 |

Fonte: O Autor (2018)

Observa-se que os valores de resistência à tração normal às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras, quando comparados aos valores obtidos na lâmina de cola, apresentam uma pequena variação de 2,84% para o ensaio de tração e de 3,45% para o ensaio de

cisalhamento, demonstrando a eficiência do adesivo na colagem das lamelas. Também se pode comparar esses valores com os resultados dos ensaios fornecidos pela empresa Rewood, conforme consta na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Propriedades físicas e mecânicas - Rewood

| Propriedades | Valores |
|--|------------------------|
| Densidade aparente (ρ_{ap}) | 0,55 g/cm ³ |
| Resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) | 57,60 MPa |
| Resistência característica à tração normal às fibras ($f_{t90,k}$) | 3,70 MPa |
| Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$) | 8,60 MPa |
| Módulo de elasticidade na direção das fibras ($E_{c0,m}$) | 9.200 MPa |

Fonte: Adaptado de Rewood

Observa-se que os valores de densidade, resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade, fornecidos pela fornecedora das vigas de MLC, apresentaram variações de 10%, 14% e 7,8%, respectivamente, em relação aos obtidos nesta pesquisa. Por outro lado, quando se compara a resistência à compressão paralela às fibras e a resistência à tração normal às fibras constatam-se variações de 107,8% e 110,2%, respectivamente.

No entanto, ao realizar a comparação dos resultados dos ensaios de caracterização com os valores de resistência fornecidos pelo Anexo E da norma ABNT NBR 7190 (1997), válidos para espécie *Pinus Taeda* e apresentados na Tabela 4.4, verifica-se que as variações nas resistências à compressão paralela às fibras e à tração normal às fibras diminuem para 12,12% e 11,36%, respectivamente. Portanto, mesmo sabendo que os valores fornecidos pela ABNT NBR 7190 (1997) estão corrigidos para a umidade de 12% e os valores deste trabalho se encontram na umidade de 10,63%, pode-se constatar a similaridade entre os resultados.

Tabela 4.4- Comparação dos resultados experimentais com a NBR 7190 (1997)

| Propriedades | O Autor (MPa) | NBR 7190 (MPa) |
|--|---------------|----------------|
| Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) | 27,72 | 31,08 |
| Resistência à tração normal às fibras (f_{t90}) | 1,76 | 1,96 |

Fonte: O Autor (2018)

Os valores característicos dispostos na Tabela 4.4 foram obtidos por meio da multiplicação dos valores médios de resistência – apresentados no Anexo E da ABNT NBR

7190:1997 – por 0,7. Essa correção foi realizada uma vez que no cálculo dos valores característicos deve-se respeitar o limite mínimo de 70% do valor médio obtido nos ensaios.

4.2 Ensaios nas vigas de MLC

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios como: o módulo de elasticidade, módulo de ruptura, a força de ruptura e o modo de ruptura das vigas de MLC.

4.2.1 Módulos de elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade foram calculados de acordo com as Equações [3.1] e [3.2]. Os resultados foram agrupados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5– Módulos de elasticidade (MOE) das vigas

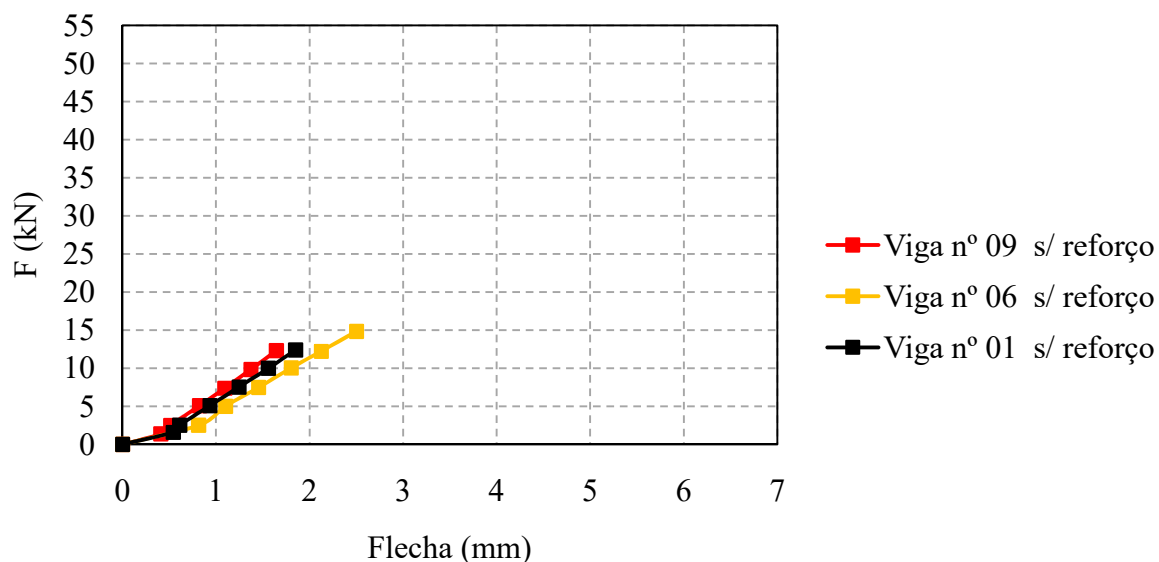
| Detalhamento | Viga | MOE [1] (MPa) | MOE [2] (MPa) | [1]/[2] |
|---------------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| Viga com entalhe e sem reforço | 1 | 5.881 | 9.402 | 0,63 |
| | 6 | 5.400 | 8.206 | 0,66 |
| | 9 | 6.560 | 11.226 | 0,58 |
| Média: | | 5.947 | 9.611 | |
| Viga com entalhe e com reforço em 90° | 3 | 7.274 | 13.527 | 0,54 |
| | 4 | 5.497 | 8.450 | 0,65 |
| | 13 | 6.521 | 11.145 | 0,59 |
| Média: | | 6.431 | 11.041 | |
| Viga com entalhe e com reforço em 45° | 12 | 6.248 | 10.351 | 0,60 |
| | 14 | 7.132 | 13.043 | 0,55 |
| | 15 | 6.529 | 11.140 | 0,59 |
| Média: | | 6.636 | 11.511 | |
| Viga sem entalhe e sem reforço | 5 | 7.689 | 15.066 | 0,51 |
| | 8 | 7.297 | 13.603 | 0,54 |
| | 11 | 4.775 | 6.849 | 0,70 |
| Média: | | 6.587 | 11.839 | |

Fonte: O Autor (2018)

Observa-se que os valores de MOE [2] diferem bastante do valor de MOE [1] chegando a alcançar aumento de 73,46% nas vigas com entalhes, ou seja, comprova que as deformações de cisalhamento influenciam no comportamento mecânico da viga. As Figuras

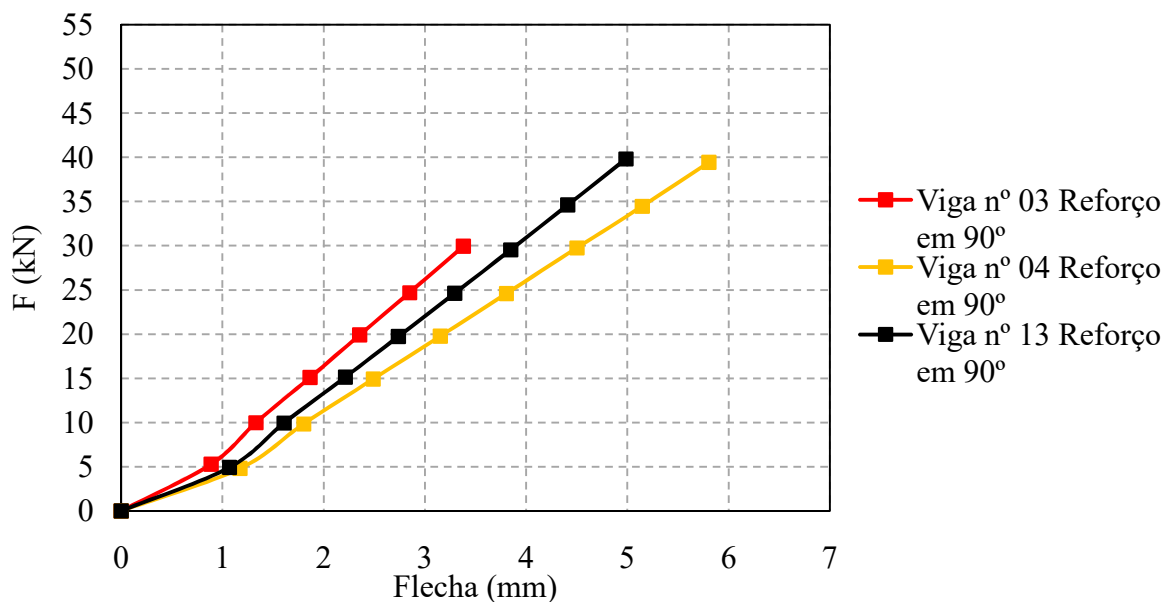
4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram as deflexões ocorridas durante o ensaio para determinação do MOE. Os dados completos para o cálculo do MOE se encontram no Apêndice C.

Figura 4.1- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e sem reforço



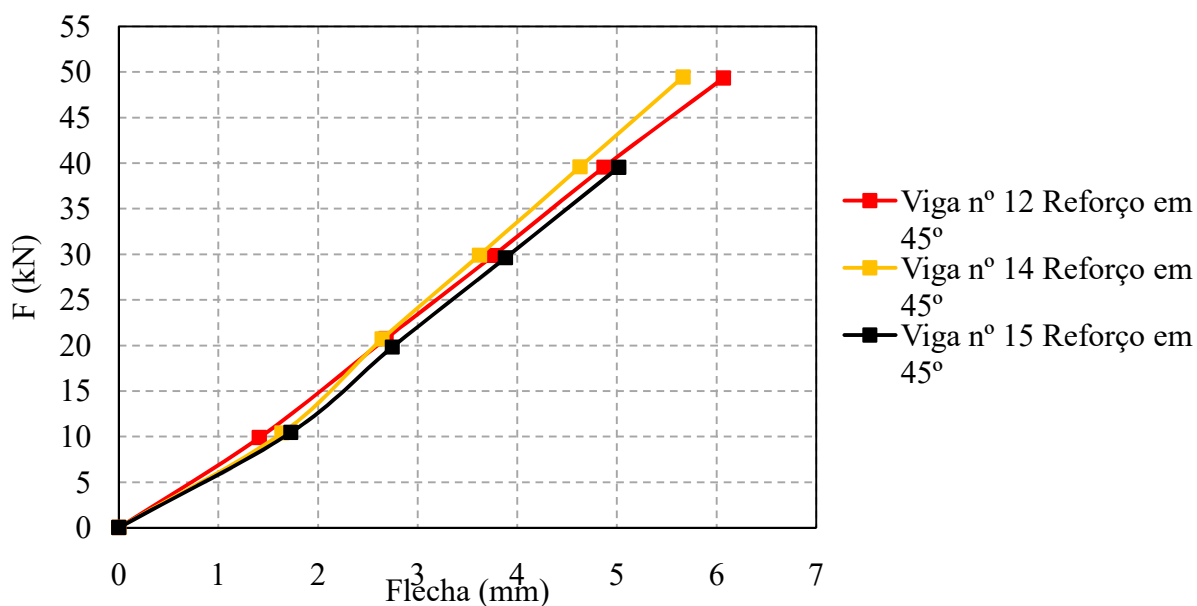
Fonte: O Autor (2018)

Figura 4.2- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 90°



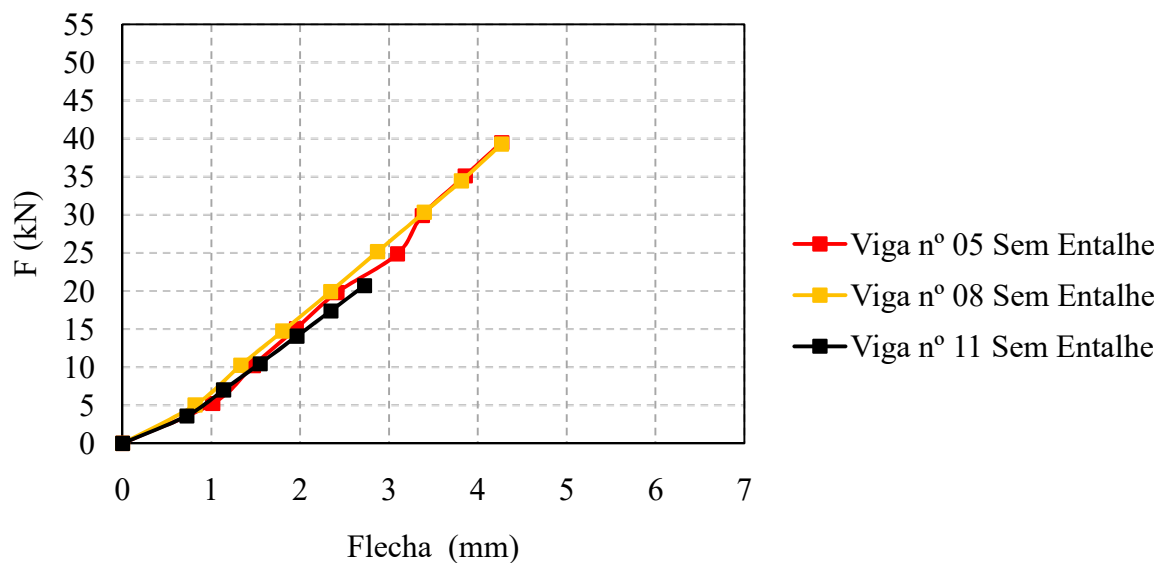
Fonte: O Autor (2018)

Figura 4.3- Comportamento das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 45°



Fonte: O Autor (2018)

Figura 4.4- Comportamento das vigas de MLC sem entalhe e sem reforço



Fonte: O Autor (2018)

4.2.2 Modos de Ruptura

Este item apresenta o modo de ruptura obtido para cada uma das vigas de MLC ensaiadas. Foram calculadas também as tensões de cisalhamento (τ), pela Equação [3.4], e os módulos de ruptura (MOR) de acordo com a Equação [3.3]. Os resultados obtidos foram dispostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6– Características na ruptura das vigas de MLC

| Detalhamento | Viga | FR (kN) | τ (MPa) | MOR (MPa) | Modo de ruptura |
|---------------------------------------|------|--------------|-----------------|--------------|--|
| Viga com entalhe e sem reforço | 1 | 45,8 | 1,1 | 15,2 | Ruptura teve início por tração normal às fibras da madeira, propagando-se por cisalhamento |
| | 6 | 51,5 | 1,3 | 17,1 | Ruptura teve início por tração normal às fibras da madeira, propagando-se por cisalhamento |
| | 9 | 57,2 | 1,4 | 19,0 | Ruptura teve início por tração normal às fibras da madeira, propagando-se por cisalhamento |
| Média: | | 51,5 | 1,3 | 17,1 | |
| Desvio-Padrão: | | 4,64 | 0,12 | 1,57 | |
| cov (%): | | 9,01% | 9,05% | 9,16% | |
| Viga com entalhe e com reforço em 90° | 3 | 104,1 | 2,6 | 34,5 | Ruptura teve início por tração normal às fibras da madeira, propagando-se por cisalhamento |
| | 4 | 104,7 | 2,6 | 34,7 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | 13 | 98,4 | 2,4 | 32,5 | Ruptura teve início por tração normal às fibras da madeira, propagando-se por cisalhamento |
| Média: | | 102,4 | 2,5 | 33,9 | |
| Desvio-Padrão: | | 2,85 | 0,08 | 1,02 | |
| cov (%): | | 2,78% | 2,98% | 3,00% | |

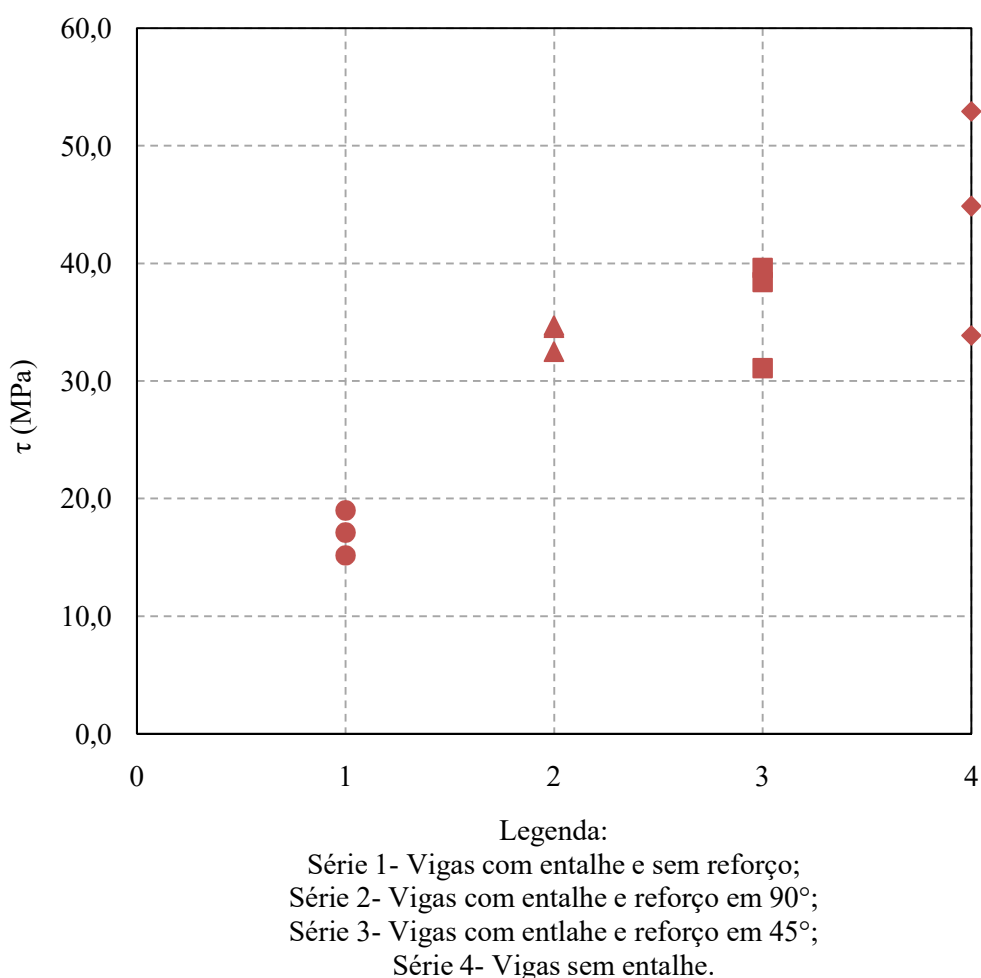
(continuação)

| Detalhamento | Viga | F_R (kN) | τ (MPa) | MOR (MPa) | Modo de ruptura |
|--|-------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Viga com entalhe e com reforço em 45° | 12 | 115,6 | 2,9 | 38,4 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | 14 | 93,8 | 2,3 | 31,1 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | 15 | 119,1 | 3,0 | 39,6 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | | Média: | 109,5 | 2,7 | 36,4 |
| | | Desvio-Padrão: | 11,19 | 0,28 | 3,77 |
| | | cov (%): | 10,22 % | 10,31 % | 10,36 % |
| Viga sem entalhe e sem reforço | 5 | 159,9 | 4,0 | 52,9 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | 8 | 135,1 | 3,4 | 44,9 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | 11 | 102,0 | 2,5 | 33,9 | Ruptura na última lâmina inferior |
| | | Média: | 132,3 | 3,3 | 43,9 |
| | | Desvio-Padrão: | 23,76 | 0,59 | 7,81 |
| | | cov (%): | 17,95 % | 17,88 % | 17,80 % |

Fonte: O Autor (2018)

De acordo com a Tabela 4.6 é possível verificar o ganho de resistência com a utilização do reforço com fibras de carbono. Quando se compara o valor do MOR obtido nos ensaios das vigas com entalhes e sem reforço com os resultados obtidos nas vigas com entalhes reforçadas com fibras de carbono, observam-se aumentos expressivos. Nesse caso, o aumento no MOR foi de 98% para os reforços aplicados formando-se o ângulo de 90° com a direção das fibras da madeira e de 113% para os reforços aplicados formando-se o ângulo de 45° com a direção das fibras da madeira. É evidenciado também um acréscimo de 7% do MOR quando se muda a orientação do reforço de 90° para 45°. Os dados do MOR foram compilados na Figura 4.5.

Figura 4.5– Módulo de ruptura para cada série de vigas de MLC



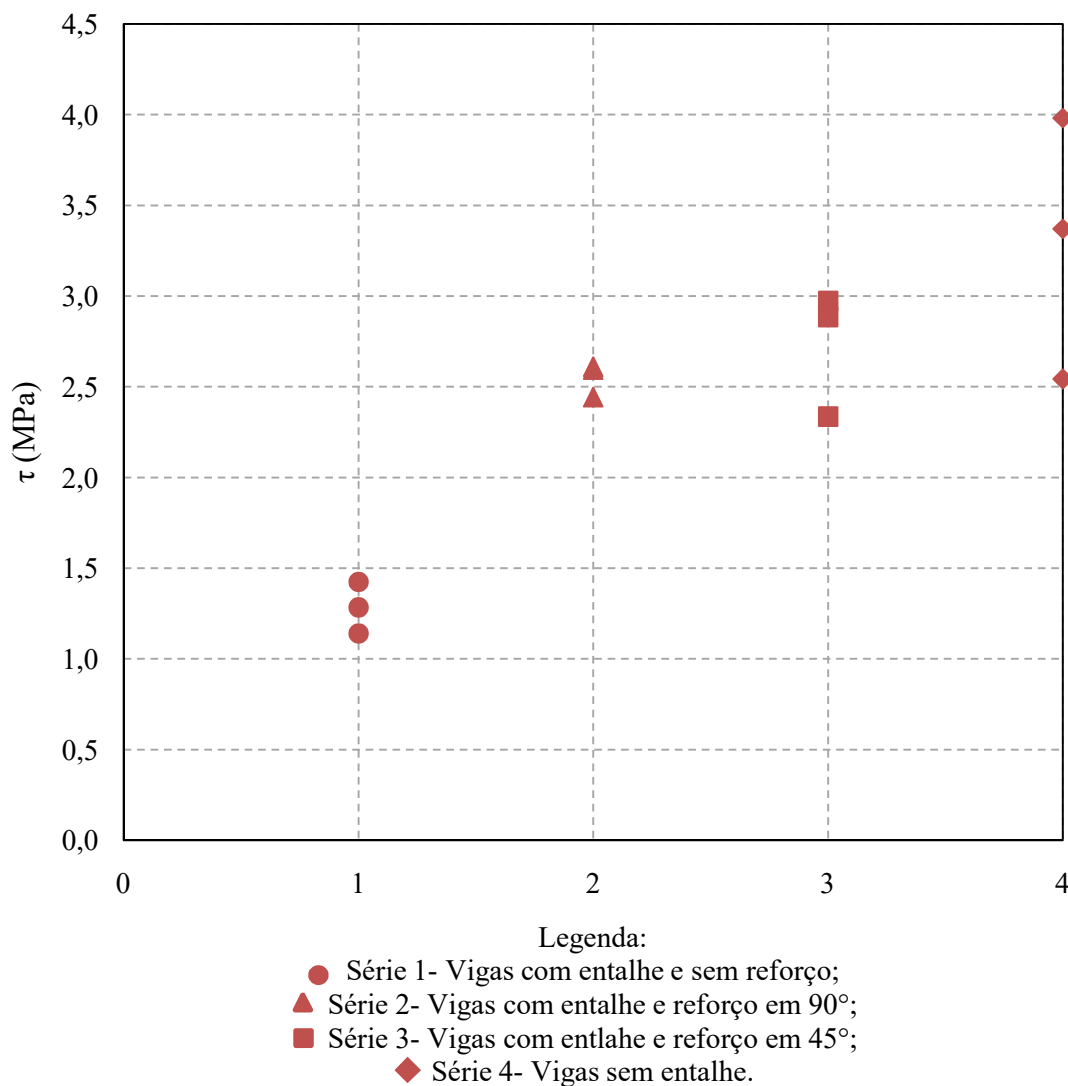
Fonte: O Autor (2018)

Outro aspecto importante diz respeito à diminuição da capacidade resistente das vigas com entalhes. Quando se compara o valor do MOR obtido para as vigas com entalhe e sem

reforço com aquele obtido para as vigas sem entalhe, observa-se que houve uma redução de 61% no valor do módulo de ruptura. Essa diminuição é amenizada com a aplicação de reforços externos na região do entalhe. Os resultados demonstram que houve uma redução de 23% no valor do MOR quando o reforço foi aplicado em 90° e uma diminuição de 17% quando o reforço foi aplicado em 45° com a direção das fibras da madeira. Dessa forma, conclui-se que a inclusão dos reforços externos ameniza os efeitos do entalhe.

Relativamente aos valores médios da resistência ao cisalhamento, quando se comparam os resultados referentes às vigas com entalhe e sem reforço com as vigas com reforço observam-se o acréscimo de 92% para as vigas com reforço em 90° e de 108% para as vigas com reforço em 45°. Pode-se constatar também a amenização do efeito do entalhe quando se aplica o reforço externo, já que a diminuição da resistência ao cisalhamento para as vigas sem reforço alcança 61%, enquanto para aquelas com reforço essa redução é de 24% e 18% para as vigas com reforço em 90° e 45°, respectivamente. Os dados de resistência ao cisalhamento foram compilados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Resistência ao cisalhamento para cada série de vigas de MLC



Fonte: O Autor (2018)

De acordo com a Figura 4.5 e a Tabela 4.6 pode-se verificar que a utilização do reforço promoveu uma redução na dispersão dos resultados. Para os casos sem reforço observou-se um coeficiente de variação de 9% e 18% referente à série de vigas com entalhes e série de vigas sem entalhes, respectivamente. Por outro lado, para as vigas com reforço constatou-se um coeficiente de variação de 3% e 10% referente à série de vigas com reforço em 90° e em 45°, respectivamente.

Analisando a série de vigas com reforço em 45° percebe-se que o coeficiente de variação de 10% atingiu o limite imposto pela própria madeira, visto que a ruptura da viga 14 desta série teve início por tração na *fingerjoint*. Retirando a viga 14 da análise desta série e considerando somente as vigas 12 e 15 tem-se que o coeficiente de variação é de

aproximadamente 1,5%, evidenciando que o reforço atenuou a dispersão dos resultados. Relatou-se também durante os ensaios que a aplicação do reforço proporcionou maiores deflexões ponto positivo visto que garante uma maior segurança estrutural visto que a ruptura é sinalizada por maiores deflexões.

4.2.2.1 Análise dos modos de ruptura para a série de vigas com entalhe e sem reforço

Para melhor compreensão dos modos de ruptura foi realizado um estudo analítico das equações propostas pelas normas nacionais e internacionais, descritas na seção 2.3.1. Primeiramente foram verificados os fatores similares e fatores distintos em cada equacionamento. Os dados foram compilados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Equacionamento da resistência ao cisalhamento segundo normativas

| Normas | Fatores Similares [1] | Fatores Distintos [2] |
|-----------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| NBR 7190 (1997) | $\frac{3 \times Vd}{2 \times b}$ | $\frac{h}{h1^2}$ |
| NDS (2015) | $\frac{3 \times Vr}{2 \times b}$ | $\frac{d^2}{dn^3}$ |
| CSA O86 (2010) | $\frac{3 \times Vr}{2 \times b}$ | $\frac{1}{\phi \times h \times kn}$ |
| EUROCODE (2004) | $\frac{3 \times Vd}{2 \times b}$ | $\frac{1}{hef \times kv}$ |
| DIN 1052 (2004) | $\frac{3 \times Vd}{2 \times b}$ | $\frac{1}{he \times kv}$ |

Fonte: O Autor (2018)

Em seguida foi encontrado o valor da resistência ao cisalhamento para cada uma das normativas, multiplicando-se os fatores similares [1] pelos fatores distintos [2], conforme Quadro 4.1. Os resultados foram compilados na Tabela 4.7.

Analisando-se os documentos normativos, verifica-se que a NDS (2015) é mais conservadora em relação à segurança quando comparada com as outras normas, conduzindo a resultados até 164% superiores quando comparados aos produzidos pela ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 4.7- Tensões de cisalhamento segundo normativas nacionais e internacionais

| Viga | NBR 7190 (1997) (MPa) | NDS (2015) (MPa) | CSA O86 (2010) (MPa) | EUROCODE (2004) (MPa) | DIN 1052 (2004) (MPa) |
|------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1 | 2,99 | 4,85 | 3,33 | 4,13 | 4,13 |
| 2 | 3,45 | 5,66 | 3,84 | 4,71 | 4,71 |
| 3 | 3,83 | 6,28 | 4,26 | 5,25 | 5,25 |

Fonte: O Autor (2018)

Por outro lado, sabendo-se que devido ao entalhe tem-se a ocorrência de tensões de tração normal às fibras da madeira e que os valores de resistência média ao cisalhamento e resistência média à tração normal às fibras da madeira, obtidos nos ensaios de caracterização da madeira são de 9,66 MPa e 2,58 MPa, pode-se concluir que o início da ruptura ocorreu por tração normal às fibras da madeira.

Deste modo, tem-se que para as Vigas 1, 6 e 9, a ruptura teve início no canto do entalhe propagando-se para o centro da viga. Nota-se que a ruptura teve início por tensão normal às fibras propagando-se por cisalhamento, conforme a Figura 4.7. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Figura 4.7– Modo de ruptura nas vigas de MLC com entalhe e sem reforço

Fonte: O Autor (2018)

4.2.2.2 Análise dos modos de ruptura para as séries de vigas com reforços em 90° e 45°

Para a série de vigas com reforço em 90°, observou-se que em apenas um caso houve rompimento e descolamento das fibras. Para a série de vigas com reforço em 90° verificou-se as seguintes rupturas:

Viga 3 – A ruptura teve início no canto do entalhe. Uma ruptura típica e predominante por cisalhamento, conforme Figura 4.8. Observa-se também o rompimento do reforço nas duas extremidades da viga. Pode-se constatar que o rompimento do reforço está localizado na aresta o que ocasiona o acúmulo de tensões e proporciona aparecimento de vazios que comprometem o reforço. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Viga 4 – A ruptura teve início na lamela inferior por tração e propagou-se por cisalhamento em direção aos apoios, conforme mostra a Figura 4.8. Observa-se que a ruptura aconteceu somente na viga enquanto que o reforço permaneceu intacto. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Viga 13 – A ruptura teve início no canto do entalhe. Trata-se de ruptura típica e predominante por cisalhamento, conforme Figura 4.8. Observa-se que a ruptura aconteceu somente na viga enquanto que o reforço permaneceu intacto. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Figura 4.8– Modo de ruptura das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 90°



Fonte: O Autor (2018)

Com o intuito de comparar os resultados obtidos em ensaios com as equações propostas pela norma DIN 1052 (2004), foram feitas duas verificações válidas para o reforço em 90° e para as dimensões do entalhe e de reforço utilizados nos ensaios. A primeira verificação foi feita na lâmina de cola, na qual foi determinado o valor de força cortante máxima na linha de cola ($V_{d,LC}$), por meio da combinação das Equações 2.18, 2.21 e 2.22. Posteriormente foi realizada a verificação no reforço, na qual se determinou a força cortante máxima no reforço ($V_{d,RE}$) por meio da combinação das Equações 2.18, 2.23 e 2.24. Os resultados foram compilados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8- Força cortante máxima na linha da cola e no reforço

| Viga | $V_{d,LC}$ (kN) | $V_{d,RE}$ (kN) |
|------|--------------------|--------------------|
| 3 | 13,97 | 64,40 |
| 4 | 14,10 | 65,96 |
| 13 | 14,06 | 65,40 |

Fonte: O Autor (2018)

De acordo com a Tabela 4.8 percebe-se que o menor valor para força cortante máxima se dá na linha da cola. Para este valor foi calculada a força de ruptura máxima ($F_{rup,d,LC}$), de

acordo com a DIN 1052 (2004), e comparou-se com as forças de rupturas verificadas nos ensaios ($F_{rup,EN}$). Os dados foram compilados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9–Comparativo entre as forças de ruptura

| Viga | $F_{rup,d LC}$ (kN) [1] | $F_{rup,EN}$ (kN) [2] | [2]/[1] |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 3 | 27,93 | 104,09 | 3,73 |
| 4 | 28,21 | 104,67 | 3,71 |
| 13 | 28,13 | 98,37 | 3,50 |
| Média | 28,09 | 102,38 | 3,64 |

Fonte: O Autor (2018)

Sabe-se que as equações propostas pela DIN 1052 (2004) conduzem a valores de projeto, portanto já era esperado que os resultados encontrados fossem inferiores aos resultados experimentais, uma vez que coeficientes de segurança estão embutidos no equacionamento normativo. Portanto, para esse caso específico de ensaio, supõe-se que o fator de minoração considerado pela norma DIN 1052 (2004) é em torno de 3,64.

Para a série de vigas com reforço em 45°, mesmo não tendo normativas para seu dimensionamento, observa-se que não houve caso de descolamento das fibras, bem como nenhum caso de rompimento das mesmas. A capacidade de carga das vigas foi limitada pela resistência da madeira ou pela resistência das emendas em *fingerjoints*. Para a série de vigas com reforço em 45° verificou-se as seguintes rupturas:

Vigas 12 – A ruptura teve início na lamela inferior por tração e propagou-se por cisalhamento, conforme Figura 4.9. Observa-se que a ruptura aconteceu somente na viga enquanto que o reforço permaneceu intacto. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Viga 14 e 15 – A ruptura teve início por tração na emenda *fingerjoint* localizada na lamela inferior e propagou-se por cisalhamento, conforme Figura 4.9. Observa-se que a ruptura aconteceu somente na viga, enquanto que o reforço permaneceu intacto. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Figura 4.9– Modo de ruptura das vigas de MLC com entalhe e com reforço em 45°



Fonte: O Autor (2018)

4.2.2.3 Análise dos modos de ruptura para a série de vigas sem entalhe e sem reforço

Para o caso das vigas com entalhe e sem reforço, para melhor compreensão dos modos de ruptura foi calculada a resistência ao cisalhamento pela norma ANBT NBR 7190 (1997), conforme equações descritas na seção 2.3.1. Os dados foram compilados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10- Tensão de cisalhamento para a série de vigas sem entalhes

| Viga | NBR 7190 (1997) (MPa) |
|------|--------------------------|
| 5 | 3,98 |
| 8 | 3,37 |
| 11 | 2,54 |

Fonte: O Autor (2018)

Sabendo-se que as tensões de tração normal às fibras da madeira têm menor influência no comportamento dessas vigas e ainda que a resistência ao cisalhamento obtida pelos ensaios de caracterização é de 9,66 MPa, pode-se concluir que a ruptura teve início por tração na lamela inferior das vigas de MLC, tanto na madeira como nas emendas *fingerjoints*. Portanto, para a série de vigas sem entalhe e sem reforço verificaram-se as seguintes rupturas:

Viga 5 - A ruptura teve início na lamela inferior por tração e propagou-se por cisalhamento e compressão, conforme Figura 4.10. Observa-se também o esmagamento na região do apoio. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Viga 8 - A ruptura teve início por tração na emenda *fingerjoint* localizada na lamela inferior e propagou-se por cisalhamento e compressão, conforme Figura 4.10. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Viga 11 - A ruptura teve início na lamela inferior por tração e propagou-se por cisalhamento, conforme Figura 4.10. O mapeamento completo do modo de ruptura encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Figura 4.10– Modo de ruptura das vigas de MLC sem entalhes



Fonte: O Autor (2018)

Pela complementação da descrição dos modos de ruptura, bem como pelas figuras apresentadas, pode-se constatar que houve uma mudança do modo de ruptura das vigas visto que na série das vigas com entalhe e sem reforço houve uma ruptura com início por tração normal às fibras, propagando-se por cisalhamento, enquanto que para as vigas com reforço em 45° as rupturas tiveram início na última lamela por tração e propagou-se por

cisalhamento. Nota-se também que houve poucos casos de descolamento das fibras de carbono, mostrando a eficiência do processo de colagem do reforço.

4.2.3 Comparação com os resultados de Jockwer (2012)

Jockwer (2012) realizou ensaios de três pontos com uma distância de 1.150 mm entre o centro de aplicação de carga e os apoios. Para o reforço, utilizou a fibra de carbono SikaWrap 230C/45. Além disso, a distância entre o centro de aplicação de carga e os apoios foi de 1.000 mm. Algumas outras peculiaridades na comparação dos dois trabalhos estão dispostas na Tabela 4.11.

Tabela 4.1- Comparação entre as configurações geométricas

| Jockwer (2012) | | Autor (2018) | |
|----------------------|---------|----------------------|---------|
| Parâmetros | Valor | Parâmetros | Valor |
| α | 0,65 | α | 0,62 |
| β | 0,48 | β | 0,4 |
| base (mm) | 90 | base (mm) | 100,06 |
| altura (mm) | 315 | altura (mm) | 300,5 |
| ângulo | 45°/90° | ângulo | 45°/90° |
| largura reforço (mm) | 50 | Largura reforço (mm) | 50 |

Fonte: O Autor (2018)

Mesmo com algumas diferenças entre as dimensões adotadas, os resultados dos ensaios se aproximaram significativamente. Para melhor comparação foram calculados os valores médios das tensões de cisalhamento, em MPa, para cada série. Os dados foram compilados na Tabela 4.12.

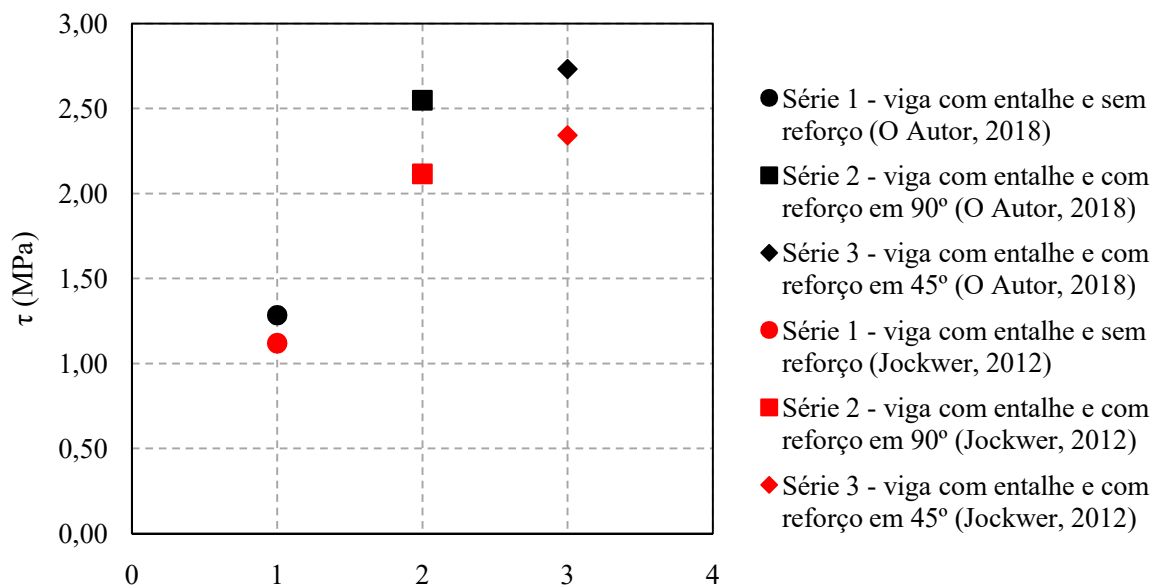
Tabela 4.2- Comparativo entre as tensões de cisalhamento

| Descrição | O Autor (2018) (MPa) | Jockwer (2012) (MPa) | [1]/[2] |
|---|----------------------------|----------------------------|---------|
| | [1] | [2] | |
| Série 1 - viga com entalhe e sem reforço | 1,28 | 1,12 | 15% |
| Série 2 - viga com entalhe e com reforço em 90° | 2,55 | 2,12 | 20% |
| Série 3 - viga com entalhe e com reforço em 45° | 2,73 | 2,34 | 17% |

Fonte: O Autor (2018)

De acordo com a Tabela 4.13 constata-se que os resultados obtidos neste trabalho foram superiores ao obtidos por Jockwer (2012), alcançando as diferenças de 15%, 20% e 17% para os casos: sem reforço, reforço em 90° e reforço em 45°, respectivamente. O comparativo entre esses resultados pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.11- Comparativo entre as tensões de cisalhamento



Fonte: O Autor (2018)

5. CONCLUSÕES

Considerado um material natural e renovável, a madeira apresenta boas propriedades mecânicas, o que a coloca como um dos materiais mais promissores no âmbito das construções sustentáveis. Somado a isso, o uso da tecnologia de MLC, aliado à utilização de madeira proveniente de reflorestamento, valoriza ainda mais o material.

Uma das áreas pouco estudadas no âmbito do emprego da MLC se encontra no caso específico da presença de entalhes localizados na região do apoio, na parte tracionada da peça. Por se tratar de uma mudança brusca de direção, tem-se uma concentração de tensões no canto do entalhe que deve ser levada em consideração.

Essa situação é tratada superficialmente pela norma brasileira ABNT NBR 7190:1997, que coloca limites absolutos na dimensão do entalhe, além de não tratar de forma clara qualquer tipo de reforço na região. Em contrapartida, a norma alemã DIN 1052 (2004) traz explicitamente os critérios para o dimensionamento do entalhe, bem como de possíveis reforços adicionados na região.

Diante desse contexto foi desenvolvido um programa experimental que buscou compreender o comportamento mecânico dos entalhes em vigas de MLC e comparar os resultados quando aplicados reforços de fibras de carbono em 45° e 90°, na região dos apoios. Foram ensaiadas 12 vigas divididas em quatro séries: com entalhe e sem reforço; com entalhe e com reforço em 90°; com entalhe e com reforço em 45° e sem entalhe. As vigas de MLC foram submetidas ao ensaio de flexão com a força aplicada na posição central.

Confrontando-se os resultados médios obtidos, verificou-se que houve um acréscimo no MOR de 98% e 113% para as vigas com reforço em 90° e 45°, respectivamente, em relação ao MOR determinado para as vigas com entalhes e sem reforço. Também foi possível verificar, para o caso específico das vigas estudadas, o efeito do entalhe na diminuição da capacidade de carga da peça, chegando a uma redução de 61%. Essa diminuição é amenizada quando utilizado o reforço de fibras de carbono, conduzindo a uma atenuação de 23% e 17% para as vigas com reforços em 90° e 45°, respectivamente.

Nota-se que o reforço com fibras de carbono não somente aumentou a capacidade resistente das vigas, como também promoveu alteração do seu comportamento na ruptura, passando de uma ruptura frágil por cisalhamento, com pequenas deflexões, para uma ruptura marcada por maiores deflexões, tendo início por tração na lamela inferior da viga de MLC e propagando-se posteriormente por cisalhamento.

Adicionalmente, foram realizadas as verificações contidas na norma DIN 1052 (2004) para o reforço com fibras de carbono em 90°. Foi constatado que o resultado para a força de ruptura obtida em ensaio foi maior do que a força de ruptura de projeto obtida pelas equações normativas. Isso já esperado, uma vez que coeficientes de segurança estão embutidos no equacionamento normativo. Portanto, para esse caso específico de ensaio, supõe-se que o fator de minoração considerado pela norma DIN 1052 (2004) foi em torno de 3,6.

Por fim, foram comparados os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Jockwer (2012) e, mesmo com algumas singularidades de cada trabalho, pôde-se observar a semelhança dos resultados, visto que a máxima diferença observada foi de 20% para o caso de reforço em 90°. Observou-se também a elevação do MOR com a aplicação do reforço.

A partir das constatações e resultados apresentados ao longo deste trabalho, conclui-se que para uma maior disseminação da técnica, devem-se compreender todas as peculiaridades as quais as peças de MLC serão submetidas na estrutura da edificação. Para o caso específico de entalhes na região tracionada da peça, a alta concentração de tensões no canto do entalhe influencia diretamente na resistência da peça. O reforço apresentado neste trabalho evidencia que é possível alcançar aumento significativo na capacidade de carga, bem como promover uma mudança no comportamento mecânico da peça, amenizando os efeitos do entalhe.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se a realização de estudos com simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos, para o tipo de reforço avaliado nesta pesquisa, bem como ensaios experimentais substituindo-se as fibras de carbono por fibras de vidro e também parafusos, de modo a diminuir os custos da execução desta técnica.

REFERÊNCIAS

ARCHDAILY. Casa em Shinkawa. Disponível em <https://www.archdaily.com.br/br/788934/casa-em-shinkawa-yoshichika-takagi/5670c532e58ecee9c00002a1-house-in-shinkawa-yoshichika-takagi-photo>>. Acesso em 10 mai. 2018.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS FOR WOOD PRODUCTS. **ANSI/APA A190.1**: Structural glued laminates timber. Tacoma, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-05a**: Standard tests methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia, 2005.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **NDS**: National design specification for wood construction. Leesburg, VA., 2015.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **APA**: Evaluation of CheckSize in Glued Laminated Timber Beams. Technical Note N° EWS R475E. Tacoma, 2007.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **APA**: Glulam Product Guide. Form N° EWS X440D. Tacoma, 2008.

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

AGUAYERE, A; VIGIL, JASON. **Structural Wood Design**. 2ª Edição. Boca Raton, Florida. Taylor e Francis Group, 2017.

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

ALLEN, E; IANO, J. **Fundamentos da engenharia de edificações: materiais e métodos**. 5^o Edição. Porto Alegre. Bookman Ltda, 2013.

BARRACUDA. Advanced Composites. Disponível em:
<<http://www.barracudacomposites.com.br/site/produtos/>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

BAUNETZ. Zimmern im Holzbau. Disponível em
<https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Schweizer_Ausbildungszentrum_von_Peter_Moor_Architekten_5247229.html>. Acesso em 10 mai. 2018.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BORRI, A. Reinforcement of wood with natural fibers. **Composites: Part B: engineering**, v.53 B, p. 1-8, oct, 2013.

CALLISTER, W. D. Jr, RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An introduction**. 8^o Edition, John Wiley& Sons, 2009.

CANADIAN STANDARTS ASSOCIATION. **CSA O86: Engineering design in wood**. Ontario, 2010.

CANADIAN WOOD COUNCIL. **Introduction to Wood Design**: a learning guide to complement the Wood Design Manual. Ottawa, 2011.

CARDOSO, S. G. **Estudo das propriedades mecânicas e dos mecanismos de fratura de fibras sintéticas do tipo náilon e poliéster em tecidos de engenharia**. 2009. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras**. 2004. 405 f. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CARTA DE VENEZA. **Carta internacional sobre a conservação e o restauro dos monumentos e dos sítios**. (1964). Veneza.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DAGHER, H. J. Advanced engineered wood composites for use in civil engineering. In: **Advanced civil infrastructure materials: Science, mechanics and applications**. Wood head Publishing Limited. Cambridge, 2006. Chapter 6, p. 235-267.

DAGHER, H. J. et al. Variable pre-stressing of FRP – reinforced glulam beams: methodology and behavior. In: WORD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 11., 2010. Trentino, 2010.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1052: Entwurf, Berechnung and Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau**. Berlin, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5 (EN 1995 1-1): Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

FALK, R. H; COLLING, F. Laminating effects in glued-laminated timber beams. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v. 121, n.12, p.1857-1863, dec. 1995.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FREAS, A. D. **Factors affecting strength and design principles of glued laminated construction**. USDA Forest Products Laboratory. Report N° 2061, 1956.

FREAS, A.D; SELBO, M. L. **Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Members**. USDA Forest Products Laboratory. Technical Bulletin. N° 1069, 1954.

GENTRY, T. R. Performance of glued-laminated timber with FRP shear and flexural reinforcement. **Journal of Composites for Construction**, ASCE, v.15, n.5, p.861-870, oct. 2011.

GESUALDO, F. A. R.; SOUZA JR, D. A. **Entalhes em seções transversais de vigas de madeira por meio de abordagem numérica**. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, julho de 2008, Londrina, 2008.

HENRIQUES DE JESUS, J. M. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharias de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

HULL, D. **An introduction to composite materials**. 2° Edition. Cambridge. Cambridge University Press, 1995.

JOCKWER, R. **Report: Short Term Scientific Mission at Linnaeus University**. 17p. EMPA, Sweden, oct, 2012.

JOCKWER, R. **Structural behavior o glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches**. 166p. ETH Zurich, Zurich, 2014.

JOCKWER, R. et al. Load-carrying capacity and failure modes of glulam beams with reinforced notches. **European Journal of Wood and Wood Products**. v.74, p.481-482, 2015.

JUVANDES, L. F. P. **Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2002.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CRFP”**. 1999. 396 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1999.

JUVANDES, L. F. P. et al. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão**. Parte I. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 1996.

LAHR, F. A. R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. 1983. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

LAMANNA, A. J. et al. **Feasibility Investigation into Strengthening of Timber Bridge Stringers**. Geotechnical and Structures Laboratory. Report N° ERDC/GSL TR-07-14, 2007.

MACÊDO, A.N. **Fadiga de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio**. 1996. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design**. 3° Edition. Boca Raton. Taylor & Francis Group, 2008.

MALO, K. A; ANGST, V. Glued Laminated Timber. In: **Handbook 1 – Timber Structures**. Education Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMTIS), chapter 5, p.48-62, 2008.

MANTILLA CARRASCO, E. V. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**, 1989. 347 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. In: **Seminário Ciências Exatas e Tecnológicas**. Londrina, v. 27, n. 2, p. 163-174, 2006.

MOODY, R. C. et al. Glued structural members. In: **Wood Handbook – Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. Gen. Tech. Rep. FLP-GTR-113, chapter 11, 24 p.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R. Glued-laminated timber. In: **Engineered wood products: A guide for specifiers, designers and users**. Madison, WI: PFS Research Foundation, chapter 1, 39 p, 1997.

PFEIL, W. PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6ª Edição. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2003.

PORTEOUS, J; KERMANI, A. **Structural Timber Design: to Eurocode 5**. 1ª Edition, Malden. Blackwell Publishing Inc, 2007.

RAMMER, D. R; MCLEAN D. I. **Shear Strength of Wood Beams**. In: National Conference on Wood Transportation Structures, Madison, WI. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-94, p. 168, 1996.

RAMMER, D. R; SOLTIS, L. A. **Experimental Shear Strength of Glued-Laminated Beams**. USDA Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-527, 1994.

ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífice Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

S&P Clever Reinforcement Brasil. Disponível em: <http://www.sp-reinforcement.com.br/>. Acesso em: 25 fev. 2017.

SMITH, I. et al. Reliability analysis for critical reaction forces of lumber members with an end notch. **Canadian Journal Civil Engineering**, v.23, pg. 202-210, 1996.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estrutura de concreto**. 1º edição. São Paulo. Pini, 1998.

STARK, N. M. et al. Wood-Based Composite Materials. In: **Wood Handbook – Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190, chapter 11, 28 p.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

YEH, B. et al. Shear strength of structural glued laminated timber based on full-size flexure tests. In: **PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE**, 1999, Rotorua, New Zealand. **Proceedings...Rotorua, 1999**. p. 199-206.

ZANGIÁCOMO, A.L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

WESTERN ARCHRIB. Disponível em:

<http://www.westernarchrib.com/projects/credit_valley_hospital.html>. Acesso em 10 mai. 2018.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Tabela A.1 – Umidade

| CP | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | Umidade (%) |
|-----|-------------------|-----------------|-------------|
| 1A | 16,4498 | 14,6313 | 11,05 |
| 1B | 16,6833 | 14,8594 | 10,93 |
| 2A | 13,9287 | 12,6004 | 9,54 |
| 2B | 13,0404 | 11,8134 | 9,41 |
| 3A | 18,0326 | 15,9983 | 11,28 |
| 3B | 17,6771 | 15,9083 | 10,01 |
| 4A | 19,4999 | 17,2744 | 11,41 |
| 4B | 19,2832 | 17,0094 | 11,79 |
| 5A | 16,6512 | 14,7586 | 11,37 |
| 5B | 16,3272 | 14,4790 | 11,32 |
| 6A | 12,8752 | 11,5422 | 10,35 |
| 6B | 12,0223 | 10,6614 | 11,32 |
| 7A | 15,2595 | 13,7467 | 9,91 |
| 7B | 15,0458 | 13,5431 | 9,99 |
| 8A | 13,8460 | 12,3879 | 10,53 |
| 8B | 13,6656 | 12,2198 | 10,58 |
| 9A | 16,2478 | 14,4519 | 11,05 |
| 9B | 15,6642 | 13,9432 | 10,99 |
| 10A | 16,9829 | 15,0725 | 11,25 |
| 10B | 16,8498 | 14,9186 | 11,46 |
| 11A | 14,6046 | 13,1012 | 10,29 |
| 11B | 13,8818 | 12,4993 | 9,96 |
| 12A | 14,7588 | 13,2640 | 10,13 |
| 12B | 15,0750 | 13,4521 | 10,77 |
| 13A | 16,0683 | 14,4363 | 10,16 |
| 13B | 16,6074 | 14,9030 | 10,26 |
| 14A | 14,5795 | 13,0911 | 10,21 |
| 14B | 14,5562 | 13,0657 | 10,24 |
| 15A | 12,6146 | 11,2663 | 10,69 |
| 15B | 12,6847 | 11,3440 | 10,57 |

Média: 10,63
 Variância: 0,37
 Desvio-Padrão: 0,61
 cov(%): 5,74%

Tabela A.2 – Densidade aparente

| CP | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Volume (cm ³) | Massa (g) | Densidade (g/cm ³) |
|-----|--------------|-------------|------------------|---------------------------|-----------|--------------------------------|
| 1A | 20,10 | 30,25 | 50,75 | 30,86 | 16,4498 | 0,5331 |
| 1B | 20,05 | 30,70 | 50,75 | 31,24 | 16,6833 | 0,5341 |
| 2A | 20,00 | 30,25 | 50,70 | 30,67 | 13,9287 | 0,4541 |
| 2B | 19,85 | 30,30 | 50,10 | 30,13 | 13,0404 | 0,4328 |
| 3A | 19,95 | 31,15 | 50,60 | 31,44 | 18,0326 | 0,5735 |
| 3B | 19,90 | 31,45 | 50,70 | 31,73 | 17,6771 | 0,5571 |
| 4A | 20,20 | 30,50 | 50,50 | 31,11 | 19,4999 | 0,6267 |
| 4B | 20,02 | 30,20 | 50,55 | 30,56 | 19,2832 | 0,6309 |
| 5A | 20,30 | 30,35 | 51,00 | 31,42 | 16,6512 | 0,5299 |
| 5B | 20,25 | 30,10 | 50,75 | 30,93 | 16,3272 | 0,5278 |
| 6A | 20,15 | 29,70 | 50,75 | 30,37 | 12,8752 | 0,4239 |
| 6B | 20,20 | 30,15 | 50,55 | 30,79 | 12,0223 | 0,3905 |
| 7A | 20,45 | 30,25 | 50,50 | 31,24 | 15,2595 | 0,4885 |
| 7B | 20,30 | 30,00 | 50,90 | 31,00 | 15,0458 | 0,4854 |
| 8A | 20,10 | 30,10 | 50,80 | 30,73 | 13,8460 | 0,4505 |
| 8B | 19,95 | 30,00 | 50,35 | 30,13 | 13,6656 | 0,4535 |
| 9A | 20,35 | 29,60 | 51,50 | 31,02 | 16,2478 | 0,5238 |
| 9B | 20,30 | 29,45 | 50,35 | 30,10 | 15,6642 | 0,5204 |
| 10A | 19,60 | 31,05 | 51,85 | 31,55 | 16,9829 | 0,5382 |
| 10B | 19,90 | 31,10 | 50,85 | 31,47 | 16,8498 | 0,5354 |
| 11A | 20,15 | 30,00 | 49,60 | 29,98 | 14,6046 | 0,4871 |
| 11B | 20,10 | 31,25 | 49,70 | 31,22 | 13,8818 | 0,4447 |
| 12A | 20,30 | 29,00 | 50,55 | 29,76 | 14,7588 | 0,4959 |
| 12B | 20,50 | 29,40 | 50,75 | 30,59 | 15,0750 | 0,4929 |
| 13A | 20,20 | 30,20 | 51,00 | 31,11 | 16,0683 | 0,5165 |
| 13B | 20,25 | 30,45 | 51,00 | 31,45 | 16,6074 | 0,5281 |
| 14A | 19,60 | 29,70 | 50,40 | 29,34 | 14,5795 | 0,4969 |
| 14B | 19,90 | 30,05 | 50,30 | 30,08 | 14,5562 | 0,4839 |
| 15A | 20,25 | 29,90 | 50,25 | 30,43 | 12,6146 | 0,4146 |
| 15B | 20,25 | 30,25 | 50,35 | 30,84 | 12,6847 | 0,4113 |

Média: 0,50

Variância: 0,003

Desvio-Padrão: 0,06

cov (%): 11,48%

Tabela A.3 – Resistência à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade

| CP | Lado A (mm) | Lado B (mm) | Comprimento (mm) | Força (kN) | Tensão (MPa) | Módulo Elasticidade (MPa) |
|-----|-------------|-------------|------------------|------------|--------------|---------------------------|
| 1A | 50,65 | 50,55 | 150,20 | 85,13 | 33,25 | 7.328,00 |
| 1B | 50,60 | 50,45 | 150,15 | 89,41 | 35,02 | 7.970,00 |
| 2A | 50,15 | 50,10 | 150,25 | 87,49 | 34,82 | 8.820,00 |
| 2B | 50,50 | 50,45 | 150,25 | 81,44 | 31,97 | 6.813,00 |
| 3A | 50,05 | 50,10 | 150,50 | 96,76 | 38,59 | 9.382,00 |
| 3B | 50,85 | 50,50 | 150,30 | 100,84 | 39,27 | 8.432,00 |
| 4A | 50,15 | 50,35 | 150,65 | 75,28 | 29,81 | 6.172,00 |
| 4B | 50,25 | 50,65 | 150,45 | 61,53 | 24,18 | 4.362,00 |
| 5A | 50,15 | 50,00 | 150,50 | 105,14 | 41,93 | 10.083,00 |
| 5B | 50,25 | 50,65 | 149,65 | 100,69 | 39,56 | 11.591,00 |
| 6A | 50,15 | 50,20 | 151,15 | 101,45 | 40,30 | 8.809,00 |
| 6B | 50,45 | 50,40 | 150,25 | 91,12 | 35,84 | 9.829,00 |
| 7A | 50,15 | 50,40 | 150,55 | 97,87 | 38,72 | 10.333,00 |
| 7B | 50,60 | 50,95 | 149,50 | 79,59 | 30,87 | 6.605,00 |
| 8A | 50,65 | 50,85 | 150,00 | 109,37 | 42,47 | 10.784,00 |
| 8B | 50,20 | 50,25 | 150,30 | 83,51 | 33,10 | 8.166,00 |
| 9A | 50,05 | 50,10 | 150,25 | 112,48 | 44,86 | 11.400,00 |
| 9B | 50,45 | 50,55 | 150,30 | 110,60 | 43,37 | 13.165,00 |
| 10A | 50,00 | 50,10 | 150,45 | 91,16 | 36,39 | 9.770,00 |
| 10B | 50,00 | 50,50 | 150,50 | 65,75 | 26,01 | 4.784,00 |
| 11A | 50,40 | 50,15 | 150,60 | 74,33 | 29,41 | 6.197,00 |
| 11B | 50,90 | 50,45 | 150,50 | 73,71 | 28,70 | 6.448,00 |
| 12A | 50,25 | 50,60 | 150,45 | 72,88 | 28,66 | 6.581,00 |
| 12B | 50,70 | 50,55 | 150,60 | 91,20 | 35,58 | 8.604,00 |
| 13A | 50,20 | 50,55 | 149,70 | 107,70 | 42,44 | 11.079,00 |
| 13B | 50,55 | 50,95 | 151,10 | 92,65 | 35,97 | 7.560,00 |
| 14A | 50,45 | 50,10 | 150,80 | 91,79 | 36,32 | 9.486,00 |
| 14B | 50,45 | 50,45 | 150,30 | 81,58 | 32,05 | 7.922,00 |
| 15A | 50,45 | 50,95 | 150,70 | 70,91 | 27,59 | 5.482,00 |
| 15B | 50,35 | 50,50 | 150,45 | 117,26 | 46,12 | 12.034,00 |

| | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------------|
| Média: | 90,02 | 35,44 | 8.533,03 |
| Variância: | 206,13 | 32,54 | 4.777.886,10 |
| Desvio-Padrão: | 14,36 | 5,70 | 2.185,84 |
| cov (%): | 15,95% | 16,10% | 25,62% |
| Valor Característico: | 69,88 | 27,72 | - |

Tabela A.4 – Resistência à tração normal às fibras na madeira

| CP | Espessura (mm) | Largura (mm) | Força (kN) | Tensão (MPa) |
|-----|----------------|--------------|------------|--------------|
| 1A | 24,50 | 49,90 | 3,27 | 2,70 |
| 1B | 25,45 | 50,35 | 3,08 | 2,40 |
| 2A | 24,65 | 50,60 | 2,96 | 2,38 |
| 2B | 24,00 | 50,35 | 1,64 | 1,36 |
| 3A | 23,80 | 50,15 | 3,74 | 3,14 |
| 3B | 24,00 | 50,50 | 2,99 | 2,46 |
| 4A | 24,40 | 50,30 | 4,63 | 3,77 |
| 4B | 24,50 | 50,50 | 4,36 | 3,52 |
| 5A | 24,40 | 50,30 | 4,58 | 3,73 |
| 5B | 24,80 | 50,35 | 3,97 | 3,18 |
| 6A | 24,70 | 50,65 | 2,68 | 2,14 |
| 6B | 24,25 | 50,60 | 3,20 | 2,61 |
| 7A | 25,45 | 50,10 | 4,25 | 3,33 |
| 7B | 24,90 | 50,40 | 3,57 | 2,85 |
| 8A | 24,60 | 50,50 | 2,62 | 2,11 |
| 8B | 24,55 | 50,10 | 2,43 | 1,98 |
| 9A | 24,30 | 50,40 | 1,39 | 1,14 |
| 9B | 24,70 | 50,60 | 2,97 | 2,37 |
| 10A | 25,00 | 50,50 | 3,89 | 3,08 |
| 10B | 24,50 | 50,65 | 3,13 | 2,52 |
| 11A | 24,15 | 50,60 | 2,38 | 1,94 |
| 11B | 26,10 | 50,35 | 2,90 | 2,21 |
| 12A | 23,20 | 50,55 | 2,68 | 2,29 |
| 12B | 26,15 | 50,55 | 3,24 | 2,45 |
| 13A | 24,95 | 50,25 | 3,96 | 3,16 |
| 13B | 23,95 | 50,50 | 3,76 | 3,10 |
| 14A | 25,25 | 50,20 | 2,10 | 1,65 |
| 14B | 25,00 | 50,50 | 2,54 | 2,01 |
| 15A | 24,85 | 50,20 | 3,89 | 3,12 |
| 15B | 23,90 | 50,50 | 3,12 | 2,59 |

| | | |
|-----------------------|--------|--------|
| Média: | 3,20 | 2,58 |
| Variância: | 0,63 | 0,41 |
| Desvio-Padrão: | 0,80 | 0,64 |
| cov (%): | 24,92% | 24,96% |
| Valor Característico: | 2,24 | 1,76 |

Tabela A.5 – Resistência à tração normal às fibras na linha de cola

| CP | Espessura (mm) | Largura (mm) | Força (N) | Tensão (MPa) |
|-----|----------------|--------------|-----------|--------------|
| 1A | 24,00 | 50,20 | 2,11 | 1,75 |
| 1B | 25,20 | 50,10 | 4,48 | 3,55 |
| 2A | 23,30 | 50,30 | 2,18 | 1,86 |
| 2B | 24,05 | 50,15 | 1,29 | 1,07 |
| 3A | 24,40 | 50,10 | 2,88 | 2,36 |
| 3B | 23,90 | 50,30 | 3,10 | 2,58 |
| 4A | 24,10 | 50,10 | 5,70 | 4,72 |
| 4B | 24,60 | 50,20 | 2,05 | 1,66 |
| 5A | 25,00 | 50,90 | 5,14 | 4,04 |
| 5B | 26,35 | 50,00 | 4,38 | 3,32 |
| 6A | 23,15 | 49,60 | 3,32 | 2,89 |
| 6B | 25,20 | 50,45 | 2,58 | 2,03 |
| 7A | 24,80 | 49,75 | 2,43 | 1,97 |
| 7B | 24,95 | 50,15 | 3,75 | 3,00 |
| 8A | 25,00 | 50,30 | 1,94 | 1,54 |
| 8B | 24,00 | 50,20 | 2,55 | 2,12 |
| 9A | 24,00 | 49,90 | 3,93 | 3,28 |
| 9B | 24,00 | 50,55 | 4,43 | 3,65 |
| 10A | 24,55 | 50,25 | 3,69 | 2,99 |
| 10B | 23,55 | 50,40 | 3,64 | 3,07 |
| 11A | 24,00 | 50,15 | 2,64 | 2,19 |
| 11B | 23,00 | 50,00 | 3,01 | 2,62 |
| 12A | 23,00 | 50,00 | 2,57 | 2,23 |
| 12B | 24,20 | 50,15 | 2,61 | 2,27 |
| 13A | 24,15 | 50,40 | 2,56 | 2,10 |
| 13B | 24,10 | 50,20 | 3,56 | 2,94 |
| 14A | 26,20 | 50,20 | 4,52 | 3,44 |
| 14B | 24,65 | 50,35 | 4,63 | 3,73 |
| 15A | 25,10 | 50,50 | 1,26 | 1,00 |
| 15B | 23,65 | 50,25 | 3,90 | 3,28 |

| | | |
|-----------------------|--------|--------|
| Média: | 3,23 | 2,64 |
| Variância: | 1,19 | 0,75 |
| Desvio-Padrão: | 1,09 | 0,87 |
| cov (%): | 33,86% | 32,81% |
| Valor Característico: | 2,26 | 1,85 |

Tabela A.6 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na madeira

| CP | Altura (mm) | Largura (mm) | Força (kN) | Tensão (MPa) |
|-----|-------------|--------------|------------|--------------|
| 1A | 50,30 | 50,20 | 3,34 | 13,24 |
| 1B | 50,15 | 50,15 | 3,18 | 12,64 |
| 2A | 50,00 | 50,00 | 2,62 | 10,48 |
| 2B | 50,20 | 50,20 | 2,61 | 10,34 |
| 3A | 50,90 | 50,10 | 2,51 | 9,84 |
| 3B | 50,40 | 50,15 | 2,19 | 8,65 |
| 4A | 50,40 | 50,10 | 2,62 | 10,40 |
| 4B | 50,70 | 50,30 | 2,49 | 9,75 |
| 5A | 50,55 | 50,20 | 2,13 | 8,38 |
| 5B | 50,70 | 50,20 | 2,90 | 11,40 |
| 6A | 50,10 | 50,25 | 1,66 | 6,59 |
| 6B | 50,25 | 50,30 | 2,98 | 11,80 |
| 7A | 50,30 | 50,20 | 2,76 | 10,91 |
| 7B | 50,60 | 50,25 | 2,80 | 10,99 |
| 8A | 50,20 | 50,15 | 3,36 | 13,33 |
| 8B | 50,55 | 50,25 | 2,64 | 10,39 |
| 9A | 50,30 | 50,05 | 2,81 | 11,14 |
| 9B | 50,45 | 50,45 | 2,33 | 9,15 |
| 10A | 50,75 | 50,00 | 2,04 | 8,03 |
| 10B | 50,75 | 50,20 | 2,33 | 9,15 |
| 11A | 50,10 | 50,10 | 2,43 | 9,67 |
| 11B | 50,15 | 50,25 | 1,88 | 7,45 |
| 12A | 50,30 | 50,30 | 1,88 | 7,43 |
| 12B | 50,60 | 50,10 | 1,93 | 7,61 |
| 13A | 50,50 | 50,20 | 2,23 | 8,78 |
| 13B | 50,45 | 50,30 | 2,27 | 8,95 |
| 14A | 50,00 | 50,10 | 2,12 | 8,47 |
| 14B | 50,00 | 49,65 | 2,34 | 9,43 |
| 15A | 50,30 | 50,00 | 1,88 | 7,49 |
| 15B | 49,65 | 49,95 | 1,94 | 7,82 |

| | | |
|-----------------------|--------|--------|
| Média: | 2,44 | 9,66 |
| Variância: | 0,19 | 3,02 |
| Desvio-Padrão: | 0,44 | 1,74 |
| cov (%): | 18,04% | 18,01% |
| Valor Característico: | 1,95 | 7,53 |

Tabela A.7 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na linha de cola

| CP | Altura (mm) | Largura (mm) | Força (kN) | Tensão (MPa) |
|-----|-------------|--------------|------------|--------------|
| 1A | 50,00 | 50,20 | 22,97 | 9,15 |
| 1B | 50,20 | 50,15 | 21,42 | 8,51 |
| 2A | 49,70 | 50,30 | 24,60 | 9,84 |
| 2B | 50,05 | 50,45 | 37,26 | 14,76 |
| 3A | 49,55 | 50,35 | 26,54 | 10,64 |
| 3B | 49,85 | 50,40 | 30,23 | 12,03 |
| 4A | 50,00 | 50,20 | 25,05 | 9,98 |
| 4B | 49,95 | 50,00 | 19,76 | 7,91 |
| 5A | 50,40 | 50,35 | 22,54 | 8,88 |
| 5B | 50,45 | 50,35 | 34,75 | 13,68 |
| 6A | 49,65 | 50,45 | 23,65 | 9,44 |
| 6B | 50,00 | 50,15 | 26,39 | 10,53 |
| 7A | 50,45 | 50,55 | 27,31 | 10,89 |
| 7B | 50,20 | 50,75 | 27,46 | 10,78 |
| 8A | 49,70 | 50,45 | 20,90 | 8,34 |
| 8B | 49,35 | 50,45 | 21,39 | 8,59 |
| 9A | 49,65 | 50,45 | 25,55 | 10,20 |
| 9B | 50,35 | 50,60 | 21,82 | 8,56 |
| 10A | 49,25 | 49,90 | 26,61 | 10,83 |
| 10B | 49,90 | 50,35 | 26,74 | 10,64 |
| 11A | 49,60 | 50,35 | 21,66 | 8,67 |
| 11B | 50,05 | 50,35 | 23,48 | 9,32 |
| 12A | 50,30 | 50,25 | 28,91 | 11,44 |
| 12B | 50,15 | 50,50 | 29,19 | 11,53 |
| 13A | 50,30 | 50,40 | 32,10 | 12,66 |
| 13B | 50,05 | 50,25 | 33,50 | 13,32 |
| 14A | 49,75 | 50,30 | 18,86 | 7,54 |
| 14B | 49,90 | 50,40 | 24,99 | 9,94 |
| 15A | 49,60 | 50,75 | 19,19 | 7,62 |
| 15B | 50,70 | 50,30 | 17,28 | 6,78 |

| | | |
|-----------------------|--------|--------|
| Média: | 25,40 | 10,10 |
| Variância: | 22,74 | 3,53 |
| Desvio-Padrão | 4,77 | 1,88 |
| cov (%): | 18,77% | 18,59% |
| Valor Característico: | 19,58 | 7,79 |

APÊNDICE B – MODOS DE RUPTURA



Figura B.1(a) - Ruptura da viga 1: pórtico



Figura B.1(b) - Ruptura da viga 1: detalhe

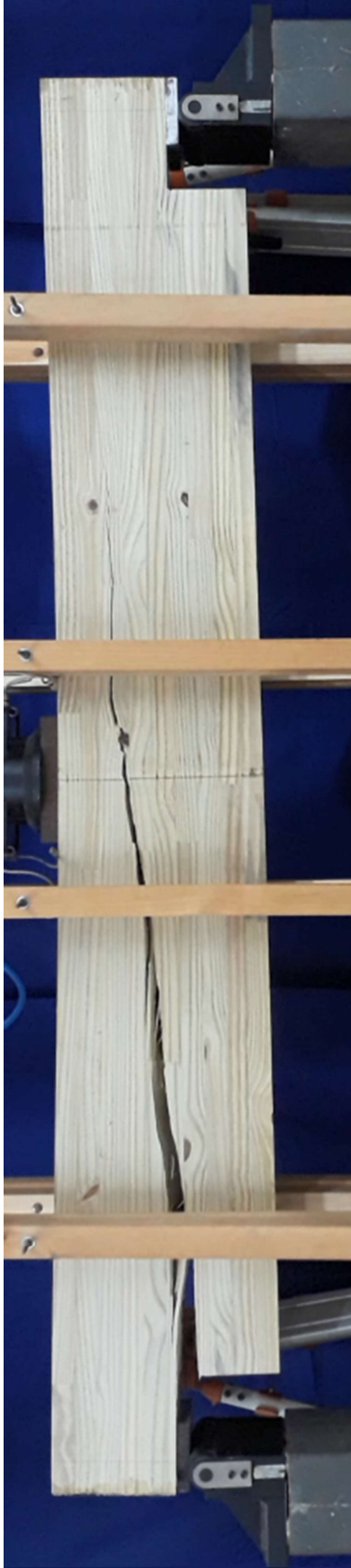


Figura B.2(a) - Ruptura da viga 6: pórtico



Figura B.2(b) - Ruptura da viga 6: detalhe



Figura B.3(a) - Ruptura da viga 9: pórtico



Figura B.3(b) - Ruptura da viga 9: detalhe



Figura B.4(a) - Ruptura da viga 3: pórtico

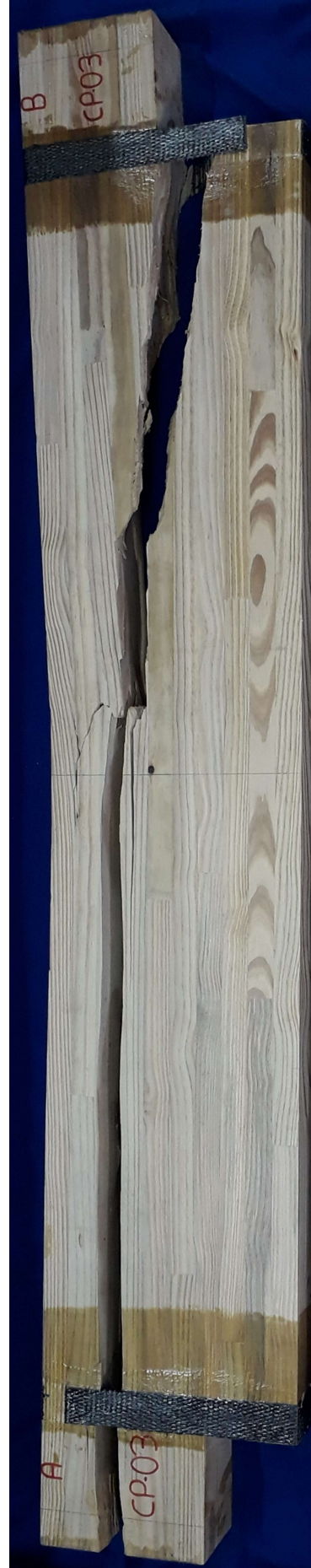


Figura B.4(b) - Ruptura da viga 3: detalhe



Figura B.5(a) - Ruptura da viga 4: pórtico



Figura B.5(b) - Ruptura da viga 4: detalhe



Figura B.6(a) - Ruptura da viga 13: pórtico



Figura B.6(b) - Ruptura da viga 13 : detalhe



Figura B.7(a) - Ruptura da viga 12: pórtico



Figura B.7(b) - Ruptura da viga 12: detalhe



Figura B.8(a) - Ruptura da viga 14: pórtico

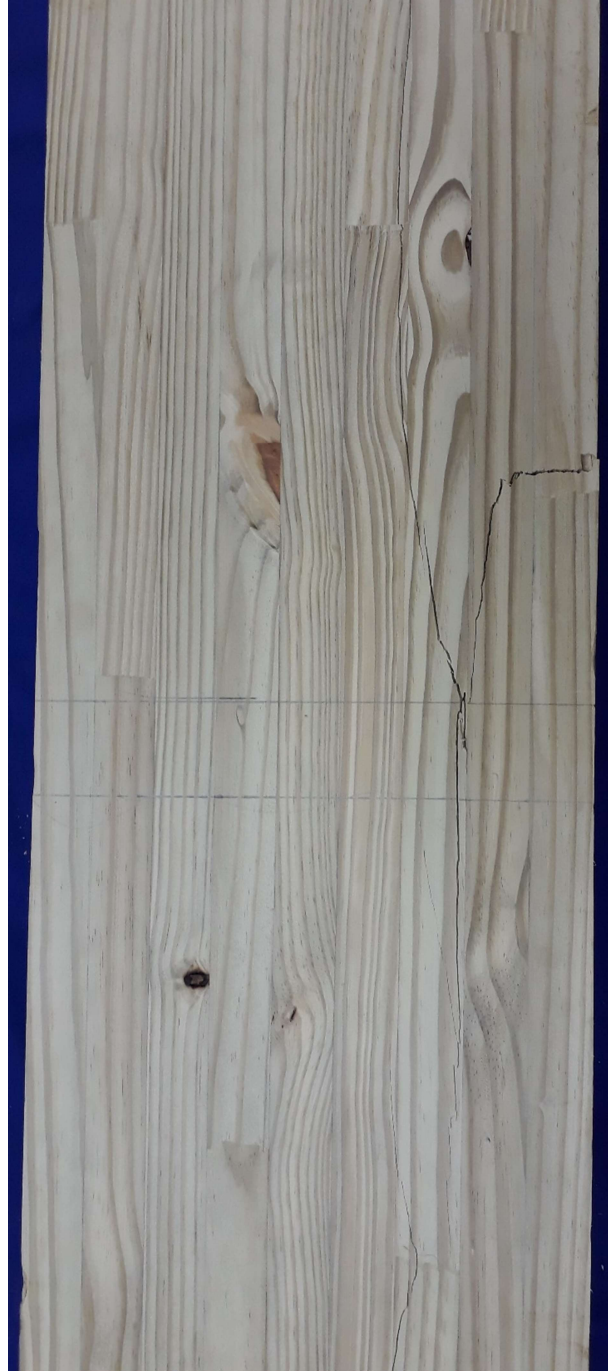


Figura B.8(b) - Ruptura da viga 14: detalhe



Figura B.9(a) - Ruptura da viga 15: pórtico



Figura B.9(b) - Ruptura da viga 15: detalhe



Figura B.10(a) - Ruptura da viga 5: pórtico



Figura B.10(b) - Ruptura da viga 5: detalhe

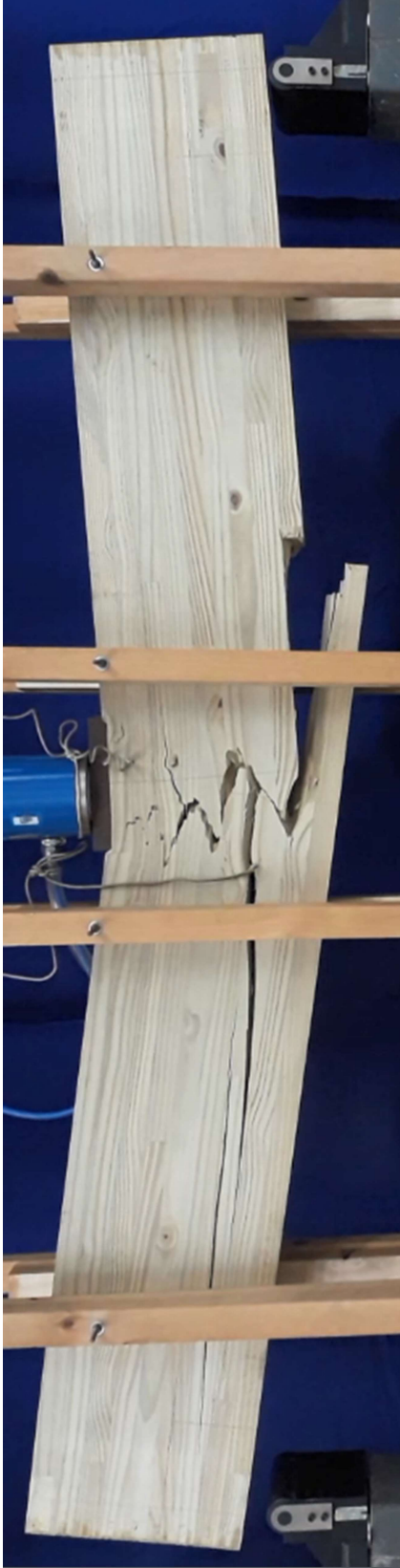


Figura B.11(a) - Ruptura da viga 8: pórtico

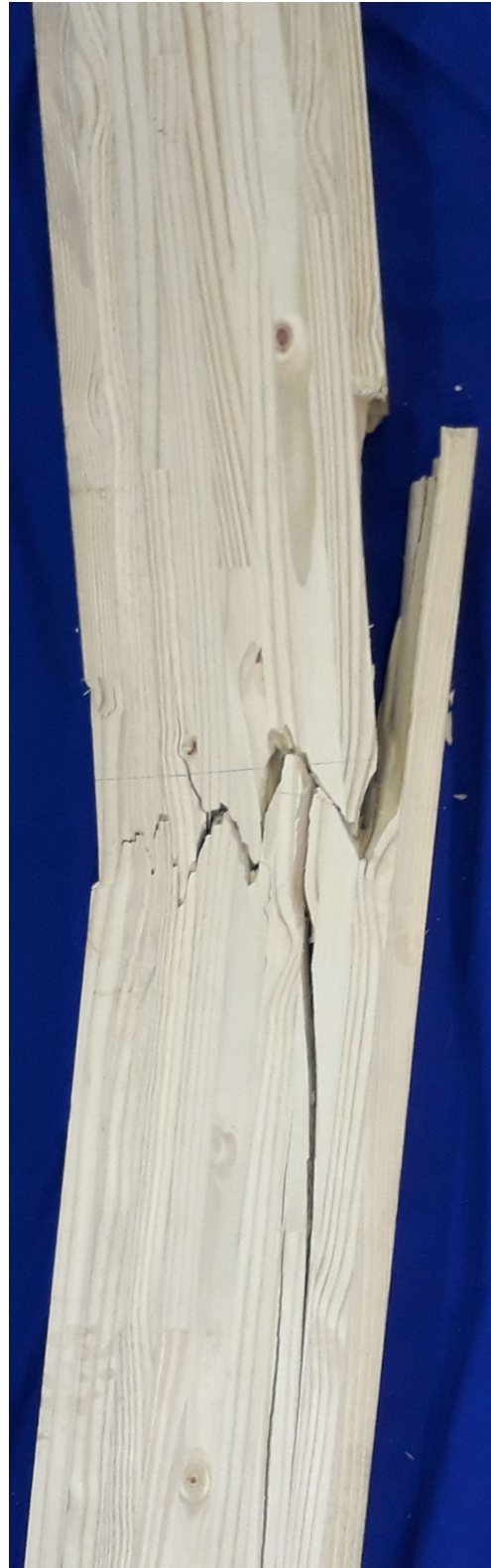


Figura B.11(b) - Ruptura da viga 8: detalhe

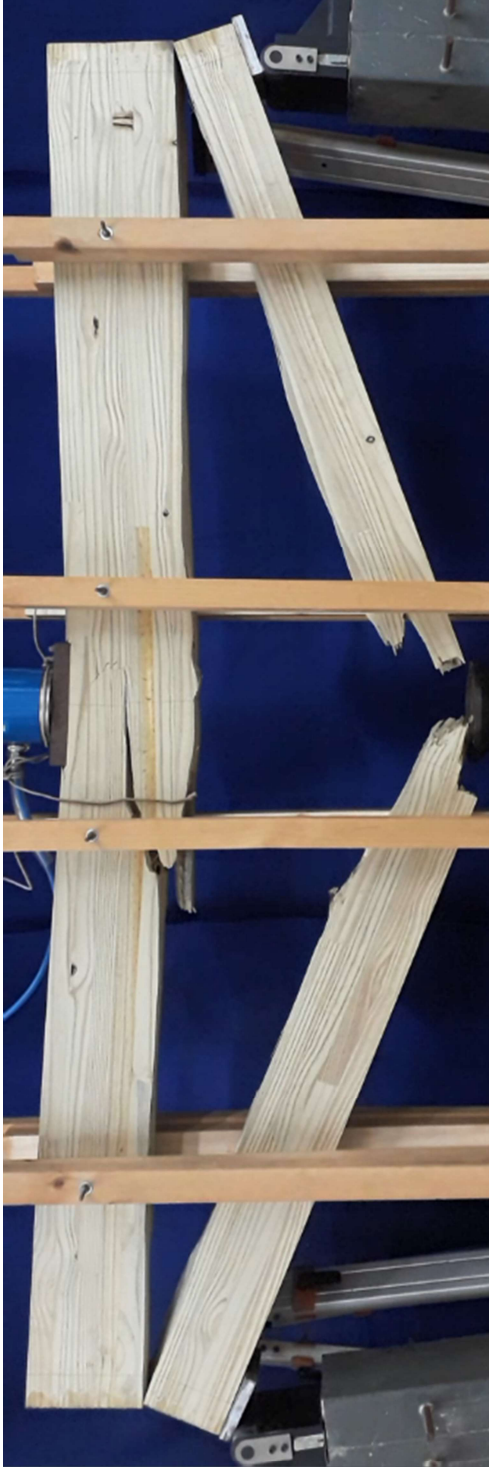


Figura B.12(a) - Ruptura da viga 11: pórtico

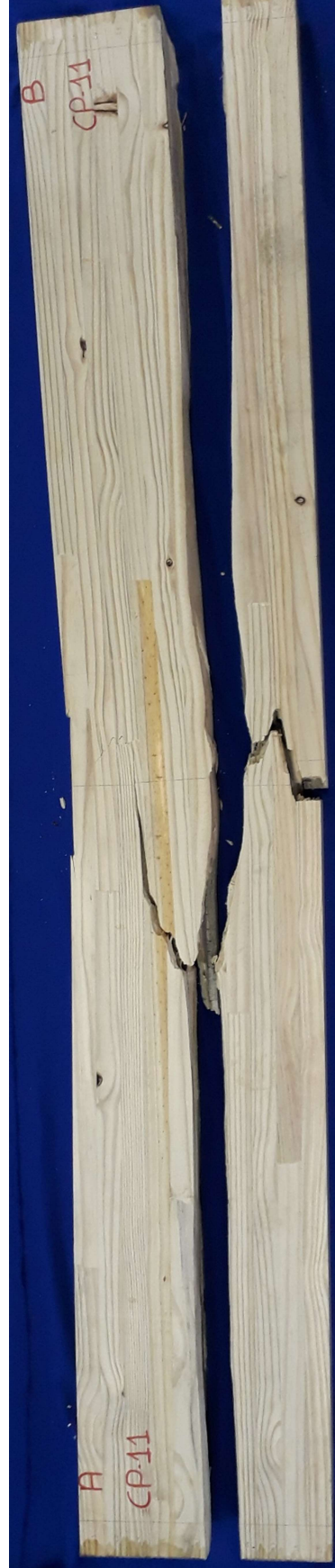


Figura B.12(b) - Ruptura da viga 11: detalhe

APÊNDICE C – ENSAIO DE FLEXÃO

| Viga | Dimensões | | Ciclo | | | | Ruptura | | Módulos de Elasticidade | | | |
|-----------------------|-----------|--------|-------------------|------------|---------|------------|---------|------------|-------------------------|---------------|-----------------|------|
| | Largura | Altura | Deslocamento (mm) | Carga (KN) | Desloc. | Carga (KN) | Desloc. | Carga (KN) | MOE [1] (MPa) | MOE [2] (MPa) | MOE [2] [1]/[2] | |
| | | | 10% | 35% | 10% | 35% | | | | | | |
| Sem Reforço | 1 | 100,05 | 300,93 | 0,614 | 2,165 | 2,520 | 14,955 | - | 45,80 | 5881 | 9402 | 0,63 |
| | 6 | 100,23 | 300,1 | 0,816 | 2,500 | 2,511 | 14,828 | - | 51,48 | 5400 | 8206 | 0,66 |
| | 9 | 100,1 | 300,2 | 0,513 | 1,913 | 2,471 | 14,906 | - | 57,16 | 6560 | 11226 | 0,58 |
| | 02-P | 99,88 | 300,35 | - | - | - | - | - | 36,69 | - | - | - |
| Reforço em 90° | 3 | 100,08 | 300,62 | 0,889 | 3,381 | 5,286 | 29,930 | - | 104,09 | 7274 | 13527 | 0,54 |
| | 4 | 100,03 | 300,68 | 1,173 | 5,806 | 4,805 | 39,433 | - | 104,67 | 5497 | 8450 | 0,65 |
| | 13 | 100,42 | 300,83 | 1,068 | 4,987 | 4,913 | 39,844 | - | 98,37 | 6521 | 11145 | 0,59 |
| | 10-P | 99,57 | 300,15 | - | - | - | - | - | 101,80 | - | - | - |
| Reforço em 45° | 12 | 100,07 | 300,37 | 1,411 | 6,070 | 9,875 | 49,347 | - | 115,63 | 6248 | 10351 | 0,60 |
| | 14 | 100,17 | 300,62 | 1,638 | 5,663 | 10,385 | 49,445 | - | 93,82 | 7132 | 13043 | 0,55 |
| | 15 | 100,05 | 300,25 | 1,727 | 5,017 | 10,444 | 39,531 | - | 119,10 | 6529 | 11140 | 0,59 |
| | 07-P | 100,05 | 300,55 | - | - | - | - | - | 125,78 | - | - | - |
| Sem Entalhe | 5 | 100,1 | 300,92 | 1,474 | 4,270 | 10,199 | 39,521 | - | 159,95 | 7689 | 15066 | 0,51 |
| | 8 | 100,03 | 300,57 | 1,334 | 4,264 | 10,238 | 39,276 | - | 135,15 | 7297 | 13603 | 0,54 |
| | 11 | 100,12 | 300,3 | 1,139 | 2,722 | 10,483 | 20,731 | - | 101,95 | 4775 | 6849 | 0,70 |

Figura C.1 - Dados dos ensaios de flexão