



**Amanda do Monte Mauro**

**Estudo teórico-experimental do reforço à flexão em vigas  
de madeira da espécie *Pinus oocarpa* com fibras de juta e  
vidro em matriz epoxídica**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Civil do departamento de  
Engenharia Civil e Ambiental do Centro Técnico  
Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva  
Co-orientador: Prof. Julio Jerônimo Holtz Silva Filho

Rio de Janeiro  
Julho de 2017



**Amanda do Monte Mauro**

**Estudo teórico-experimental do reforço à flexão em vigas de madeira da espécie Pinus oocarpa com fibras de juta e vidro em matriz epoxídica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Flávio de Andrade Silva**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Julio Jerônimo Holtz Silva Filho**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Marta de Souza Lima Velasco**

PUC-Rio

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de julho de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Amanda do Monte Mauro**

Graduou-se em Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em julho de 2014. Trabalha com projetos de cálculo e restauro de edificações antigas, pesquisando novos materiais e opções estruturais para aplicação prática. Atualmente é aluna de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

### Ficha Catalográfica

Mauro, Amanda do Monte

Estudo teórico-experimental do reforço à flexão em vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa* com fibras de juta e vidro em matriz epoxídica / Amanda do Monte Mauro ; orientador: Flávio de Andrade Silva ; co-orientador: Julio Jerônimo Holtz Silva Filho. – 2017.

180 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Fibra de juta. 3. Fibra de vidro. 4. Reforço em madeira. 5. *Pinus oocarpa*. 6. Compósitos de matriz epoxídica. I. Silva, Flávio de Andrade. II. Silva Filho, Julio Jerônimo Holtz. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo suporte e incentivo essenciais para que eu pudesse chegar ao final dessa trajetória. Ao meu maior parceiro, João, por estar sempre ao meu lado e por compreender os meus momentos de ausência.

Aos meus amigos da Cerne Engenharia e Projetos, agradeço pela compreensão, apoio e colaboração que me proporcionaram durante todo o curso, principalmente à Mayara Amorim pela dupla inseparável.

A todos os professores do Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio, agradeço pela inspiração e pelos valiosos ensinamentos proporcionados nos últimos anos.

A equipe do LEM que me instruiu, não somente, a como desenvolver bons ensaios de laboratório, mas como, também, pensar em equipe e viver levemente e de bom humor.

Agradeço aos meus amigos do Mestrado, que trouxeram tantos momentos de alegria e diversão durante essa jornada solitária. Em especial, à Ana Carol Trindade por todas as ajudas correspondidas.

Aos outros departamentos envolvidos nesta tese que foram essenciais para o seu desenvolvimento, marcenaria da PUC, laboratório de artes & design e, principalmente aos professores e alunos da engenharia química, responsáveis pelos meus ensaios de difração.

Aos meus professores e orientadores Flávio Silva e Julio Holtz, em especial, agradeço pela boa vontade e atenção que generosamente me dedicaram durante a orientação deste trabalho. Além disso, agradeço por sempre “me fazerem pensar”, que acredito ser a maior intenção dos professores com os alunos de pós-graduação.

Por último, mas não menos importante, ao CNPq, pela concessão da bolsa de isenção que foi essencial para a realização desta pesquisa.



## Resumo

Mauro, Amanda do Monte; Silva, Flávio de Andrade (Orientador); Holtz, Julio (Co-orientador). **Estudo teórico-experimental do reforço à flexão em vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa* com fibras de juta e vidro em matriz epoxídica.** Rio de Janeiro, 2017. 180p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo teórico-experimental tem como objetivo a análise do comportamento até a ruptura de vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa* reforçadas externamente à flexão com compósitos de base epoxídica reforçados por fibras de vidro e juta. No programa experimental foi investigado o desempenho mecânico do *Pinus Oocarpa* quando submetido a temperaturas elevadas. Uma tendência à redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão foi verificada com o aumento da temperatura, fato que pode ser comprovado através de análises com difração de raios-x. Ensaio de tração nos compósitos reforçados com fibras de vidro e juta foram realizados demonstrando comportamento frágil, linear-elástico até ruptura. Além disso, vinte e duas vigas, com seção transversal de 10x15cm e 300 cm de comprimento foram ensaiadas à flexão. Essas vigas foram divididas em cinco séries, sendo cinco vigas de referência sem reforço, cinco reforçadas com uma camada de fibra de vidro, seis com três camadas de fibra de vidro, uma com uma camada de fibra de juta e, por fim, cinco com três camadas de fibra de juta. No estudo teórico foi aplicado o modelo básico de seção composta para o regime elástico e dois modelos bilineares elasto-plásticos. A partir dos resultados numéricos e para as considerações adotadas, comparou-se com os valores encontrados experimentalmente concluindo-se que o primeiro modelo é o melhor deles para o dimensionamento. Verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram um acréscimo de força última variando de 16-26% quando considerados os compósitos de juta e 54-81% para os de vidro em relação às vigas de referência. Verificou-se, também, que, com o acréscimo das fibras ocorreu uma modificação no modo de ruptura, ou seja, as peças continuaram rompendo nas fibras tracionadas, só que com uma pequena plastificação nas fibras comprimidas. Observou-se, também, que os compósitos de fibra de juta alteram consideravelmente a rigidez das peças fletidas mesmo com ganho inferior na resistência.

## Palavras-chave

Fibra de juta; fibra de vidro; reforço em madeira; *Pinus oocarpa*; compósitos de matriz epoxídica.

## Abstract

Mauro, Amanda do Monte; Silva, Flávio de Andrade (Advisor); Holtz, Julio (Co-advisor). **Theoretical-experimental study of bending reinforcement in wood beams of *Pinus oocarpa*'s species with jute and glass fibers in epoxy matrix.** Rio de Janeiro, 2017. 180p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The work in hand aims the theoretical-experimental investigation of the mechanical behavior until rupture of *Pinus oocarpa*'s wood beams reinforced externally for bending with glass and jute epoxy-based composites. In the experimental program, the mechanical behavior under elevated temperatures of *Pinus oocarpa* was investigated. A tendency to reduce the elastic modulus and the compressive strength was verified with the increase of the temperature, which was traced back to the x-ray diffraction analysis. Tension tests on glass and jute fiber reinforced composites were performed showing a brittle and linear-elastic behavior until rupture. Beside this, twenty two beams, with cross section of 10x15cm and 300 cm of length, was tested. The beams were divided into five groups: five non-reinforced beams, five reinforced beams with one fiberglass layer, six with three fiberglass layers, one with one layer of jute fiber and five with three layers of jute fiber. In the theoretical study, a basic model of the composite section for the elastic range was applied and two bilinear elasto-plastic models. From the comparison of the experimental and theoretical results, it was concluded that the first model is the best one to be applied in project. It was verified that all the reinforced beams presented an increase of the ultimate force varying from 16 to 26% when considering the jute composites and from 54 to 81% for the glass ones. It has been found that, with the addition of glass fibers, a change in the mode of rupture was observed. Without the reinforcement, the beams fractured with pure tension. When the composites were used as external reinforcement, some beams presented a small plastification on the compression zone. It was also observed that the jute fiber composites considerably modified the stiffness of the beams even with a lower gain in the load bearing resistance.

## Keywords

Jute fiber; Glass fiber, wood reinforcement; *Pinus oocarpa*; composites with epoxy matrix.

# Sumário

1 Introdução	25
1.1. Motivação	25
1.2. Justificativas	28
1.3. Objetivos	31
1.4. Organização do trabalho	32
2 Revisão da literatura	33
2.1. Introdução	33
2.2. Propriedades da madeira: físicas, mecânicas e químicas	34
2.2.1. Propriedades físico-mecânicas da madeira	34
2.2.2. Propriedades químicas da madeira	36
2.3. A influência da temperatura nas propriedades da madeira	39
2.4. Caracterização quanto a qualidade da madeira	41
2.5. Compósitos poliméricos reforçados com fibras	42
2.5.1. Compósitos reforçados com fibras de vidro	44
2.5.2. Compósitos reforçados com fibras de juta	45
2.6. Utilização de reforço em peças de madeira submetidas à flexão	46
3 Estudo teórico do comportamento estrutural de vigas de madeira reforçadas	55
3.1. Modelo básico de seção composta (método da seção transformada)	55
3.2. Modelo bilinear elasto-plástico (com patamar de plastificação)	56
3.3. Modelo bilinear elasto-plástico (método de Bazan-Buchanan) (Buchanan 1990)	58
4 Programa experimental	61
4.1. Introdução	61
4.2. Ensaio de caracterização dos materiais	62
4.2.1. Madeira	62

4.2.2. Compósitos reforçados com fibra de vidro	71
4.2.3. Compósitos de fibra de juta	73
4.3. Análise experimental de vigas solicitadas à flexão com e sem reforço	75
4.3.1. Descrição das vigas	75
4.3.2. Características geométricas	76
4.3.3. Instrumentação das vigas	78
4.4. Ensaio à flexão	80
4.4.1. Esquema de ensaio	80
4.4.2. Aplicação do sistema de reforço	82
4.4.3. Execução dos ensaios	82
5 Apresentação e análise dos resultados	84
5.1. Introdução	84
5.2. Ensaio de caracterização	84
5.2.1. Madeira	84
5.2.2. Compósitos de fibras de vidro	96
5.2.3. Compósitos de fibra de juta	100
5.3. Ensaio de flexão	104
5.3.1. Série de referência SR	104
5.3.2. Série 1CFV	107
5.3.3. Série 3CFV	110
5.3.4. Série 1CFJ	112
5.3.5. Série 3CFJ	114
6 Modelo analítico	119
6.1. Modelo básico de seção composta (método da seção transformada)	119
6.1.1. Série SR	120
6.1.2. Série 1CFV	120
6.1.3. Série 3CFV	121
6.1.4. Série 1CFJ	122
6.1.5. Série 3CFJ	123
6.2. Modelo bilinear elasto-plástico (com patamar de plastificação)	125

6.2.1. Série SR	126
6.2.2. Série 1CFV	127
6.2.3. Série 3CFV	128
6.2.4. Série 1CFJ	129
6.2.5. Série 3CFJ	130
6.3. Modelo bilinear elasto-plástico (método de Bazan-Buchanan)	132
6.3.1. Série SR	133
6.3.2. Série 1CFV	133
6.3.3. Série 3CFV	134
6.3.4. Série 1CFJ	134
6.3.5. Série 3CFJ	135
7 Conclusões	137
7.1. Sugestões para trabalhos futuros	139
8 Referências	141
9 Anexo A - Dados	146
10 Anexo B - Fotografias	150

## Lista de figuras

Figura 1.1 Esquema estrutural para reforço do piso do novo colégio Eleva em Botafogo (antiga Casa Daros) com acréscimo de perfis metálicos - planta.	26
Figura 1.2 Corte esquemático do sistema de reforço do piso do colégio Eleva em Botafogo (antiga casa Daros), com dimensões em milímetros e elevações em metros.	26
Figura 1.3 Corte esquemático do sistema de reforço do barroteamento de piso, com a utilização de barras pultrudadas de fibra de vidro, do Museu Nacional da Quinta, na Quinta da Boa Vista.	27
Figura 1.4 Solução estrutural recomendada para reparar a degradação do apoio das vigas de madeira de piso para o Museu Nacional da Quinta.	27
Figura 1.5 Conformações de reforço à flexão que podem ser aplicados em vigas de madeira.	30
Figura 2.1 Seção transversal do caule de uma árvore.	34
Figura 2.2 Difractograma de raio X para madeiras das espécies <i>Eucalyptus grandis</i> (EUG) e <i>Pinus taeda</i> (PTA) aquecidas a 70°C por 24 horas (Poletto et al. 2011).	38
Figura 2.3 Difractograma de raio X para madeiras das espécies <i>Pinus elliottii</i> (PIE), <i>Eucalyptus grandis</i> (EUG), <i>Mezilaurus itauba</i> (ITA) e <i>Dipteryx odorata</i> (DIP) aquecidas a 105°C por 24 horas (Poletto et al. 2012) <sup>a</sup> .	38
Figura 2.4 Diagramas tensão-deformação para compósitos formados por (A) 10 camadas de tecido de fibras de vidro bidimensionais com densidade 280 g/m <sup>2</sup> (Sanjay e Yogesha 2016), (B) 40% de tecido de fibras de vidro dispersas (Islam et al. 2016), (C) 6 camadas de tecido de fibras de juta bidimensionais (Sanjay e Yogesha 2016) e (D) 40% de tecido de fibras de juta bidimensionais (Islam et al. 2016).	46
Figura 2.5 Perfis pultrudados com formatos em H ou I utilizados como reforço na zona comprimida no estudo de Borri e Corradi (2007).	53

Figura 3.1 Diagramas de tensão para vigas de seção transversal composta exemplificando o método da seção transformada (Hibbeler 2010).	55
Figura 3.2 Diagrama tensão deformação da madeira considerando módulo de elasticidade á tração igual ao de compressão.	56
Figura 3.3 Distribuições de deformações, tensões e forças para seções transversais de vigas reforçadas (Borri e Corradi 2011).	57
Figura 3.4 Diagrama tensão deformação da madeira (Corradi e Borri 2007).	58
Figura 3.5 Diagramas de tensão-deformação para seções transversais de vigas (Antonio Borri et al. 2005; Corradi e Borri 2007)	59
Figura 4.1 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de umidade (dimensões em cm).	63
Figura 4.2 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de densidade (dimensões em cm).	64
Figura 4.3 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão paralela às fibras (dimensões em cm).	65
Figura 4.4 Transdutor linear da marca <i>Gefran</i> modelo <i>PY2</i> utilizado durante os ensaios de compressão e flexão do programa experimental.	66
Figura 4.5 Esquema do ensaio de compressão paralela às fibras com três transdutores lineares para aquisição dos deslocamentos.	67
Figura 4.6 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras (dimensões em cm).	69
Figura 4.7 Tecido de fibra de vidro bidirecional 330 g/m <sup>2</sup> .	72
Figura 4.8 Molde utilizado para a confecção dos compósitos; e b) esquema de moldagem (Trindade, 2017).	72
Figura 4.9 Tecido de fibra de juta bidirecional 320 g/m <sup>2</sup> (F9).	73
Figura 4.10 Esquema do ensaio de tração para os compósitos.	75
Figura 4.11 Geometria das vigas (dimensões em cm).	76
Figura 4.12 Imperfeição encontrada nas vigas: fibras reversas.	77
Figura 4.13 Imperfeição encontrada nas vigas: quantidade excessiva de nós.	77

Figura 4.14 Imperfeição encontrada nas vigas: fendas nas extremidades.	77
Figura 4.15 Imperfeição encontrada nas vigas: perda de seção transversal.	78
Figura 4.16 Posicionamento dos EER nas vigas de madeira – tipo 1 (dimensões em cm).	79
Figura 4.17 Posicionamento dos EER nas vigas de madeira – tipo 2 (dimensões em cm).	79
Figura 4.18 Posição do transdutor linear de deslocamento (dimensões em cm).	80
Figura 4.19 Sistema de aplicação das cargas (dimensões em cm).	80
Figura 4.20 Sistema de aplicação de cargas montado.	81
Figura 4.21 Conformação de reforço escolhido para as vigas de madeira.	81
Figura 4.22 Ensaio de flexão das vigas de madeira.	83
Figura 5.1 DRX da madeira.	88
Figura 5.2 Diagrama tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras.	90
Figura 5.3 Diagrama tensão-deslocamento para compressão perpendicular às fibras.	92
Figura 5.4 Consequências para o módulo de elasticidade à compressão com o aumento da temperatura.	94
Figura 5.5 Consequências para a resistência à compressão com o aumento da temperatura.	95
Figura 5.6 Diagrama tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras nas diversas temperaturas aplicadas.	95
Figura 5.7 DRX da madeira a temperatura ambiente, 80°C, 160°C e 200°C.	96
Figura 5.8 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com uma camada de fibra de vidro.	98
Figura 5.9 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com três camadas de fibra de vidro.	99
Figura 5.10 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com uma camada de fibra de juta.	102



Figura 5.11 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com três camadas de fibra de juta.	103
Figura 5.12 Diagramas tensão-deformação representativos para tração nos compósitos reforçados com fibras de juta e vidro.	104
Figura 5.13 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira sem reforço.	106
Figura 5.14 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira sem reforço.	106
Figura 5.15 Relação entre o diagrama momento-curvatura e os modos de ruptura da madeira quando solicitada à flexão.	107
Figura 5.16 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	109
Figura 5.17 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	109
Figura 5.18 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	111
Figura 5.19 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	112
Figura 5.20 Diagrama força-deslocamento para flexão na viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	113
Figura 5.21 Diagrama momento-curvatura para flexão na viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	114
Figura 5.22 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	115
Figura 5.23 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	116
Figura 5.24 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira das 5 séries ensaiadas.	117
Figura 5.25 Diagramas momento curvatura para flexão nas vigas de madeira das 5 séries ensaiadas.	117
Figura 6.1 Distribuições das tensões de compressão e flexão na seção transversal.	120
Figura 6.2 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 1CFV (dimensões em cm).	121

Figura 6.3 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 3CFV (dimensões em cm).	122
Figura 6.4 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 1CFJ (dimensões em cm).	123
Figura 6.5 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 3CFJ (dimensões em cm).	123
Figura 6.6 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 4 vigas sem reforço ensaiadas à flexão (valores de deformação em $\mu\text{m/m}$ ).	127
Figura 6.7 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 5 vigas reforçadas com uma camada de fibra de vidro ensaiadas à flexão (valores de deformação em $\mu\text{m/m}$ ).	128
Figura 6.8 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 6 vigas reforçadas com três camadas de fibra de vidro ensaiadas à flexão (valores de deformação em $\mu\text{m/m}$ ).	129
Figura 6.9 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, da viga reforçada com uma camada de fibra de juta ensaiadas à flexão (valor de deformação em $\mu\text{m/m}$ ).	130
Figura 6.10 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das vigas reforçadas com três camadas de fibra de juta ensaiadas à flexão (valor de deformação em $\mu\text{m/m}$ ).	131
Figura 9.1 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos obtidos através de transdutores de deslocamento.	146
Figura 9.2 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da MTS.	147
Figura 9.3 Diagramas tensão-deslocamento para compressão perpendicular às fibras a partir dos deslocamentos obtidos através de transdutores de deslocamento.	147
Figura 9.4 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da MTS.	148
Figura 9.5 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da	

MTS para os corpos de prova pré-aquecidos nas temperaturas 60°C, 80°C, 110°C, 160°C, 200°C e 250°C.	148
Figura 9.6 Diagrama força-deslocamento para flexão na viga de madeira sem reforço denominada CP5-SR que foi ignorada por apresentar características de madeira de primeira categoria.	149
Figura 10.1 Corpo de prova 1, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	150
Figura 10.2 Corpo de prova 2, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	151
Figura 10.3 Corpo de prova 3, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	151
Figura 10.4 Corpo de prova 4, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	152
Figura 10.5 Corpo de prova 5, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	152
Figura 10.6 Corpo de prova 6, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	153
Figura 10.7 Corpo de prova 7, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	153
Figura 10.8 Corpo de prova 8, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.	154
Figura 10.9 Corpo de prova 1, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	154
Figura 10.10 Corpo de prova 2, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	155
Figura 10.11 Corpo de prova 3, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	155
Figura 10.12 Corpo de prova 4, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	156
Figura 10.13 Corpo de prova 5, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	156
Figura 10.14 Corpo de prova 6, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	157

Figura 10.15 Corpo de prova 7, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	157
Figura 10.16 Corpo de prova 8, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.	158
Figura 10.17 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 60°C em estufa por duas horas.	158
Figura 10.18 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 80°C em estufa por duas horas.	159
Figura 10.19 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 110°C em estufa por duas horas.	159
Figura 10.20 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 160°C em estufa por duas horas.	160
Figura 10.21 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 200°C em estufa por duas horas.	160
Figura 10.22 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 250°C em mufla por cinco minutos.	161
Figura 10.23 Viga 4 da série sem reforço após ensaio de flexão.	162
Figura 10.24 Viga 5 da série sem reforço após ensaio de flexão.	163
Figura 10.25 Viga 1 da série 1CFV após ensaio de flexão.	164
Figura 10.26 Viga 2 da série 1CFV após ensaio de flexão.	165
Figura 10.27 Viga 3 da série 1CFV após ensaio de flexão.	166
Figura 10.28 Viga 4 da série 1CFV após ensaio de flexão.	167
Figura 10.29 Viga 5 da série 1CFV após ensaio de flexão.	168
Figura 10.30 Viga 1 da série 3CFV após ensaio de flexão.	169
Figura 10.31 Viga 2 da série 3CFV após ensaio de flexão.	170
Figura 10.32 Viga 3 da série 3CFV após ensaio de flexão.	171
Figura 10.33 Viga 4 da série 3CFV após ensaio de flexão.	172
Figura 10.34 Viga 5 da série 3CFV após ensaio de flexão.	173

Figura 10.35 Viga 6 da série 3CFV após ensaio de flexão.	174
Figura 10.36 Viga 1 da série 1CFJ após ensaio de flexão.	175
Figura 10.37 Viga 1 da série 3CFJ após ensaio de flexão.	176
Figura 10.38 Viga 2 da série 3CFJ após ensaio de flexão.	177
Figura 10.39 Viga 3 da série 3CFJ após ensaio de flexão.	178
Figura 10.40 Viga 4 da série 3CFJ após ensaio de flexão.	179
Figura 10.41 Viga 5 da série 3CFJ após ensaio de flexão.	180

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 Composição média de madeiras coníferas e folhosas.	37
Tabela 2.2 Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte (Schaffer 1973)	40
Tabela 5.1 Valores de massa para obtenção da umidade da madeira e resultados.	85
Tabela 5.2 Densidades da madeira.	85
Tabela 5.3 Valores de peso e comprimentos após ciclos de secagem e umedecimento dos corpos de prova.	87
Tabela 5.4 Deformações específicas e variação volumétrica da madeira.	88
Tabela 5.5 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira considerando umidade igual a 12%.	89
Tabela 5.6 Módulo de elasticidade e resistência à compressão perpendicular às fibras da madeira.	91
Tabela 5.7 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira à 60°C.	92
Tabela 5.8 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira à 80°C.	92
Tabela 5.9 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira à 110°C.	93
Tabela 5.10 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira à 160°C.	93
Tabela 5.11 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira à 200°C.	93
Tabela 5.12 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com uma camada de fibra de vidro.	97
Tabela 5.13 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com três camadas de fibra de vidro.	98
Tabela 5.14 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com uma camada de fibra de juta.	101

Tabela 5.15 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com três camadas de fibra de juta.	101
Tabela 5.16 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para quatro vigas de madeira não reforçadas.	105
Tabela 5.17 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para cinco vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	108
Tabela 5.18 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para seis vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	110
Tabela 5.19 Resultado do ensaio de flexão a 4 pontos para uma viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	113
Tabela 5.20 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para cinco vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	114
Tabela 6.1 Parâmetros de entrada para o cálculo da rigidez das vigas a partir do primeiro modelo de cálculo.	119
Tabela 6.2 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas não reforçadas.	120
Tabela 6.3 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	121
Tabela 6.4 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	122
Tabela 6.5 Valor de rigidez obtido experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teórico obtido a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com uma camada de fibra de juta.	123
Tabela 6.6 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com três camadas de fibra de juta.	124

Tabela 6.7 Resultados para a rigidez à flexão e momentos de ruptura obtidos a partir do modelo numérico 1 e dos ensaios em laboratório para as cinco séries de vigas.	124
Tabela 6.8 Parâmetros utilizados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.	127
Tabela 6.9 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.	127
Tabela 6.10 Parâmetros utilizados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de vidro.	128
Tabela 6.11 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	128
Tabela 6.12 Parâmetros utilizados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	129
Tabela 6.13 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	129
Tabela 6.14 Parâmetros utilizados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	130
Tabela 6.15 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	130
Tabela 6.16 Parâmetros utilizados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	131



Tabela 6.17 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	131
Tabela 6.18 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão médios considerando o segundo modelo de cálculo para as cinco séries de corpos de prova.	132
Tabela 6.19 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.	133
Tabela 6.20 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.	133
Tabela 6.21 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.	134
Tabela 6.22 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.	134
Tabela 6.23 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.	135
Tabela 6.24 Resultados para momento de ruptura e rigidez à flexão médios considerando o terceiro modelo de cálculo para as cinco séries de corpos de prova.	136

## Lista de símbolos

### Romanos:

$A$	área da seção transversal
$E$	módulo de elasticidade
$c$	razão entre $y$ e a altura total da viga
$F_{c0}$	força normal de compressão paralela às fibras
$f_0$	resistência à compressão paralela às fibras
$I$	momento de inércia da seção transversal
$k$	razão entre a região da seção transversal onde ocorre a plastificação e a altura da viga
$L$	comprimento das faces do corpo de prova vão livre das vigas ensaiadas à flexão
$M$	momento fletor
$m_i$	massa inicial do corpo de prova
$m_s$	massa final do corpo de prova massa seca do corpo de prova
$n$	fator de transformação
$U$	umidade
$V_{sat}$	volume saturado do corpo de prova
$V_{seca}$	volume seco do corpo de prova
$W$	módulo de resistência à flexão
$y$	maior distância entre a linha neutra e a fibra mais externa distância entre a linha neutra e a fibra mais externa superior
$y'$	distância entre a linha neutra e a fibra mais externa inferior

### Gregos:

$\Delta V$	variação volumétrica
$\delta$	flecha máxima no meio do vão das vigas fletidas
$\varepsilon$	deformação normal específica
$\varepsilon_i$	deformação específica obtida pelo processo de inchamento
$\varepsilon_r$	deformação específica obtida pelo processo de retração
$\sigma$	tensão normal

	tensão de flexão
$\Phi$	curvatura das vigas fletidas
$\rho_{bas}$	densidade básica

## Lista de siglas

1CFV	uma camada de fibra de vidro
1CFJ	uma camada de fibra de juta
3CFV	três camadas de fibra de vidro
3CFJ	três camadas de fibra de juta
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CP	corpo de prova
DIN	Deutsche Industrie Norm
DIP	<i>Dipteryx adorata</i>
DRX	difratometria de raios X
EER	extensômetro elétrico de resistência
EN	European Standards
EUG	<i>Eucalyptus grandis</i>
FRP	fibre reinforced polymer
IC	índice de cristalinidade
ITA	<i>Mezilaurus itauba</i>
LVDT	transdutor linear de deslocamento
PIE	<i>Pinus elliottii</i>
PTA	<i>Pinus taeda</i>
SAI	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SR	sem reforço
UNE	Una Norma Española
UNI	Ente Italiano di Normazione

# 1

## Introdução

### 1.1. Motivação

A madeira pode apresentar problemas no decorrer do tempo, ocasionados pelas mudanças de temperatura, ataques de fungos, insetos e umidade. Sua utilização estrutural no Brasil normalmente está associada a edificações antigas e, por isso, quando degradada, a opção mais comum é a sua substituição por elementos metálicos ou de concreto armado. Algumas dessas edificações, porém, se encontram tombadas pelo patrimônio histórico e devem permanecer, ao máximo, preservadas. Sendo assim, surge a necessidade de se reforçar e reparar elementos de madeira que, preferencialmente, não podem ser substituídos por outros materiais.

Além da restauração das peças de madeira danificadas, que consiste em fazer voltar o elemento à sua feição primitiva arquitetônica, pode-se fazer necessário o reforço das mesmas devido a uma alteração de utilização da edificação. Alguns exemplos de pisos estruturados em madeira, no Rio de Janeiro, que necessitaram de reforço à flexão, são:

1. Antiga Casa Daros (novo colégio Eleva Educação): Chácara em Botafogo de 1866, que foi doada à Santa Casa de Misericórdia, depois vendida à Casa Daros *Latin America* e, hoje, pertencendo à Eleva Educação, é uma edificação em alvenaria portante, com dois pavimentos no corpo principal. O piso do térreo trata-se de uma laje acamada de concreto armado, apoiada diretamente no solo. O piso do primeiro pavimento é formado por barrotes de aproximadamente 10x20 cm, distanciados a cada 50 cm, que sustentam tábuas de madeira. Para essa edificação, a solução adotada foi o acréscimo de perfis metálicos, perpendiculares ao barroteamento, para que o vão dessas vigas de piso fosse reduzido pela metade, aumentando, assim, a capacidade de carga das vigas. Um detalhe do projeto estrutural do reforço segue apresentado nas Figuras 1.1 e 1.2.

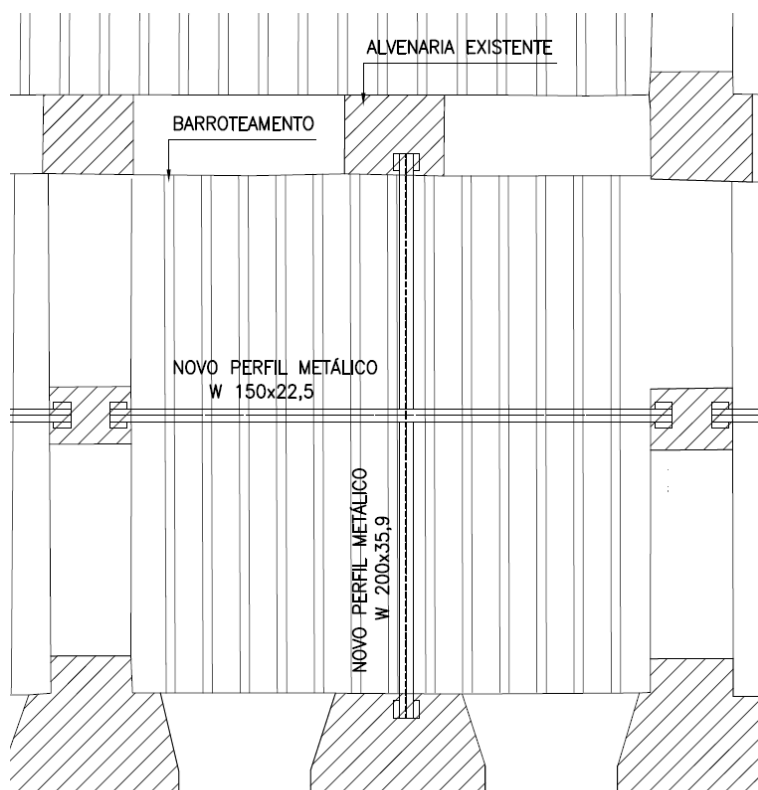


Figura 1.1 Esquema estrutural para reforço do piso do novo colégio Eleva em Botafogo (antiga Casa Daros) com acréscimo de perfis metálicos - planta.

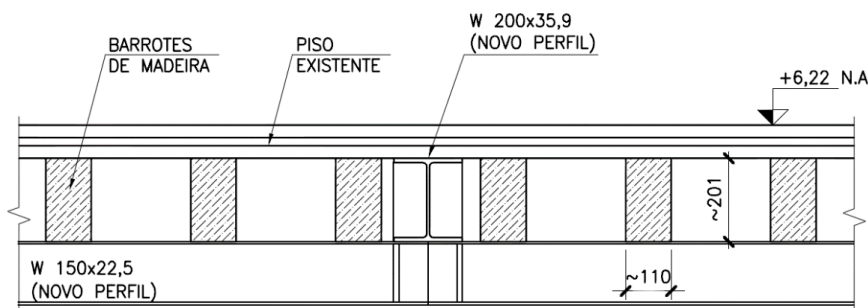


Figura 1.2 Corte esquemático do sistema de reforço do piso do colégio Eleva em Botafogo (antiga casa Daros), com dimensões em milímetros e elevações em metros.

2. Museu Nacional da Quinta: Antiga morada de Dom João VI, Dom Pedro I e Dom Pedro II. Estruturalmente, o prédio é composto por um sistema de alvenarias autoportantes com espessura variando de sessenta e cinco centímetros a um metro (paredes da fachada). O museu é composto por três pavimentos, térreo, primeiro e segundo pavimentos. “As lajes abaixo dos torreões são estruturadas em barrote de 20x30 cm, espaçados a cada 1,0 metro, onde foi sugerido em projeto, reforço na zona tracionada utilizando quatro barras pultrudadas de fibra de vidro, circulares, de

diâmetro igual a  $\frac{1}{2}$ ", com 75% em fibras. Para reparar a degradação da seção transversal nos apoios, patologia bastante comum em estruturas de madeira, foi recomendada utilização de chapas metálicas. Os esquemas de reforço seguem apresentados nas Figuras 1.3 e 1.4.

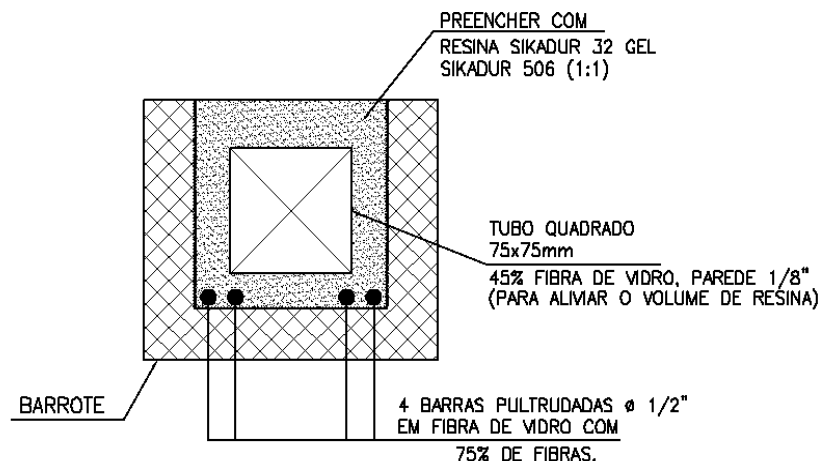


Figura 1.3 Corte esquemático do sistema de reforço do barroteamento de piso, com a utilização de barras pultrudadas de fibra de vidro, do Museu Nacional da Quinta, na Quinta da Boa Vista.

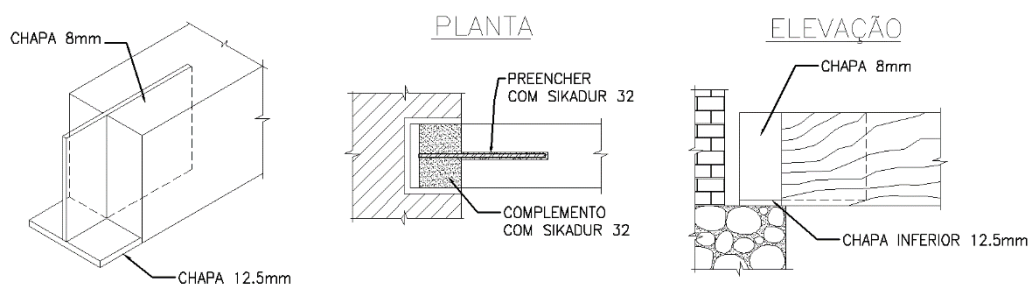


Figura 1.4 Solução estrutural recomendada para reparar a degradação do apoio das vigas de madeira de piso para o Museu Nacional da Quinta.

A madeira é um material bastante apropriado para muitas aplicações na construção civil devido a sua fácil trabalhabilidade, desempenho elástico, baixa condutividade térmica, baixo peso específico e o grande apelo artístico e estético. Entretanto, por ser um material heterogêneo, o controle da qualidade, assim como a variabilidade das propriedades mecânicas, torna-se um agravante para os projetistas estruturais. Desse modo, a opção pelo reforço de vigas em madeira também se torna recomendada quando se possui material de baixa qualidade no qual a presença de nós, principais responsáveis pelo decréscimo na resistência à tração e flexão, é bastante significativa.

As madeiras de reflorestamento, por exemplo, apresentam crescimento rápido, e como consequência, produzem seções transversais pequenas e com

muitos nós. Essas madeiras são um material apropriado para obras de baixo custo e projetos sociais de habitação. Aumentar a capacidade de carga das seções, mantendo um material renovável e economicamente viável, reafirma a aplicabilidade dos compósitos.

A madeira, por ser um material orgânico, pode ser degradada por agentes físicos, químicos e biológicos. Alguns dos agentes aceleradores dessa deterioração são as altas temperaturas e incêndios, que podem danificar a sua estrutura celular ou reduzir sua seção transversal.

As peças de madeira, quando expostas ao fogo, formam uma camada superficial de carvão, que age como um isolante térmico, impedindo a rápida saída de gases inflamáveis e a propagação de calor no interior da seção. Sendo assim, o aquecimento e a degradação do material ocorrem com uma velocidade menor. Uma série de alterações químicas acontece em sua composição quando a temperatura é aumentada e que podem influenciar nas propriedades mecânicas da madeira, importantes para o bom funcionamento de uma edificação.

A utilização de materiais compósitos com matriz epoxídica como reforço é favorável devido à sua característica anticorrosiva, assim como a boa resistência à abrasão, baixo peso com alta razão resistência-peso e facilidade no manuseio e execução do reforço.

A aplicação do reforço com fibras em vigas de madeira ainda não apresenta força no mercado brasileiro como opção construtiva devido à escassez nas informações e pouco conhecimento quanto ao seu dimensionamento. No entanto, dentro do contexto atual e considerando que os dois materiais mais usados na construção civil são o concreto armado e o aço, a sociedade vem buscando materiais sustentáveis e todo conhecimento adquirido torna-se válido para os próximos anos.

## **1.2. Justificativas**

Diversos fatores podem demandar a utilização de reforço em vigas de piso de madeira. Os principais são a modificação da utilização de uma estrutura existente que necessitará resistir a cargas mais elevadas, a presença de grandes flechas em elementos estruturais, o que pode ocasionar desconforto do usuário, a



baixa qualidade do material, que acompanha uma redução na resistência das vigas ou a degradação do material, seja por agentes biológicos como fungos, insetos e umidade ou não biológicos como incêndios, grandes impactos ou fissurações.

O reforço de vigas de piso pode ser feito com várias metodologias distintas, como, por exemplo, as listadas a seguir:

1. Acréscimo de perfis metálicos no vigamento de piso visando redistribuir os esforços e reduzir as áreas de influência;
2. Acréscimo de chapas metálicas nas vigas de madeira visando aumentar a área da seção transversal;
3. Acréscimo de barras de aço na região tracionada das vigas de madeira para aumentar a resistência à tração das peças;
4. Substituição total do piso por um novo, com outro tipo de material, como concreto armado, estrutura metálica, painéis *wall*, *steel decks*, entre outros;
5. Colagem externa de fibras no sentido longitudinal, na região tracionada das vigas de madeira, para aumentar a resistência à tração das peças.

Das opções citadas anteriormente, a de menor impacto estético e de fácil aplicação seria a colagem externa de fibras nas vigas de madeira. Essa técnica pode ser executada sem a necessidade de se retirar as peças do lugar. Também é válido ressaltar que tanto a resina epóxi quanto a fibra de vidro utilizada como reforço, após secagem, tornam-se transparentes. Já a fibra de juta, por ser um material natural, acompanha o mesmo conceito da madeira.

A seleção do reforço a ser aplicado se inicia com a escolha do material compósito utilizado e seu formato, ou seja, em tecidos, em fios ou em barras pultrudadas. Essa decisão quanto ao material torna-se importante já que o reforço tem que preencher requisitos como durabilidade e boas propriedades mecânicas. Em seguida, decide-se a respeito da conformação do reforço, isto é, onde será aplicado o compósito: apenas no fundo da zona tracionada, envolvendo toda a região tracionada da seção transversal ou ao redor de toda a viga (Figura 1.5). Por último, o reforço deve atender a condições estruturais e arquitetônicas.

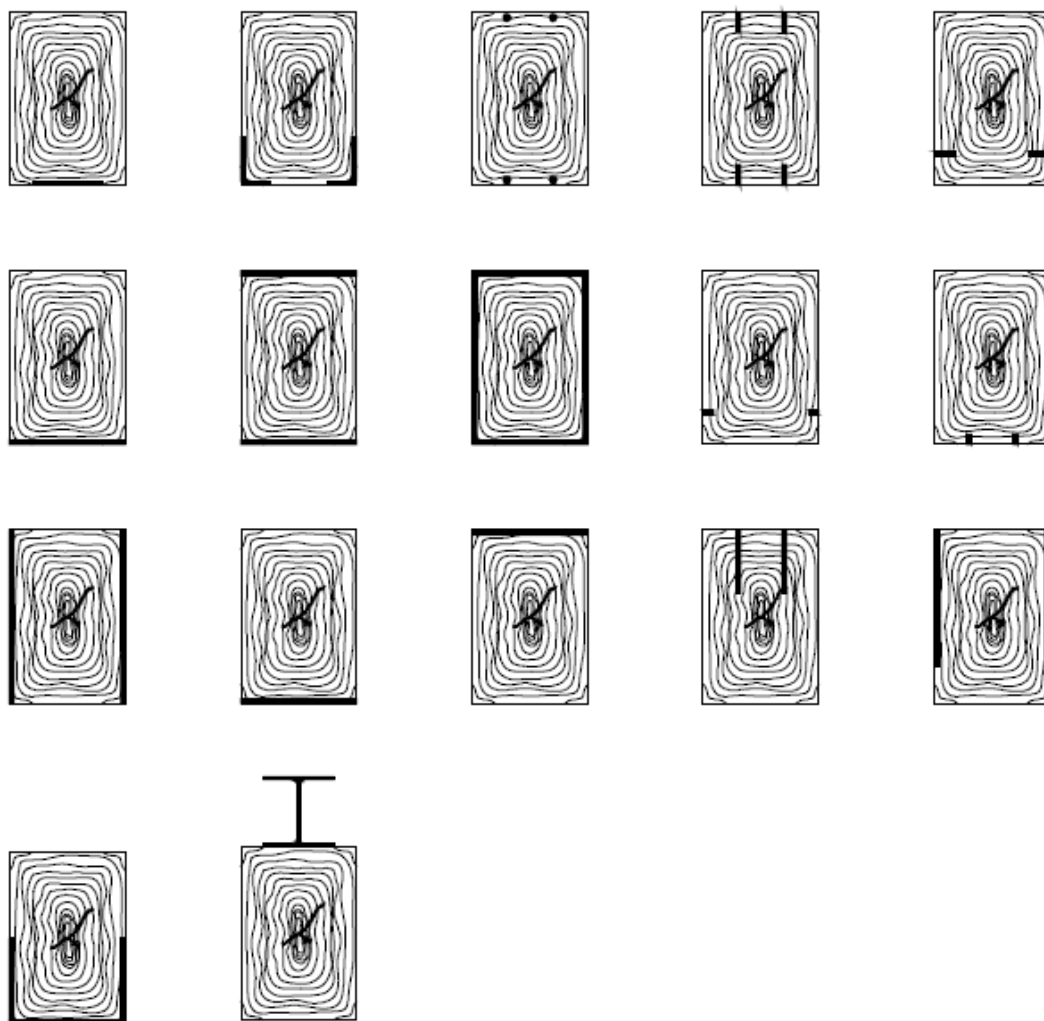


Figura 1.5 Conformações de reforço à flexão que podem ser aplicados em vigas de madeira.

Esta pesquisa, portanto, traz um assunto novo ao acervo do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, cujo enfoque é o reforço de vigas em madeira com compósitos poliméricos reforçados com fibras.

Pretende-se, com este trabalho, iniciar uma linha de pesquisa sobre madeira dentro da universidade, com aplicação na engenharia civil, para que assim, com aprimoramento e aprofundamento sobre o tema, seja possível aplicar reforços em projetos de restauro de edificações nas quais a madeira é o componente estrutural majoritário. Preservando, então, a contribuição histórica que a arquitetura juntamente com a engenharia, traz ao patrimônio brasileiro.

### 1.3. Objetivos

Este trabalho tem como proposta verificar, experimentalmente, as consequências da utilização do reforço feito com dois tipos de fibras em forma de tecido, vidro e juta, para ganho na resistência e rigidez, em vigas de madeira do tipo *Pinus oocarpa* solicitadas à flexão. A escolha por esse tipo de madeira se deu em função de seu bom custo-benefício, ou seja, é uma espécie de razoável resistência mecânica somada ao baixo custo da matéria-prima.

Esse reforço consiste na colagem, com auxílio de resina epóxi bi componente, de uma ou três camadas de cada um dos dois tipos de fibras, na região inferior das vigas, na zona tracionada. Essas vigas apresentam seção transversal de 10x15 centímetros (base x altura) e trezentos centímetros de comprimento.

Além do comportamento das vigas quando solicitadas a esforços de flexão, foi objetivada, também, uma verificação nas consequências que a exposição a altas temperaturas pode ter tanto nas propriedades mecânicas quanto na composição estrutural da madeira.

Foram feitos ensaios de caracterização da madeira, assim como de tração nos compósitos reforçados com fibras de vidro e juta e, por último, ensaios de flexão em vigas sem e com os tipos de reforço.

A partir desse escopo e da análise dos dados, objetiva-se:

- Avaliar o acréscimo na força última e no momento de ruptura das vigas de madeira solicitadas à flexão após aplicação do reforço em fibras de vidro ou juta;
- Avaliar a alteração da rigidez das vigas após recebimento do reforço e sua influência para a flecha durante carregamento;
- Avaliar a alteração na ductilidade das vigas após recebimento do reforço;
- Avaliar o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibra de vidro e juta ao serem submetidos a esforços de tração;
- Verificar as consequências nas propriedades mecânicas da madeira com acréscimos de temperatura que podem degradar a composição química do material;
- Comparar os resultados experimentais com os obtidos através de modelos analíticos de cálculo.

#### **1.4. Organização do trabalho**

O Capítulo 1 traz a introdução e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica acerca das propriedades químicas e físico-mecânicas da madeira e a influência da temperatura nessas propriedades. Também cita trabalhos relacionados com compósitos reforçados com fibras de vidro e juta e a sua utilização como reforço em vigas de madeira.

O Capítulo 3 apresenta quatro modelos teóricos do comportamento das vigas de madeira reforçadas para, a partir dos três primeiros, comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

O Capítulo 4 aborda toda a metodologia experimental utilizada para a caracterização mecânica da madeira e dos compósitos epoxídicos reforçados com fibra de vidro e juta. Consta também a descrição dos ensaios de flexão em vigas com e sem reforço.

O Capítulo 5 expõe e analisa os resultados obtidos a partir do programa experimental. Já o capítulo 6 complementa essa análise adicionando uma comparação entre os modelos teóricos e os resultados experimentais.

No Capítulo 7 são apresentadas conclusões e sugestões para continuidade da pesquisa.

## 2

### Revisão da literatura

A madeira é um material orgânico, originado das árvores, com tamanho e estrutura complexos, formada por cadeias de moléculas de dióxido de carbono e água e, por apresentar essa conformação, é suscetível aos intemperismos provocados pela natureza.

Sua degradação e durabilidade estão diretamente vinculadas à estruturação química do material, contato com oxigênio, umidade, diferentes pH, altas temperaturas, raios ultravioletas, microrganismos e outros agentes contaminantes.

Para estudar metodologias de reforço e reparo de estruturas em madeira que foram degradadas pelo tempo, meio ambiente ou sofreram com alterações nos carregamentos permanentes ou acidentais, é importante conhecer a estrutura, suas propriedades e comportamento quando submetidos a esforços solicitantes.

#### 2.1.

##### Introdução

As madeiras utilizadas na construção civil podem ser classificadas, segundo o gênero botânico e considerando uma escala macro, em dois grupos: as madeiras Gimnospermas (ou duras) e as Angiospermas (ou macias). Essa segunda classificação, que engloba árvores de crescimento rápido, de plantas com sementes cobertas e com madeiras de diferentes estruturas internas, também chamadas de coníferas ou não porosas, foi o material utilizado nesse estudo e seus exemplos mais comuns são Pinus e Pinho.

Essas duas categorias supracitadas não interferem diretamente na resistência da madeira e, sim, na estrutura celular dos troncos. Os troncos apresentam seção transversal conforme apresentado na Figura 2.1 e são estruturados pelo acréscimo de anéis ao redor da medula.

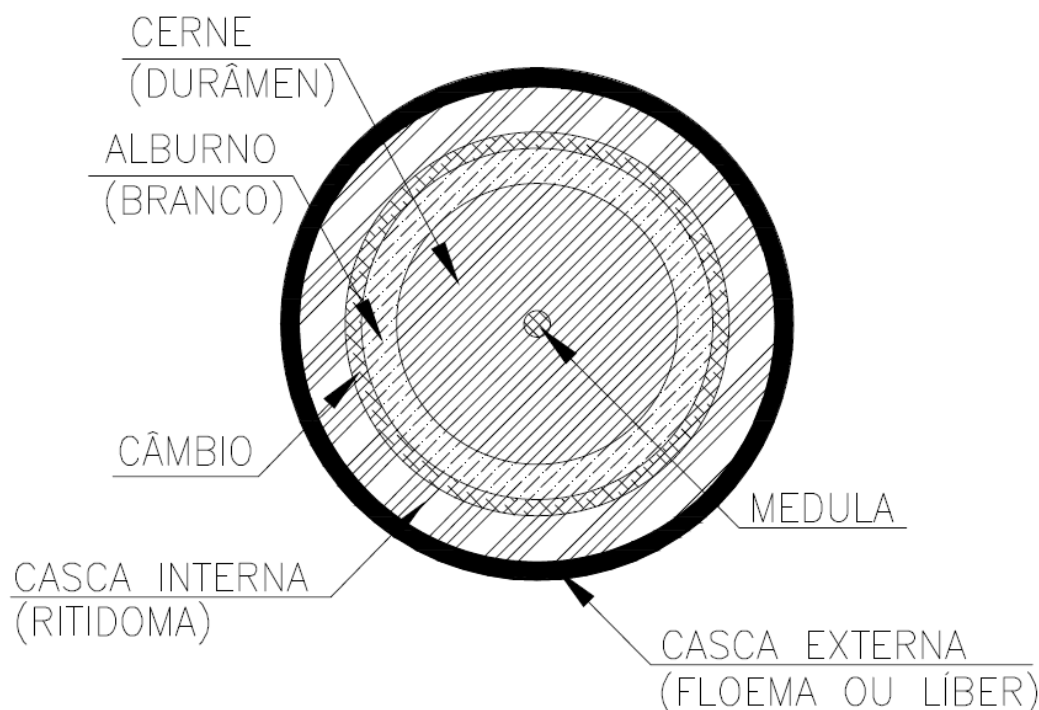


Figura 2.1 Seção transversal do caule de uma árvore.

Finalmente, em uma escala celular, é possível subdividir a estrutura molecular em componentes poliméricos como a celulose, lignina, e hemicelulose ou em componentes poliméricos secundários como açúcar, gordura, amido, ou substâncias de baixo peso molecular como extrativos e cinzas (Klock e Andrade 2013).

## 2.2.

### Propriedades da madeira: físicas, mecânicas e químicas

#### 2.2.1.

##### Propriedades físico-mecânicas da madeira

A densidade é uma das propriedades da madeira de maior importância, pois irá influenciar nas propriedades mecânicas e tecnológicas da mesma. De maneira resumida, quanto maior for a massa específica, mais resistentes e mais duras elas são. Sendo assim, a densidade é um bom indicador da qualidade do material já que mede a quantidade de vazios existentes refletindo, então, a quantidade de material lenhoso por unidade de volume. Em compensação, altas massas específicas, normalmente, acompanham maior variabilidade e pior trabalhabilidade devido ao manuseio de peças pesadas (Pfeil e Pfeil 2003).

De acordo com Moreschi (2012), alguns fatores influenciam diretamente nessa massa específica. Eles podem ser inerentes à madeira, como por exemplo, a espécie florestal, a umidade, os lenhos iniciais e tardios, largura dos anéis de crescimento, posição do tronco; ou agentes externos que impactam na forma e na taxa de crescimento das árvores tais como o local de crescimento (clima, solo, umidade e vento) e os métodos de silvicultura (adubações, podas, desbastes e composições de espécies) (Moreschi 2012).

Muitos foram os estudos de caracterização da madeira de espécie *Pinus oocarpa* com os quais foi possível obter as principais propriedades mecânicas como os módulos de elasticidade e a resistência à compressão paralela as fibras para determinadas densidades e idades da árvore (Anoop et al. 2014; Araujo et al. 2015; Carvalho et al. 2017; Leonhardt et al. 2001; Matos e Trianoski 2014; Resch e Bustendorff 1978; Segundinho et al. 2012; Trianoski et al. 2014).

De acordo com Trianoski et al. (2014), para árvores com idades entre 17 e 18 anos, e madeira com densidade de 0,552 g/cm<sup>3</sup>, o módulo de elasticidade à compressão paralela as fibras pode chegar a 12,2 GPa, a resistência à compressão paralela às fibras a 39 MPa, o módulo de elasticidade à flexão a 7,9 GPa e a tensão resistente de flexão a 70 MPa.

Já em outro grupo de pesquisa (Klock 1989), para essa mesma espécie, as idades analisadas foram de 14 e 18 anos, com madeiras de densidade 0,488 g/cm<sup>3</sup> e 0,484 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, obtendo como módulo de elasticidade à flexão valores entre 7,8 GPa e 9,7 GPa e resistência à compressão paralela as fibras variando de 18,09 MPa a 18,50 MPa.

Como é possível observar, a idade da árvore interfere, de maneira mais efetiva, nas propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e resistência à flexão. Buscando esta confirmação, Resch e Bustendorff (1978) estudaram árvores com idades iguais a 4, 5, 10 e 15 anos. Como resultado, a densidade variou de 0,41 g/cm<sup>3</sup> para 0,45 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o módulo de elasticidade à flexão variou de 4,6 GPa a 9,0 GPa e a resistência à flexão de 35 MPa a 73 MPa.

Essa mesma conclusão foi observada por Trianoski et al. (2014) em árvores com 28, 31, 32 e 35 anos de idade, cujas densidades se encontraram dentro de um intervalo entre 0,61 g/cm<sup>3</sup> e 0,67 g/cm<sup>3</sup>.

Por apresentar elevada rigidez e resistências satisfatórias quando comparadas as outras espécies de *Pinus* tropicais, o *Pinus oocarpa* é uma das

espécies preferencialmente utilizadas na fabricação de compensados. A madeira compensada adiciona a resina como nova variável importante para as propriedades físico-mecânicas e, de acordo com Leonhardt et al. (2001), pode apresentar módulo de elasticidade à flexão em torno de 6,1 GPa e 6,4 GPa, para densidade igual a 0,505 g/cm<sup>3</sup> e madeira com 10 anos de idade. Já de acordo com Menezzi et al. (2012) pode alcançar 7,5 GPa a 10,4 GPa para madeiras entre 20 e 24 anos de idade.

Um interesse vem surgindo em ensaios não destrutivos para a caracterização dos materiais. Esses ensaios podem ser repetidos ao longo do tempo para um acompanhamento mais preciso das propriedades mecânicas do elemento avaliado, não precisam de desmonte da estrutura para sua realização e, por apresentarem fácil instrumentação, são rápidos. Ensaios de ressonância através de Bing (*Beam identification by nondestructive grading*) foram realizados por Carvalho et al. (2017) em vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa*, obtendo-se um módulo de elasticidade dinâmico muito próximo ao módulo de elasticidade estático.

Segundinho et al. (2012) apresentaram duas metodologias para ensaios feitos com ressonância em vigas de madeira. A primeira a partir de vibrações longitudinais, ou seja, o corpo de prova sofre um impacto forçado na direção longitudinal da peça e, com isso, uma ou mais frequências naturais são obtidas como resposta. Já na segunda metodologia, as vibrações induzidas são transversais. Esses resultados, ao serem comparados com os valores obtidos por ensaios de flexão estática, mostraram que ensaios com vibrações longitudinais resultam em melhores estimativas.

### **2.2.2. Propriedades químicas da madeira**

A madeira é um biopolímero composto principalmente por celulose, hemicelulose (polioses) e lignina que formam a chamada parede celular. Resumidamente, a celulose é o esqueleto e a hemicelulose e a lignina são os materiais aglutinantes, onde está imersa essa celulose. Essa composição das madeiras pode ser observada na Tabela 2.1 (Klock e Andrade 2013).



Tabela 2.1 Composição média de madeiras coníferas e folhosas.

<b>Constituinte</b>	<b>Coníferas</b>	<b>Folhosas</b>
Celulose	42±2%	45±2%
Hemicelulose	27±2%	30±5%
Lignina	28±2%	20±4%
Extrativos	5±3%	3±2%

A celulose é, então, o componente principal e majoritário, formada por moléculas lineares de glicose de alto peso molecular, encadeadas através de ligações  $\beta$ -1,4 glicosídicas, tipo de ligação covalente (Lepage et al. 1989). Essas macromoléculas, por apresentarem hidroxilas livres, podem se ligar através de pontes de hidrogênio, formando cadeias celulósicas e dando origem a duas formas cristalinas conhecidas,  $I_\alpha$  e  $I_\beta$  (Klock e Andrade 2013).

Quando é observada a dominância da forma  $I_\beta$ , aquela formada por duas cadeias monoclinicas, mais comum em celulosas provenientes da madeira, tem-se uma forma cristalina mais estável (Polletto et al. 2012)<sup>a</sup>. Um arranjo organizado e bem empacotado, portanto, influencia diretamente na rigidez e promove um retardamento na degradação do material, já que o calor encontra maiores dificuldades durante a sua propagação (Poletto et al. 2012<sup>a</sup>; Poletto et al. 2012<sup>b</sup>).

Ensaio de difração de raios X e termogravimetria contribuem muito para a análise química da madeira, obtenção do grau de cristalização da celulose e, também, para a análise de outras características como o comprimento aparente e a forma cristalina dominante da celulose (Poletto et al. 2012)<sup>a</sup>.

Estudos foram realizados com *Pinus elliotti* após aquecimento por 24 horas a 105°C (Poletto et al. 2012)<sup>a</sup>, com *Pinus densiflora* por 30 minutos entre 200°C e 280°C (Wada et al.), com *Pinus taeda* por 24 horas a 70°C (Poletto et al. 2011) e com *Pinus silvestres* também por 24 horas a 70°C (Borysiak e Doczekalska 2005). Alguns difratogramas específicos para a celulose seguem apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3, demonstrando a existência dessas duas formas cristalinas da celulose.

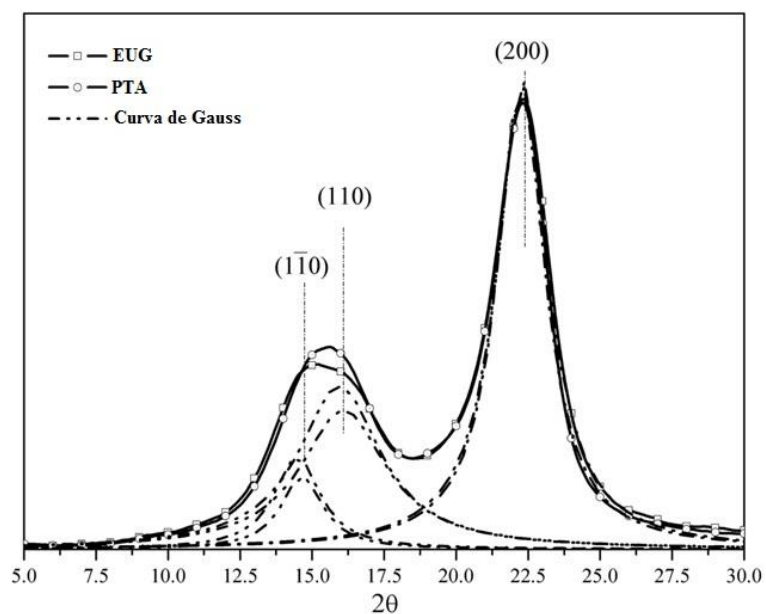


Figura 2.2 Difratoograma de raio X para madeiras das espécies *Eucalyptus grandis* (EUG) e *Pinus taeda* (PTA) aquecidas a 70°C por 24 horas (Poletto et al. 2011).

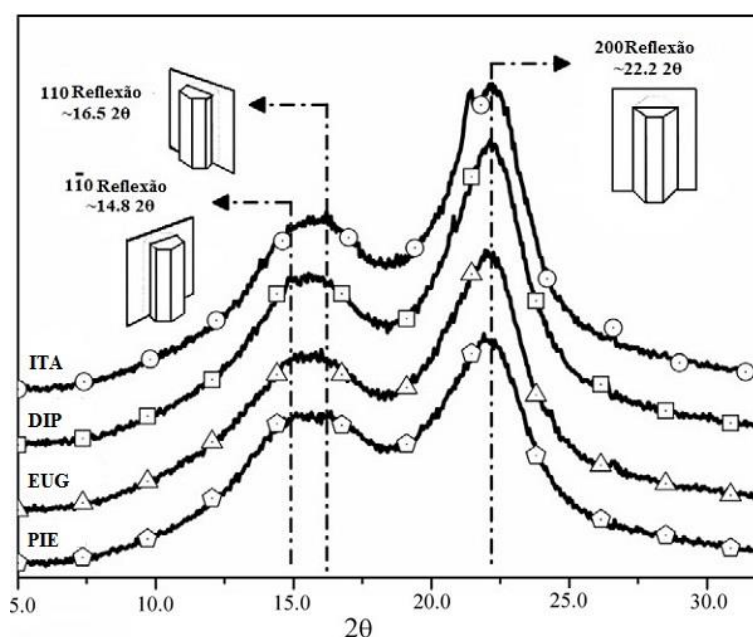


Figura 2.3 Difratoograma de raio X para madeiras das espécies *Pinus elliottii* (PIE), *Eucalyptus grandis* (EUG), *Mezilaurus itauba* (ITA) e *Dipteryx odorata* (DIP) aquecidas a 105°C por 24 horas (Poletto et al. 2012)<sup>a</sup>.

Considerando que a lignina e a hemicelulose são polímeros amorfos e termoplásticos que não apresentam forma cristalina, seus comportamentos dependem do ponto de transição vítrea, ou seja, da temperatura para a qual ocorre o amolecimento do material, com maior mobilidade das cadeias poliméricas (Reis 2012). Essa transição vítrea está ligada ao peso molecular do polímero, teor de umidade e a natureza do material (Moraes e Figueroa 2009) e se encontram entre

160°C e 220°C para a hemicelulose (Araujo et al. 2015) e entre 60 e 90°C para a lignina (Moraes e Figueroa 2009).

Quanto ao último componente da madeira, os extrativos, sua alta concentração pode significar uma aceleração no processo de degradação e uma redução na estabilidade dimensional da mesma. Isso porque os extrativos são os primeiros componentes da madeira a sofrerem alterações com o aumento da temperatura (Poletto et al.)<sup>b</sup>. Para o caso do *Pinus elliotti*, por exemplo, já foi verificado que a degradação dos extrativos se inicia entre 180°C e 200°C (Poletto et al.)<sup>b</sup>.

### 2.3.

#### A influência da temperatura nas propriedades da madeira

Algumas observações podem ser feitas conforme a madeira é submetida a temperaturas elevadas, já que despolimerizações e carbonizações ocorrem durante o processo de aquecimento. Um resumo das consequências observadas na estrutura e nas propriedades do material seguem descritas na Tabela 2.2 (Schaffer 1973).

O processo de decomposição, assim como a temperatura na qual ele se inicia, irá variar com a espécie da madeira avaliada, com os anéis de crescimento e com a umidade do material.

Utilizando-se madeira da espécie *Pinus oocarpa* com densidade igual a 0,390 g/cm<sup>3</sup> retirada de uma árvore com 18 anos, o módulo de elasticidade à flexão obtido, à temperatura ambiente, foi 2,3 MPa (Carvalho et al. 2017). Submetendo corpos de prova a uma temperatura de até 225°C por 4 horas, resultou em redução de 27% desse valor. Conforme a temperatura é aumentada, maior é a perda nas propriedades mecânicas da madeira. Isso pode ser justificado pelo fato que, em temperaturas mais baixas, a degradação se inicia pelos extrativos e carboidratos passando, em seguida, para os componentes estruturais como a hemicelulose e a celulose (Carvalho et al. 2017).

Tabela 2.2 Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte (Schaffer 1973)

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Alterações na madeira</b>
55	A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retração transversal da madeira.
110	A lignina lentamente começa a perder peso
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir e a celulose alfa começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é liberada.
160	A lignina se funde e começa a se ressolidificar.
180	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4%. A lignina da membrana de pontuação escoar.
200	A madeira começa a perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas se transformam em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada.
280	A lignina atinge 10% de perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira.
300	O cerne amolece irrecuperavelmente.
320	A hemicelulose é completamente degradada.
370	A celulose apresenta perda 83% do seu peso inicial.
400	A madeira é completamente carbonizada.

A temperatura pode, no entanto, trabalhar em favor desse material. Pesquisas foram desenvolvidas envolvendo tratamento térmico na madeira como uma maneira de melhorar a estabilidade dimensional, aumentar a durabilidade e a resistência a ataques de agentes biológicos pela diminuição da sua higroscopicidade (Araujo et al. 2015; Carvalho et al. 2017; Oumarou et al. 2015; Hong Yang et al. 2015).

As proteções mais comuns contra agentes xilófagos são as pinturas, vernizes e lacas, que precisam ser periodicamente refeitas já que são deterioradas pelos raios UV, chuvas e ciclos de umidade, além do fato de não serem biodegradáveis, apresentando materiais pesados e outras toxinas para os seres vivos.

A retificação térmica passa a ser uma solução, na qual é necessária a obtenção de uma temperatura ótima, abaixo das reações exotérmicas, em que haja pouca degradação do material e perda nas propriedades físico-mecânicas. Em contrapartida, há um ganho na estabilidade dimensional e durabilidade.

São muitas as variáveis de estudo dentro da termorreificação como o tempo de exposição, temperatura de aquecimento, assim como a umidade e pressão do meio.

Estudos foram desenvolvidos por Araujo et al. (2015) para a espécie *Pinus oocarpa*, com tempos de exposição entre 30 e 90 minutos e temperaturas entre 200°C e 240°C, concluindo-se que, quanto maior for a temperatura e o tempo de exposição, maior é a perda de massa. A temperatura ótima, para as condições específicas dessa pesquisa é, então, 200°C aplicada por 30 a 60 minutos.

## 2.4.

### Caracterização quanto a qualidade da madeira

Em busca de uma maneira de aperfeiçoar os projetos que envolvem madeira, e considerando a grande variabilidade desse material, alguns profissionais da área desenvolveram uma classificação quanto a qualidade das peças, e a denominaram de “graduação de resistência”. Algumas regiões já possuem normatizações bem desenvolvidas como é o caso da Europa com as EN338, EN384, EN408, EN1912 e EN14081-1 e internamente, a Alemanha com a DIN4074, a Espanha com a UNE56544, a França com a AFNOR B52-001-04:1991, a Suíça com a SIA 265/1:2003, a Inglaterra com as BS 4978:1996 e BS 5756:1997 e a Itália com as UNI 11035:2003 e UNI 11119:2004 (Piazza e Riggio 2008).

A resistência das peças de madeira varia com as espécies vegetais e, dentro da mesma espécie, varia de uma árvore para a outra, ou ainda, conforme a posição da amostra no tronco. Peças com maior resistência, portanto, possuem taxa de crescimento médio superior e com maior percentual de madeira escura em seus anéis (madeira de outono) (Pfeil e Pfeil 2003).

A principal classificação quanto a qualidade das vigas de madeira se dá considerando as propriedades como densidade, resistência à flexão/tração e rigidez. Essa avaliação, porém, não certifica, com absoluta certeza, exatamente qual é o grau dessa madeira, pois podem ocorrer interseções entre duas classes próximas (Ridley-ellis et al. 2016).

Esse processo classificatório pode envolver testes não destrutivos como ressonâncias e ultrassons, ensaios destrutivos como os de obtenção das resistências mecânicas, ou uma inspeção visual, tema tratado nessa seção.

A graduação visual, por ser uma análise qualitativa, é, então, uma opção adicional para a realização dessa classificação e apresenta uma grande incerteza já que envolve interpretações e opiniões de avaliadores, não podendo, assim, ser utilizada como parâmetro de modelagens computacionais.

Deste modo, os defeitos de textura influenciam enormemente na resistência das peças estruturais. A nodosidade, por exemplo, tem efeito predominante na queda da resistência à tração, também interferindo, em menor escala, na compressão e no cisalhamento. Além disso, o cerne falso (alteração de coloração nos anéis centrais), fissuras de retração e fibras reversas são outros defeitos que interferem na qualidade da madeira. Os problemas como empenamentos e fendilhamentos tendem a ser maiores em madeira de densidade mais baixa devido às tensões de crescimento.

Buscando-se obter faixas de tensões admissíveis, foram estabelecidas classificações da madeira de acordo com a incidência de defeitos. Cada uma das normas de inspeção citadas anteriormente apresenta critérios semelhantes de classificação, a diferença está na medição dos defeitos encontrados em cada peça (Almazán et al. 2008).

Durante a realização da inspeção visual, o primeiro parâmetro a ser observado é o tamanho do nó, assim como a existência de agrupamentos de nós. Outros parâmetros a serem observados são a presença de gretas, fissuras por retração e o ângulo das fibras reversas.

O Brasil classifica as coníferas em três faixas de resistência para condição-padrão de referência de umidade igual a 12% e dois grupos quando considerada a qualidade das peças primeira e segunda categorias, sendo as de primeira categoria, representadas pelas madeiras isenta de defeitos e com homogeneidade de propriedades mecânicas (ABNT NBR7190, 1997).

## 2.5.

### **Compósitos poliméricos reforçados com fibras**

Compósitos são definidos como estruturas que apresentam dois ou mais materiais em sua constituição, insolúveis entre si, que, quando combinados formam um material com propriedades melhores ou inexistentes em seus componentes individuais. Normalmente, são formados por dois constituintes, um

chamado fase matriz que é contínua, responsável pelas propriedades químicas do conjunto que envolve a outra fase, que é denominada de fase dispersa (ASTM D3878).

Podem ser divididos em três categorias de acordo com a constituição da matriz envolvida: poliméricos, metálicos e cerâmicos. Essa pesquisa trata somente de compósitos poliméricos com matriz epoxídica, ou seja, aqueles formados por resinas termorrígidas à base de epóxi. Essas são denominadas termorrígidas, pois são encontradas na forma líquida durante todo o processo de manuseio, anterior a cura, passando, em seguida, por uma fase em gel e, por fim, encontram-se na fase sólida, com ligações cruzadas formando uma rede tridimensional. Seu estado final é um produto rígido, mais estável às variações de temperatura e infusível (Zangiacomi e Bittencourt 2006).

O tipo de reforço, a matriz adotada, as concentrações (fração volumétrica) e as geometrias (arranjos geométricos) dos materiais constituintes irão influenciar nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e devem ser consideradas no projeto do material. O módulo de elasticidade, por exemplo, é diretamente proporcional à quantidade de fibras inseridas no reforço. Isso porque as propriedades mecânicas da fibra são maiores que as da matriz, logo, quanto maior a fração volumétrica das fibras, maior será o módulo de Young (Oliveira 2011).

O adesivo é o material aglomerante que deve ser capaz de ligar as fibras às vigas. Essa resina polimérica é a responsável pela transferência de esforços e proteção contra abrasão das fibras, por isso, uma interface de qualidade e uma boa área de contato entre os dois é importante. Cinco categorias de resinas podem ser encontradas no mercado: epóxi, poliuretano, poliéster, fenólicos e aminoplásticos. Dessas opções, as de base epóxi bi componentes se mostraram a melhor opção para as execuções in situ, pois apresentam boas propriedades para preencher vazios, baixa retração durante a cura e são tixotrópicas, ou seja, demoram certo intervalo de tempo para atingir uma viscosidade de equilíbrio quando submetidas a esforços de cisalhamento, sendo assim, quanto mais solicitadas, menor fica sua viscosidade (Schober et al. 2015).

Para garantir uma boa ligação e durabilidade é importante haver uma preocupação quanto ao preparo da superfície que receberá o material compósito. A mesma deve estar seca, sem poeira, livre de agentes contaminantes e apresentar mínima rugosidade para garantir uma boa aderência.

Mesmo a madeira apresentando um bom comportamento quando submetida a altas temperaturas, os adesivos à base epóxi apresentam temperatura de transição vítrea abaixo dos 100°C, o que já prejudica a eficiência do reforço e a aderência entre os materiais, assim como são rompidas algumas ligações cruzadas dos materiais poliméricos. Estudos já mostraram que, a partir dos 50°C, a matriz epoxídica pode passar a apresentar consistência emborrachada, o que induz a efeitos negativos no seu desempenho como material ligante (Corradi e Borri 2007).

### **2.5.1.**

#### **Compósitos reforçados com fibras de vidro**

Os compósitos reforçados com fibras de vidro são usados, em sua maioria, pela indústria automobilística e aeroespacial devido a uma facilidade na obtenção de diferentes formatos de compósitos e por apresentarem alta resistência, alta rigidez, excelente resistência à corrosão, alto amortecimento e dureza e baixa expansão térmica (Balaji et al. 2017).

A resistência à tração irá depender da quantidade de fibras inseridas na matriz, da maneira em que é aplicada a força (taxa de carregamento ou transição de um carregamento quase-estático para dinâmico) e da temperatura na qual estão submetidas as fibras de reforço.

Em estudos anteriores foi verificado que tecidos de fibras de vidro dispersas podem apresentar resistência da ordem de 80 MPa quando considerado 30% de fração de fibras em massa ou 90 MPa para 40%, confirmando, assim, a dependência da quantidade de fibras com a resistência à tração do compósito (Deogonda e Chalwa 2013). Essa resistência pode chegar a 100 MPa para compósitos de 60% em massa, utilizando tecidos bidirecionais com densidade de 330 g/m<sup>2</sup> (Jagannatha e Harish 2015) e até 280 MPa (módulo igual a 5,1 GPa) com a utilização de 10 camadas de fibra com densidade igual a 280 g/m<sup>2</sup> (Sanjay e Yogesha 2016).

Quanto a influência da temperatura, os compósitos de fibras de vidro, quando submetidos a temperaturas, entre 50°C e 100°C, apresentam decréscimo de resistência por causa do amolecimento da matriz epóxi envolvida (Yang et al. 2016).



## 2.5.2.

### Compósitos reforçados com fibras de juta

As fibras naturais receberam maior atenção nos últimos anos devido ao seu caráter sustentável e por também apresentarem baixo peso específico e considerável resistência. Elas vêm se tornando uma opção bastante procurada em alguns países devido ao seu baixo custo quando comparada às fibras sintéticas (Tripathy et al. 2000).

A quantidade das fibras utilizadas no compósito irá interferir diretamente na dureza, resistências à tração e ao impacto e, inversamente, na concentração de vazios do material. Quanto maior for a quantidade de vazios, portanto, menor é a sua resistência à flexão e ao cisalhamento entre camadas de tecido bidirecional (Mishra e Biswas 2013).

Estudos foram realizados para verificar o aumento na resistência à tração e no módulo do compósito de matriz epoxídica quando se varia a concentração de fibras de tecido bidirecional de juta de 0 a 48% em massa. A resistência é acrescida de 43 MPa a 110 MPa, enquanto o módulo de 0,15 GPa a 4,45 GPa (Mishra e Biswas 2013).

Comparando esses valores com os obtidos por outros grupos de estudo, é possível perceber a grande variabilidade existente quando se trabalha com fibras naturais. É um material não homogêneo, que pode apresentar vazios, problemas de aderência e, até mesmo, imperfeições iniciais. Sendo assim, outra análise foi feita por Raghavendra et al. (2014), com 18,5% em massa de fibras de juta bidirecionais, obtendo resistências de 48 MPa Já Sanjay e Yogesha (2016) encontraram resistência à tração igual a 50,64 MPa (módulo igual a 2,2 GPa) quando utilizadas seis camadas de tecido fibra de juta bidirecional.

Valores ainda menores foram encontrados por Islam et al. (2016) com 30% e 40% em massa de fibras. As resistências à tração obtidas foram de 35,77 MPa e 39,67 MPa, respectivamente.

Gopinath et al. (2014) adicionaram uma nova variável de comparação que seria o tratamento da superfície das fibras com NaOH. O compósito foi feito com 18% em massa de fibras lineares de juta e as resistências variaram de 12,46 MPa para 10,5 MPa com 5% e 10% de NaOH, respectivamente, e módulo à tração de 1,04 GPa.

Quando comparado com o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras de vidro, conclui-se que a resina sozinha apresenta comportamento frágil. Quando acrescido fibras de vidro, o comportamento passa para frágil a semi-frágil enquanto que com fibras de juta, permanece frágil.

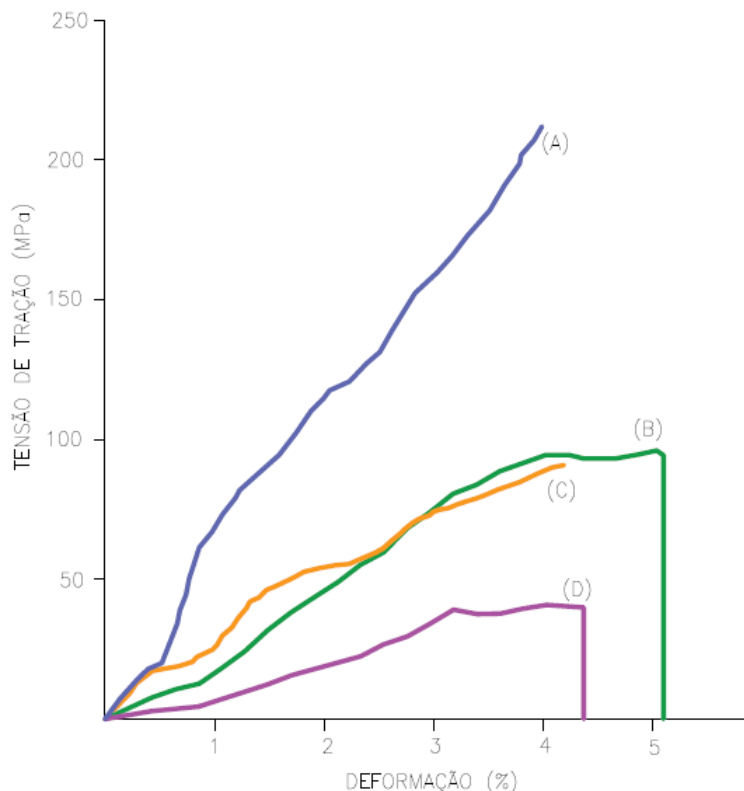


Figura 2.4 Diagramas tensão-deformação para compósitos formados por (A) 10 camadas de tecido de fibras de vidro bidimensionais com densidade 280 g/m<sup>2</sup> (Sanjay e Yogesha 2016), (B) 40% de tecido de fibras de vidro dispersas (Islam et al. 2016), (C) 6 camadas de tecido de fibras de juta bidimensionais (Sanjay e Yogesha 2016) e (D) 40% de tecido de fibras de juta bidimensionais (Islam et al. 2016).

## 2.6.

### Utilização de reforço em peças de madeira submetidas à flexão

As primeiras pesquisas envolvendo reforço de peças existentes de madeira surgiram para restaurar ou reforçar vigas de piso de edificações antigas. Os materiais mais comumente utilizados são as fibras de carbono e as de vidro, já que ambas apresentam alta resistência, baixo peso, neutralidade eletromagnética e bom desempenho contra corrosão. Fiorelli e Dias (2003) buscaram não só reparar vigas existentes, como minimizar o aparecimento de futuras patologias. Os autores encontraram uma equivalência próxima entre 0,4% em massa quando utilizados compósitos de fibra de carbono e 1% de fibra de vidro para alguns casos de reforço ensaiados com madeiras da espécie *Pinus caribea*. No geral, os

resultados foram superiores aos esperados pelo modelo analítico por eles adotado e houve aumento de ductilidade, rigidez e resistência. Observou-se que a ruptura das peças reforçadas ocorreu com compressão da zona acima da linha neutra e em um segundo momento, por tração e cisalhamento. O reforço poderia estar minimizando algumas desvantagens provocadas pelos defeitos da madeira, reduzindo, então, a possibilidade de uma ruptura por tração (Fiorelli e Dias 2003).

Essa mesma interpretação foi obtida por Corradi et al. (2017), que buscaram trabalhar com duas espécies de madeira mais comuns do Reino Unido. Peças de abeto (*softwood*) e madeira de carvalho (*hardwood*) foram reforçadas com tecidos unidirecionais de carbono e vidro em suas faces inferiores. Além de reduzir o impacto negativo que os defeitos da madeira podem provocar na resistência à flexão, o reforço também promoveu ganho na capacidade de carga e na ductilidade (Corradi et al. 2017).

Esse aumento na ductilidade pode ser justificado, então, pelo uso do reforço com polímeros reforçados com fibras (FRP) que promoveu a possibilidade de plastificação das fibras comprimidas, o confinamento localizado de fissuras e a elaboração de pontes em defeitos localizados.

O maior desafio de se trabalhar com material orgânico, entretanto, é a heterogeneidade dos resultados. Da base de dados utilizada para a elaboração desta pesquisa, o estudo que envolveu o maior número de corpos de prova teve duzentos e vinte e uma vigas ensaiadas e, mesmo conseguindo realizar uma análise com uma grande quantidade de amostras, os coeficientes de variação obtidos chegaram a 35% nas espécies que não receberam reforço (Corradi et al. 2017).

Essa grande variabilidade nas forças últimas e nos módulos de elasticidade obtidos em pesquisas experimentais estão diretamente ligados ao caráter heterogêneo e anisotrópico deste material que influencia, também, nos modos de ruptura à flexão das peças.

Dependendo da qualidade da madeira, é possível que a ruptura da viga ocorra nas fibras tracionadas com a simultânea plastificação das fibras comprimidas, exatamente o que foi obtido por Fiorelli e Dias (2003) para a situação reforçada. Com a presença do reforço, a região comprimida pode atingir deformações maiores já que a posição da linha neutra é transladada mais para

baixo, aumentando as deformações relativas na zona comprimida (Fiorelli e Dias 2003).

Borri et al. (2005), sem conhecerem previamente a espécie da madeira com a qual estavam trabalhando, observaram um comportamento não linear antes da fratura, com compressão das fibras superiores, em corpos de prova não reforçados. Além de reforçar as vigas com tecidos de fibra de carbono e matriz epoxídica, a pesquisa se baseou, também, em obter um comparativo entre as conformações de reforços (duas e três camadas coladas ao fundo da viga de maneira centralizada e duas camadas coladas nas quinas inferiores da viga com formato de cantoneiras), tecido pré-tensionado e a utilização de compósitos em formato de barras (Antonio Borri et al. 2005). Houve um aumento de rigidez, ductilidade e resistência à flexão nas vigas reforçadas com duas camadas de fibras de carbono que foram intensificados com a deposição de mais uma camada de reforço. Já para o reforço no formato de cantoneiras, o aumento na rigidez e carga máxima foram próximos ao do reforço em três camadas. Esta conclusão, porém, não pode ser atribuída unicamente ao posicionamento do compósito, já que a área da seção transversal do reforço, assim como o seu momento de inércia, não eram iguais nos três casos.

Uma melhoria na eficiência do reforço poderia ser conquistada com o pré-tensionamento do material FRP, ou seja, a força excêntrica e externa de tração aplicada nas fibras induz tensões contrárias de compressão nas vigas de madeira favorecendo que seja alcançado o início da plastificação da zona comprimida antes da ruptura da peça, aumentando a resistência à flexão. No entanto, a utilização de tecidos pré-tensionados, cujo objetivo era o aumento das rigidezes das peças, não promoveu o incremento esperado, se mantendo próximas das vigas sem a pré-tensão.

Por último, para os casos analisados com reforço em barras, o desempenho foi inferior àqueles onde tecidos foram utilizados, fato que pode ser atribuído aos pequenos danos provocados pelo corte e inserção das barras ou pela falta de pontes nos locais onde há a presença de fissuras.

Yeou Fong et al. (2009) reforçaram vigas de madeira das espécies *Tsuga chinensis* e *Cunninghamia lanceolata* com uma, duas e três camadas de tecido de fibra de carbono e matriz de base epóxi, confirmando incremento na resistência à

flexão e uma redução no deslocamento vertical relativo do meio do vão com o acréscimo de camadas de reforço.

Schober e Rautenstrauch (2006), também comparando as conformações de reforço, encaminharam seu estudo com vigas antigas da região da Bavária, na Alemanha, utilizando-se de lâminas pultrudadas de fibras de carbono. Devido ao número baixo de amostras e à grande variabilidade nos resultados, não foi possível concluir o esquema de reforço mais eficiente. Todas as opções, porém, trouxeram aumento na ductilidade e força última (Schober e Rautenstrauch 2006).

Contrariamente ao que foi constatado pela maioria, García et al. (2013) verificaram que o acréscimo de camadas de reforço de fibras unidirecionais de carbono em vigas da espécie *Pinus sylvestris* não promoveu incremento na capacidade de carga quando comparado com peças reforçadas com apenas uma camada. Incremento foi observado, no entanto, com a utilização de tecidos bidirecionais.

Se o reforço for executado ao redor de toda a seção transversal, também com tecido de fibra de carbono, é possível obter um aumento no módulo de elasticidade e incremento na resistência à flexão de peças de madeira. Ensaios foram realizados por Gezer e Aydemir (2010) em espécies *Pinus sylvestris* ou *Abies nordmanniana*, espécie de abeto caucasiano da Turquia. A porcentagem de aumento desta resistência está diretamente relacionada com a área da seção transversal da viga reforçada, ou seja, para peças menores, a porcentagem de aumento é maior que para peças de grandes dimensões.

Essas diferentes concepções de reforço podem interferir no modo de ruptura das peças de madeira, reduzindo a ocorrência de alguns casos como, por exemplo, por cisalhamento. Reforços do tipo U, os que envolvem completamente as seções transversais, ou os que são prolongados até o apoio tratam-se de opções de conformação que podem ser cogitadas durante o processo de reforço (Johns e Lacroix 2000).

Em vez de serem colados tecidos bidirecionais, podem ser solidarizadas lâminas ou chapas de material pultrudado na região tracionada da viga. A metodologia de reforço passa a ser executada integralmente no interior da seção transversal das vigas de madeira – técnica *near surface mounted* (NSM).

Em vigas de Pinho reforçadas com lâminas de carbono, por exemplo, foi possível aumentar suas capacidades de carga máximas mesmo com a simulação de

fendas nas laterais dessas vigas (Jankowski et al. 2010). Com o aumento do número de lâminas inseridas na seção transversal das vigas, após um valor ótimo, há uma diminuição do incremento da capacidade de carga. Isso pode ser justificado pela dificuldade de preparação da peça a ser reforçada, limpeza da superfície, colagem das lâminas e efetivação da ligação madeira-resina-lâmina, mesma justificativa dada por Borri et al. (2007) quando estudaram a inserção de barras de carbono na região tracionada de vigas antigas de madeira. A pré-tensão se mostrou a solução com melhores resultados experimentais e de maior eficácia desse sistema de reforço. Sua execução *in loco*, porém, ainda não possui boa aplicabilidade devido à dificuldade de ancoragem sem que exija desmonte completo do piso (Jankowski et al. 2010; Nowak et al. 2013).

Essas melhorias nas propriedades mecânicas de vigas reforçadas com lâminas de carbono também podem ser verificadas em vigas previamente danificadas. D'Ambrisi et al. (2014) romperam vigas extraídas de uma antiga casa na Itália e, após fratura, inseriram nessas vigas duas lâminas de carbono posicionadas na zona tracionada como metodologia de reparo. Mesmo que a rigidez das peças reparadas não tenha atingido o valor inicial, houve um restauro completo quanto à resistência à flexão (D'Ambrisi et al. 2014).

O acréscimo de chapas metálicas é a opção mais usual para reforço de peças de madeira, tanto em vigas de piso, quanto em banzos tracionados de treliças deterioradas, justamente por ser um material conhecido pelos projetistas. Normalmente, sua fixação envolve pinos e não adesivos com base epóxi. Jasienko e Nowak (2014), analisando o comportamento de vigas reforçadas com chapas de aço coladas com resina epóxi, verificaram problemas com descolamento dessas chapas dependendo da posição em que o reforço era inserido. Caso a chapa fosse colada no topo da viga ou nas laterais da mesma, a ruptura da peça era acompanhada pelo descolamento das chapas devido a sua flambagem. Mesmo com esse desprendimento, houve ganho significativo na capacidade de carga à flexão e rigidez de vigas de *Pinus sylvestris*, intensificados ainda se as vigas fossem novas (Jasieńko e Nowak 2014).

Em uma comparação com o uso de chapas de aço, as lâminas de carbono são mais leves, mais resistentes à corrosão e apresentam menor condutividade térmica, assim como sua porcentagem de utilização, ou seja, a razão entre a

solicitação e a resistência são bem menores (Jankowski et al. 2010; Jasieńko e Nowak 2014).

Buscando um avanço tecnológico em termos de materiais e considerando a desvantagem da utilização de chapas metálicas como reforço para o peso próprio da estrutura, Borri e Corradi (2011) estudaram a influência da utilização de fibras de aço aderidas com auxílio de resina epóxi bi componente tixotrópica sem solventes, na zona tracionada de vigas de madeira das espécies *Abies alba* e *Quercus sessiliflora*. Dois tipos diferentes de fibras de aço foram ensaiados, diferenciados pela quantidade de filamentos (densidade) e o diâmetro das cordas, ambos formados por filamentos em hélice e com tratamento em bronze para prevenir oxidação e melhorar a adesão fibra-matriz. A maior parte das rupturas observadas neste estudo ocorreu em pontos frágeis da madeira, onde se observava algum defeito da peça, como nós, fendas devido à retração e fibras reversas. Não houve problemas com aderência e descolamento do sistema de reforço e, assim, a fibra agiu controlando a abertura da fissura, realizando pontes nos principais locais com defeitos e confinando possíveis rupturas. As vigas que não receberam reforço apresentaram comportamento elástico linear até o momento da ruptura enquanto as reforçadas com rigidez semelhantes aos do grupo controle, só apresentaram diferença de comportamento após força limite do regime elástico onde se observou um comportamento não linear que pode ser justificado pela ativação das fibras de aço e consequente plastificação da zona comprimida das vigas de madeira (Borri e Corradi 2011).

Nos últimos anos, o material que vem ganhando destaque devido ao baixo custo, baixo consumo de energia para produção, baixa eliminação de gases poluente e grande apelo sustentável, são as fibras naturais, objeto de estudo desta pesquisa.

Mesmo apresentando muitos fatores positivos para sua utilização, fibras naturais como de cânhamo, basalto e linho, assim como a madeira, também são materiais orgânicos e podem apresentar grande variabilidade nos resultados. Ainda assim, as fibras ainda promovem melhorias quanto à rigidez e resistência, proporcionando resultados mais homogêneos quando o reforço se encontra presente (Speranzini and Tralascia 2010).

Sarrafos e vigas da espécie *Abies Alba* foram reforçados com quatro tipos de fibras naturais, três delas unidirecionais, de basalto, linho e bambu, e a última, um

tecido bidirecional de cânhamo. Para os sarrafos com seção transversal de 4x5 cm, foi utilizada uma camada de fibra de basalto, linho ou cânhamo na face inferior das peças. Todas as três apresentaram maior resistência à flexão (23% a 35%) e maior flecha na força última que os sarrafos não reforçados. Os resultados foram próximos, sendo que o da fibra de linho apresentou maior eficiência, justificada pelas maiores densidade e resistência à tração desse tipo de fibra. Já as vigas com seção 20x20 cm foram divididas em duas categorias de qualidade devido à presença de nós, desvios nas fibras e fendas (Borri et al. 2013).

Por apresentarem seções transversais maiores, reafirmam o que foi dito por Gezer e Aydemir (2010), ou seja, a influência do reforço é menor conforme aumenta-se a seção transversal. Além da dimensão, outro fator que irá influenciar na resposta do reforço é a presença de imperfeições na madeira. Peças previamente classificadas como de baixa qualidade apresentaram um aumento de, no mínimo, 38% na resistência a flexão, enquanto que as de boa qualidade ficaram em torno de 26% (Borri et al. 2013).

O reforço feito com duas camadas de fibras de basalto ou de linho apresentou valores próximos de aumento na capacidade de carga. Contudo, com o acréscimo de uma terceira camada, houve perda de resistência. Enquanto isso, utilizando sete camadas de fibras de bambu, obteve-se valores próximos, porém, ainda inferiores aos das demais fibras, se mostrando material pouco eficiente para essa aplicação (Borri et al. 2013).

Fibras de basalto unidirecionais também foram estudadas por Garcia et al. (2013) que reforçaram peças de madeira mais curtas (comprimento igual a 1,0 metro e seção transversal igual a 7,8x15,5 cm) da espécie *Pinus Sylvestris* com duas gramaturas diferentes. Ensaio com peças curtas acabam divergindo um pouco do que é usualmente obtido em escala real, já que a seleção do material pode ser mais bem realizada e defeitos nas peças evitados. Os resultados obtidos, que não acompanharam os conceitos dos trabalhos anteriores realizados com polímeros reforçados com fibras, e que não foram justificados no decorrer do trabalho, apresentaram forças últimas menores com maiores densidades das fibras de basalto.

Em geral, o aumento na rigidez de peças de madeira reforçadas com FRP pode ocorrer e gira em torno de 30%. Corradi e Borri (2007) utilizaram em sua pesquisa a situação de uma edificação tombada do século XVII, chamada *Palazzo*



*Collicola*, que havia sofrido danos estruturais devido a um terremoto. Por determinação do órgão tombador e devido à estética da estrutura, eles não puderam inserir o reforço na zona tracionada das vigas optando, então, pelo reforço com peças pultrudadas na zona comprimida. Essas peças solidarizadas as vigas (Figura 2.5) geraram um aumento na rigidez de mais de 200% e um comportamento linear elástico durante a flexão, já que, devido à presença do perfil pultrudado, tornou-se impossível a plastificação. A fibra de vidro é economicamente competitiva com os demais materiais de reforço, pois apresenta elevadas propriedades mecânicas com um custo menor.



Figura 2.5 Perfis pultrudados com formatos em H ou I utilizados como reforço na zona comprimida no estudo de Borri e Corradi (2007).

A preparação da superfície é importante para garantir a penetração da resina epóxi na madeira e, com isso, a colagem efetiva do reforço com o material reforçado. Caso, com auxílio de uma análise microscópica, perceba-se que essa penetração é insignificante, uma ancoragem mecânica pode ser executada com auxílio, por exemplo, de chumbadores (Corradi e Borri 2007).

Outra justificativa para pesquisas que envolveram reforço de peças existentes de madeira surgiu com o intuito de aumentar a capacidade resistiva, assim como a rigidez de vigas de pontes ferroviárias e rodoviárias. Para alguns países, a utilização de vigas de madeira em obras de infraestrutura é muito comum devido à abundância do material, baixo custo e o legado de desenvolvimento da região.

É usual ocorrer uma degradação da estrutura com o passar do tempo, ou, então, um aumento do tráfego na ponte. Caso algum desses fatores ocorra, se torna necessária a substituição ou o reforço da estrutura existente. Sendo assim, Gentile et al. (2000), percebendo o insucesso de pesquisas anteriores envolvendo materiais poliméricos reforçados com fibras, analisaram a influência do reforço em barras de fibra de vidro inseridas na zona tracionada de vigas de pontes no

Canadá. Através de sua pesquisa experimental, foi possível perceber que o comportamento na flexão das vigas de madeira da espécie por ele estudada era frágil e apresentava ruptura brusca da zona tracionada e, após recebimento do reforço, passou a ser dúctil com modo de ruptura a compressão (Gentile et al. 2000).

Já Humphreys e Francey (2010) estudaram como opção alternativa de reforço a utilização de materiais compósitos com fibras de carbono em dormentes de pontes ferroviárias. A justificativa do trabalho era o aprimoramento do conhecimento sobre materiais compósitos, a facilidade na laminação das fibras e, a vantagem econômica de se reparar pontualmente os dormentes em vez de se substituir todo o sistema estrutural. Mesmo verificando um aumento na capacidade de carga dos dormentes, a ruptura aconteceu com descolamento da fibra de reforço, o que pode indicar má preparação da superfície já que foram utilizados dormentes existentes bastante degradados.

Esse tipo de descolamento das fibras de reforço não foi observado em nenhuma outra pesquisa utilizada como base para esta revisão bibliográfica.

Mesmo a madeira apresentando variadas espécies, estruturas e propriedades mecânicas, foi possível observar que a utilização do reforço, na maior parte dos casos, gerou aumento na capacidade de carga das vigas à flexão, aumento da rigidez e ductilidade que pode ser intensificado dependendo da porcentagem de reforço utilizada. Além disso, o uso do reforço minimiza os impactos negativos que os defeitos da madeira podem causar, assim como a dispersão dos resultados.

### 3

## Estudo teórico do comportamento estrutural de vigas de madeira reforçadas

### 3.1.

#### Modelo básico de seção composta (método da seção transformada)

Sabendo-se que a fórmula clássica da tensão [3.1] em uma viga submetida à flexão é válida para seções homogêneas, o modelo de cálculo desta seção modifica, ou “transforma”, a seção transversal das vigas reforçadas em uma seção feita por um único material e, com isso, a fórmula [3.1] passa a ser válida.

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad [3.1]$$

Considerando que a área transversal total permanecerá plana após a flexão (hipótese de Navier/Bernoulli) e, assim, as deformações variarão de zero a máxima, da linha neutra às fibras mais externas, e que os materiais envolvidos apresentam comportamento linear elástico, a lei de Hooke pode ser aplicada para ambos os materiais e um fator de transformação  $n$  [3.2] pode ser adotado para modificar a viga de seção composta estudada por uma de um só material. Logo, a largura da seção inicial de um dos dois materiais envolvidos é alterada do valor  $b$  para o valor  $nb$ .

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad [3.2]$$

Assim que a nova seção transversal homogênea é encontrada, a distribuição das tensões normais passa a ser linear e o centroide, do mesmo modo que o momento de inércia, podem ser calculados e aplicados na fórmula [3.1].

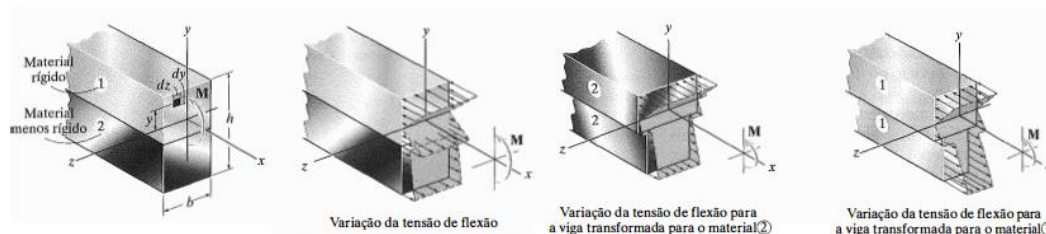


Figura 3.1 Diagramas de tensão para vigas de seção transversal composta exemplificando o método da seção transformada (Hibbeler 2010).

Por ser um modelo simplificado, que considera materiais de comportamento linear elástico até a ruptura, as previsões de resistência obtidas através desta metodologia de cálculo são menores que as encontradas experimentalmente e, por isso, conservadora.

### 3.2.

#### Modelo bilinear elasto-plástico (com patamar de plastificação)

Um segundo modelo de cálculo considera que a madeira, quando submetida a tensões de tração, apresenta comportamento linear até a ruptura, enquanto que, para compressão, o comportamento é linear até a deformação correspondente ao limite de proporcionalidade, seguido por um patamar de plastificação até a ruptura conforme apresentado na Figura 3.2 abaixo.

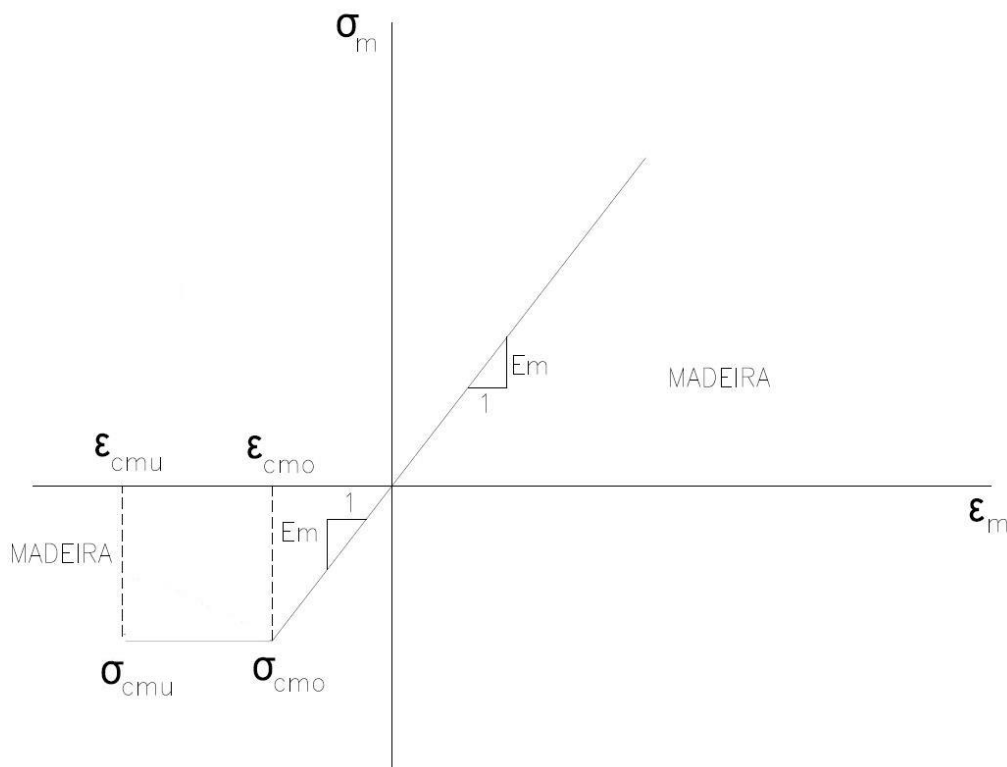


Figura 3.2 Diagrama tensão deformação da madeira considerando módulo de elasticidade à tração igual ao de compressão.

Este modelo considera que a seção transversal total permanecerá plana após a flexão (hipótese de Navier/Bernoulli) e que, as tensões podem ser obtidas a partir do diagrama tensão deformação apresentado na Figura 3.2.

Para obtenção do momento da viga quando a mesma estiver submetida à flexão, deve ser realizado o equilíbrio das forças ( $\Sigma F=0$ ), conforme indicado na Figura 3.3 e expresso pelas equações [3.3] a [3.6].

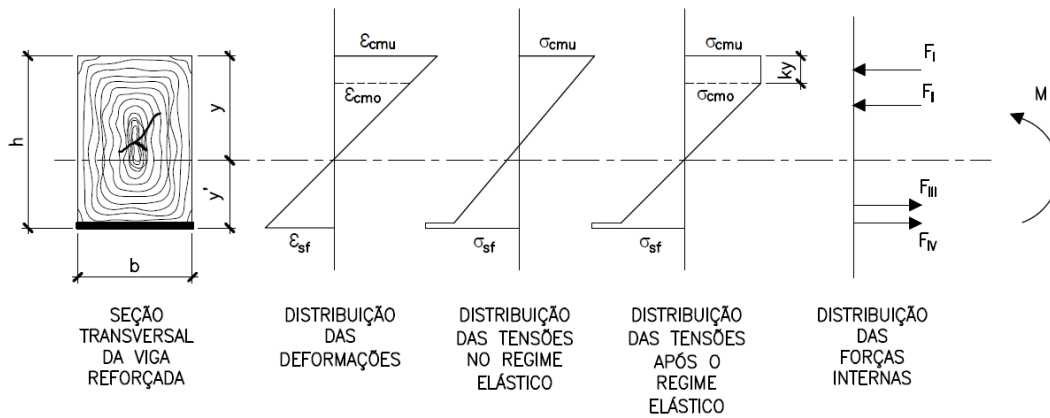


Figura 3.3 Distribuições de deformações, tensões e forças para seções transversais de vigas reforçadas (Borri e Corradi 2011).

$$F_I = \sigma_{cmu}kyb \quad [3.3]$$

$$F_{II} = \sigma_{cmo} \frac{(y-ky)b}{2} \quad [3.4]$$

$$F_{III} = \varepsilon_{smu}E_{ms} \frac{y'b}{2} \quad [3.5]$$

$$F_{IV} = \varepsilon_{sf}E_{sf}tb \quad [3.6]$$

Para  $\varepsilon_{cmu}$  a deformação última das fibras comprimidas da madeira,  $E_{mc}$  o módulo de elasticidade à compressão da madeira,  $E_{ms}$  o módulo de elasticidade à tração da madeira,  $k$  a razão da região onde ocorre a plastificação pela altura da viga,  $y$  a distância da fibra superior mais externa à linha neutra,  $y'$  a distância da fibra inferior mais externa da viga de madeira até a linha neutra,  $\varepsilon_{smu}$  a deformação última das fibras tracionadas da madeira,  $\varepsilon_{sf}$  a deformação última do material compósito,  $E_{sf}$  o módulo de elasticidade à tração do compósito e  $t$  a espessura do compósito colado ao fundo das vigas.

Por fim, com o momento obtido, o mesmo é dividido pela curvatura na flecha máxima [3.7], resultando-se, assim, na rigidez da madeira à flexão.

$$EI = \frac{M}{\frac{24\delta}{L^2 \left( 3 - 4 \frac{a^2}{L^2} \right)}} \quad [3.7]$$

As previsões teóricas obtidas por Borri e Corradi (2011) com esse segundo método de cálculo chegam a valores cerca de 30% maiores que os obtidos experimentalmente. Assim, o estudo de um outro modelo é necessário.

### 3.3.

#### Modelo bilinear elasto-plástico (método de Bazan-Buchanan) (Buchanan 1990)

Um terceiro modelo de cálculo considera que a madeira, quando submetida a esforços de tração, apresenta comportamento linear elástico até a ruptura (Figura 3.4) representado na equação [3.8].

$$\sigma_{sm} = E_m \varepsilon_{sm} \quad [3.8]$$

Já quando submetida à compressão, apresenta comportamento linear até um ponto de limite de proporcionalidade e, após esse ponto, um comportamento não linear (Figura 3.4) conforme apresentado nas equações [3.9], [3.10] e [3.11] a seguir.

$$\sigma_{cm} = E_m \varepsilon_{cm} \text{ para } 0 \leq \varepsilon_{cm} < \varepsilon_{cmo} \quad [3.9]$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{cmo} - m(\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cmo}) \text{ para } \varepsilon_{cmo} \leq \varepsilon_{cm} \quad [3.10]$$

$$m = \frac{\sigma_{cmo} - \sigma_{cmu}}{\varepsilon_{cmu} - \varepsilon_{cmo}} \quad [3.11]$$

Por último, o compósito utilizado como reforço é considerado como um material linear elástico até a ruptura com relação tensão-deformação conforme equação [3.12] a seguir.

$$\sigma_{sf} = E_{sf} \varepsilon_{sf} \quad [3.12]$$

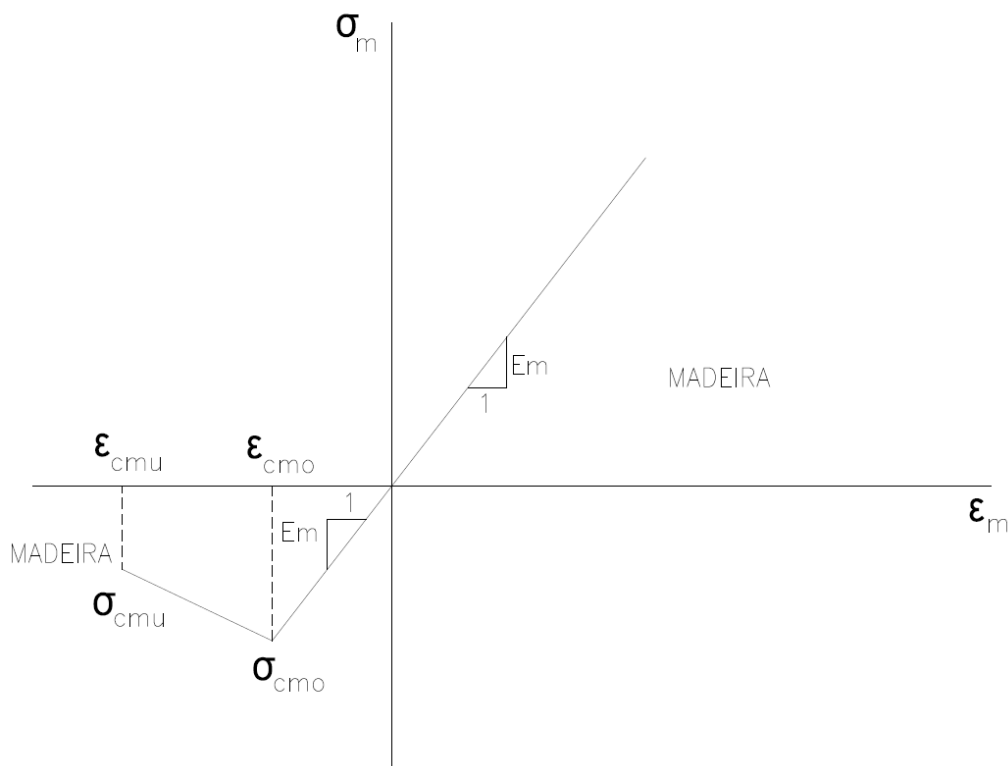


Figura 3.4 Diagrama tensão deformação da madeira (Corradi e Borri 2007).

Este modelo também considera que a seção transversal total permanecerá plana após a flexão (hipótese de Navier/Bernoulli) e que as tensões podem ser obtidas a partir do diagrama tensão-deformação da Figura 3.4.

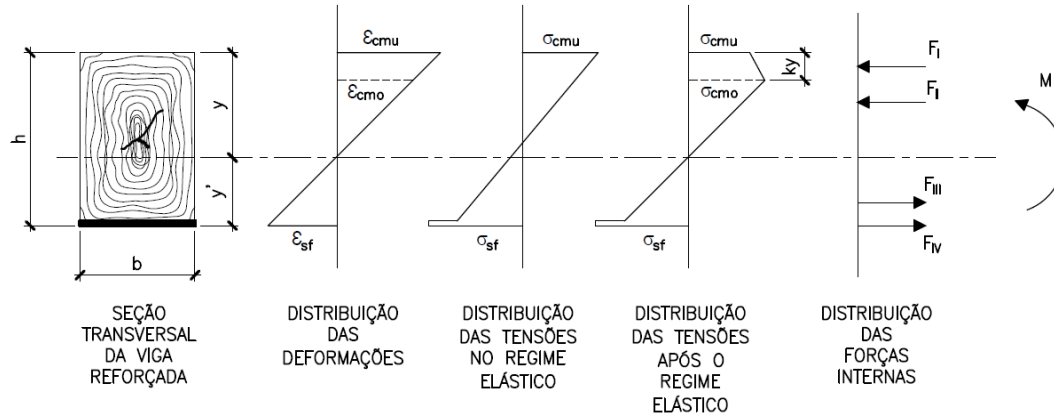


Figura 3.5 Diagramas de tensão-deformação para seções transversais de vigas (Antonio Borri et al. 2005; Corradi e Borri 2007)

Para obtenção da tensão na viga quando a mesma estiver submetida à flexão, deve ser realizado o equilíbrio das forças ( $\Sigma F=0$ ), conforme indicado na Figura 3.5 e nas equações [3.13] a [3.16].

$$F_I = (\varepsilon_{cmu} E_{mc} + \varepsilon_{cmo} E_{mc}) \frac{kb}{2} \quad [3.13]$$

$$F_{II} = \varepsilon_{cmo} E_{mc} \frac{y(1-k)b}{2} \quad [3.14]$$

$$F_{III} = \varepsilon_{smu} E_{ms} \frac{y'b}{2} \quad [3.15]$$

$$F_{IV} = \varepsilon_{sf} E_{sf} tb \quad [3.16]$$

Para  $\varepsilon_{cmu}$  a deformação última das fibras comprimidas da madeira,  $E_{mc}$  o módulo de elasticidade à compressão da madeira,  $E_{ms}$  o módulo de elasticidade à tração da madeira,  $\varepsilon_{cmo}$  a deformação da madeira no início da plastificação,  $y$  a distância da fibra superior mais externa à linha neutra,  $k$  a distância em que ocorre a não linearidade da tensão na seção transversal,  $y'$  a distância da fibra inferior mais externa da viga de madeira até a linha neutra,  $\varepsilon_{smu}$  a deformação última das fibras tracionadas da madeira,  $\varepsilon_{sf}$  a deformação última do material compósito,  $E_{sf}$  o módulo de elasticidade à tração do compósito e  $t$  a espessura do compósito colado ao fundo das vigas.

As previsões teóricas com esse terceiro método de cálculo são menores quando comparada ao método da seção transformada. Esta é uma boa

aproximação do que se vê na prática, com erro de apenas 4% (Antonio Borri et al. 2005).

Outras aproximações foram encontradas na literatura como, por exemplo, o modelo com aproximação quadrática, método de Kollmann e Côte (1968), que proporcionaram resultados para a rigidez das vigas cerca de 10% maiores que os valores encontrados experimentalmente (Li et al. 2009).



## **4**

### **Programa experimental**

#### **4.1.**

##### **Introdução**

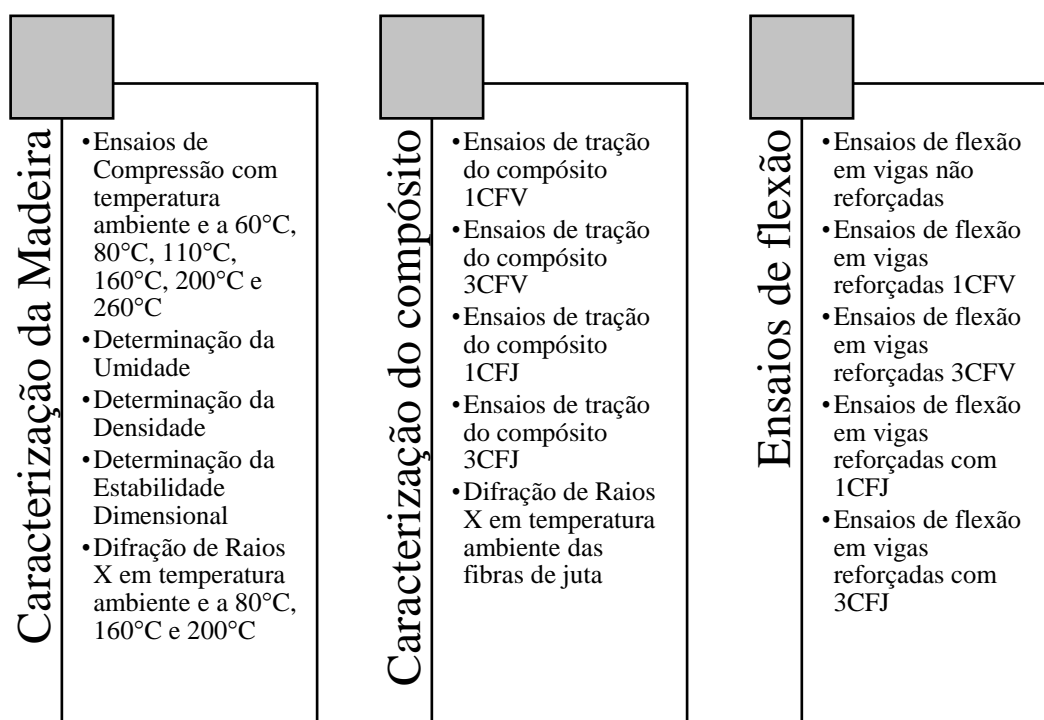
Neste capítulo são apresentadas as características e as propriedades dos materiais utilizados para confecção das vigas do programa experimental, as dimensões das mesmas, a descrição das etapas de aplicação do reforço, o esquema de ensaio à flexão e sua instrumentação, além de todas as etapas importantes para a realização destes ensaios.

Além do estudo à flexão de vigas reforçadas e não reforçadas, foi realizada análise da influência da temperatura na composição química da madeira e, também, para a sua resistência à compressão.

Foram adotados códigos para nomear os grupos ensaiados, conforme descrito a seguir:

1. 1CFV: 1 camada de fibra de vidro
2. 3CFV: 3 camadas de fibra de vidro
3. 1CFJ: 1 camada de fibra de juta
4. 3CFJ: 3 camadas de fibra de juta

Todos os ensaios e procedimentos referentes a este estudo seguem apresentados nas seções a seguir e foram listados no Quadro 4.1.



Quadro 4.1 Organização dos ensaios realizados para desenvolvimento da pesquisa.

## 4.2.

### Ensaio de caracterização dos materiais

#### 4.2.1.

##### Madeira

A madeira utilizada no programa experimental foi adquirida junto à empresa *Fibrolar Madeiras e Compensados Ltda.* Indicada como da espécie *Pinus oocarpa* e com volume total do lote igual a 1,80m<sup>3</sup>. O material foi recebido pela PUC-Rio no dia 04 de agosto de 2015.

#### 4.2.1.1.

##### Ensaios físicos

#### 4.2.1.1.1.

##### Umidade

Os 12 corpos de prova com dimensões nominais iguais a 2,0x3,0 cm e comprimento (Figura 4.1), na direção das fibras, de 5,0 cm, foram extraídos com auxílio de uma serra circular *Makita MLS100* Ø255 mm. Estas amostras foram

extraídas aleatoriamente do lote, de regiões sem defeitos e longe dos extremos das vigas.

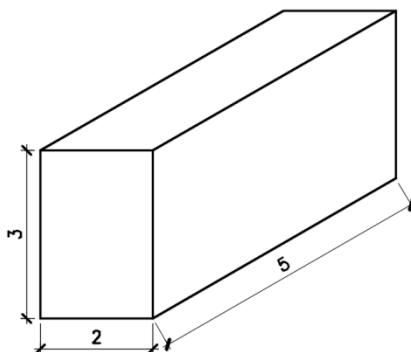


Figura 4.1 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de umidade (dimensões em cm).

Para a determinação da umidade foram feitas leituras das massas iniciais dos corpos de prova, conforme determinado na ABNT NBR7190:1997, através de uma balança *Prix 9094 Plus* com precisão igual a 0,01g. Com auxílio de uma estufa micro processada para esterilização e secagem da *Sterelifer* (temperatura máxima 200°C), foram aquecidos os corpos de prova à 103°C, aproximadamente, sendo, em seguida, realizadas novas leituras das massas de 6 em 6 horas até estabilização da mesma.

A umidade pode ser calculada conforme a fórmula [4.1] abaixo.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad [4.1]$$

Onde  $m_i$  é a massa inicial do corpo de prova e  $m_s$  é a massa final do corpo de prova após sua estabilização por secagem.

#### 4.2.1.1.2.

##### Densidade básica

Os 12 corpos de prova utilizados para o ensaio de umidade foram aproveitados para a determinação da densidade básica conforme procedimento indicado no anexo B da ABNT NBR7190:1997.

Para a determinação da densidade básica, foram feitas leituras das massas secas dos corpos de prova, através de uma balança *Prix 9094 Plus* com precisão igual a 0,01g e do volume saturado com um paquímetro eletrônico *Digital Caliper* da *Shan* de precisão de 0,01 mm.

A densidade básica pode ser calculada conforme a fórmula [4.2] abaixo.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad [4.2]$$

Onde  $m_s$  é a massa seca do corpo de prova, ou seja, massa constante obtida após aquecimento da peça e  $V_{sat}$  é o volume saturado, aquele determinado pelas dimensões finais do corpo de prova submerso em água até que atinja massa constante ou com, no máximo, variação igual a 0,5% em relação a medida anterior.

#### 4.2.1.1.3.

##### Estabilidade dimensional e variação volumétrica

6 corpos de prova com dimensões nominais iguais a 6,0x7,0 cm e comprimento, na direção das fibras, de 9,2 cm, foram realizados com uma serra circular *Makita MLS100*  $\Phi 255$  mm garantindo a visualização de pelo menos 5 anéis de crescimento (Figura 4.2). Estas amostras foram extraídas aleatoriamente do lote, de regiões sem defeitos e longe dos extremos das vigas.

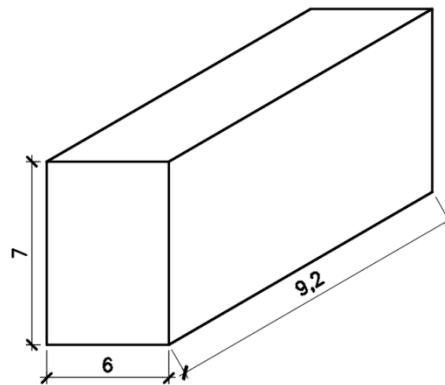


Figura 4.2 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de densidade (dimensões em cm).

Foram realizadas medidas das dimensões das peças, conforme indicado na ABNT NBR7190:1997, em um primeiro momento, após aquecimento, obtendo-se, então, as deformações específicas de retração, e logo em seguida após submersão, as deformações específicas de inchamento com auxílio um paquímetro eletrônico *Digital Caliper* da *Shan* de precisão de 0,01 mm.

Estas deformações específicas [4.3] a [4.8], assim como a variação volumétrica [4.9], podem ser calculadas conforme as fórmulas abaixo.

$$\varepsilon_{r,1}(\%) = \left( \frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,sat}} \right) \times 100 \quad [4.3]$$

$$\varepsilon_{r,2}(\%) = \left( \frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,sat}} \right) \times 100 \quad [4.4]$$

$$\varepsilon_{r,3}(\%) = \left( \frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,sat}} \right) \times 100 \quad [4.5]$$

$$\varepsilon_{i,1}(\%) = \left( \frac{L_{1,sat} - L_{1,seca}}{L_{1,seca}} \right) \times 100 \quad [4.6]$$

$$\varepsilon_{i,2}(\%) = \left( \frac{L_{2,sat} - L_{2,seca}}{L_{2,seca}} \right) \times 100 \quad [4.7]$$

$$\varepsilon_{i,3}(\%) = \left( \frac{L_{3,sat} - L_{3,seca}}{L_{3,seca}} \right) \times 100 \quad [4.8]$$

Onde,  $\varepsilon_r$  é a deformação específica obtida pelo processo de retração dos corpos de prova,  $\varepsilon_i$  a deformação específica obtida pelo processo de inchamento e L o comprimento para cada uma das 3 faces no estágio seco e saturado.

$$\Delta V(\%) = \left( \frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \right) \times 100 \quad [4.9]$$

Para  $V_{sat}$ , o volume saturado das peças obtido a partir da multiplicação das dimensões dos três lados dos corpos de prova na fase saturada, e  $V_{seca}$ , o volume seco obtido pela multiplicação das dimensões dos três lados na fase seca.

#### 4.2.1.2. Ensaio mecânicos

##### 4.2.1.2.1. Compressão

##### 4.2.1.2.1.1. Compressão paralela às fibras

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados com 8 corpos de prova prismáticos com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento, na direção paralela às fibras da madeira, igual a 15 cm (Figura 4.3). Estas amostras foram extraídas aleatoriamente do lote, de regiões sem defeitos, longe dos extremos das vigas e recortadas com a mesma serra circular citada nas seções anteriores.

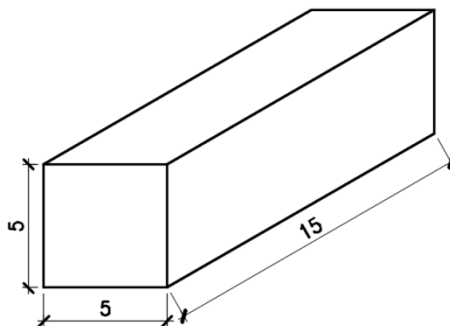


Figura 4.3 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão paralela às fibras (dimensões em cm).

Para obtenção da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados testes na máquina de ensaios universais *MTS* modelo *244.41*, com capacidade de carga 500 kN, do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio. O controle foi feito por deslocamento, com velocidade de aplicação da carga igual a 3,5 mm/min.

A instrumentação contou com a instalação de três transdutores lineares da marca *Gefran* modelo *PY2* (Figura 4.4), o que possibilitou leitura do deslocamento real sofrido por cada corpo de prova. Dois destes transdutores foram posicionados de maneira centralizada em duas faces adjacentes das peças, enquanto que o terceiro, fixado para medir o deslocamento vertical de face a face do corpo de prova (Figura 4.5).



Figura 4.4 Transdutor linear da marca *Gefran* modelo *PY2* utilizado durante os ensaios de compressão e flexão do programa experimental.



Figura 4.5 Esquema do ensaio de compressão paralela às fibras com três transdutores lineares para aquisição dos deslocamentos.

Os dois transdutores lineares de deslocamento inseridos no esquema para deslocamentos horizontais foram, inicialmente, considerados para o caso das peças ensaiadas à compressão normal às fibras, devido ao fato da madeira não romper durante a realização do ensaio. Sendo assim, ia-se considerar interrompido o procedimento ao alcançar deslocamento excessivo em um dos dois lados do CP.

Esta ideia foi descartada durante a análise dos dados mantendo-se, porém, a instrumentação para garantir a padronização dos ensaios.

A resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão atuante, ou seja, é a razão entre a força máxima e a área de aplicação da carga, calculada conforme fórmula [4.10] a seguir retirada da ABNT NBR7190:1997.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad [4.10]$$

O módulo de elasticidade da madeira [4.11] é obtido a partir do trecho linear dos gráficos de tensão-deformação específica, sendo o mesmo igual a inclinação da reta secante à curva, definida por um ponto inicial igual a 10% da resistência à compressão da peça e por outro ponto final igual a 50% desta mesma resistência. O módulo é, então, dado por:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad [4.11]$$

Para a obtenção da deformação específica foi utilizada a equação [4.12] apresentada a seguir.

$$\varepsilon = \frac{\text{deslocamento}}{\text{comprimento do CP}} \quad [4.12]$$

#### 4.2.1.2.1.2.

##### **Compressão perpendicular às fibras**

Os ensaios de compressão perpendicular às fibras foram realizados com 8 corpos de prova prismáticos com seção transversal retangular de 5,0x10 cm e comprimento, na direção perpendicular às fibras da madeira, igual a 5,0 cm (Figura 4.6). Estas amostras foram extraídas aleatoriamente do lote, de regiões sem defeitos, longe dos extremos das vigas e recortadas com a mesma serra circular citada nas seções anteriores.



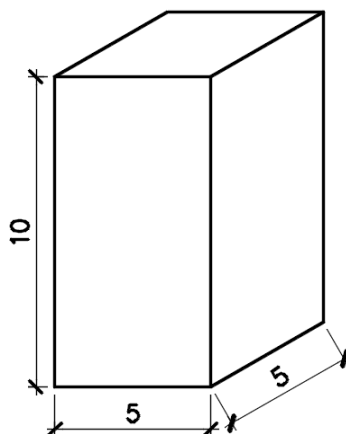


Figura 4.6 Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras (dimensões em cm).

Foram utilizados os mesmos equipamentos e instrumentação utilizados nos ensaios de compressão paralela às fibras. O módulo de elasticidade seguiu metodologia descrita no item 4.2.1.2.1.1 enquanto a resistência é igual a tensão correspondente a uma deformação residual de 2%.

#### 4.2.1.3. Ensaio de difração

##### 4.2.1.3.1. Difração de raios X da madeira

A determinação do índice de cristalinização e a caracterização estrutural da madeira foram realizadas por difração de raios X (método em pó). A madeira foi moída até obtenção de um pó fino sem granulometria especificada. O procedimento utilizado durante esse ensaio seguiu metodologia descrita nos trabalhos dos autores Poletto et al. (2011, 2012)

Foi utilizado um difratômetro *D8 Discover* da *Bruker*, sendo feita a varredura entre 5° e 40°, com passo de 2°, e tubo de cobre ( $\lambda=0,154$  nm). O índice de cristalinidade da madeira (%IC) foi calculado através da seguinte equação [4.13]:

$$\%IC = \frac{A_c}{(A_c + A_a)} \quad [4.13]$$

Onde,  $A_a$  é a área abaixo da linha da região amorfa e  $A_c$  é a área remanescente abaixo dos picos cristalinos.

#### **4.2.1.4.**

#### **Ensaaios sob influência da temperatura**

##### **4.2.1.4.1.**

##### **Compressão paralela às fibras com influência da temperatura**

###### **4.2.1.4.1.1.**

###### **Compressão com influência da temperatura paralela às fibras**

Os ensaios de compressão paralela às fibras, considerando prévio aquecimento da madeira, foram realizados com 18 corpos de prova prismáticos com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento, ao longo das fibras da madeira, igual a 15 cm.

Os corpos de prova foram divididos em 6 grupos de temperatura para pré-aquecimento: 60°C (3 CP's), 80°C (3 CP's), 110°C (3 CP's), 160°C (3 CP's), 200°C (3 CP's) e 250°C (3 CP's). O aquecimento foi realizado com uma estufa micro processada para esterilização e secagem da *Sterelifer* (temperatura máxima 200°C) por 2 horas em temperatura constante para que, em seguida, fossem realizados os ensaios à compressão. Os CPs foram introduzidos no forno quando a temperatura de aquecimento estava estabilizada e retirados para, em seguida, resfriarem a temperatura ambiente. Para os corpos de prova pré-aquecidos a 250°C, foi utilizada uma mufla *Splabor* modelo *SP-1200* (temperatura máxima de 1300°C).

Foram utilizados os mesmos equipamentos e instrumentação que os dos ensaios de compressão paralela às fibras à temperatura ambiente. A resistência à compressão paralela nas diversas temperaturas, assim como o módulo de elasticidade, seguiu metodologia descrita no item 4.2.1.2.1.1.

##### **4.2.1.4.2.**

##### **Difração de raios X com influência da temperatura da madeira**

Ensaaios de difração de raios X foram repetidos para avaliar a influência das altas temperaturas no índice de cristalização e na caracterização estrutural da madeira.

Inicialmente, a madeira foi moída até obtenção de um pó fino sem granulometria especificada. Três amostras foram aquecidas após moagem em uma

estufa micro processada para esterilização e secagem da *Sterelifer* (temperatura máxima 200°C) a 80°C, 160° e 200° por duas horas.

Foi utilizado um difratômetro *D8 Discover* da *Bruker*, sendo feita a varredura entre 5° e 40°, com passo de 2°, e tubo de cobre ( $\lambda=0,154\text{nm}$ ). O índice de cristalinidade da madeira (%IC) foi calculado através da seguinte equação [4.14]:

$$\%IC = \frac{A_c}{(A_c + A_a)} \quad [4.14]$$

Onde,  $A_a$  é a área abaixo da linha da região amorfa e  $A_c$  é a área remanescente abaixo dos picos cristalinos.

## **4.2.2. Compósitos reforçados com fibra de vidro**

### **4.2.2.1. Ensaios mecânicos**

#### **4.2.2.1.1. Tração**

Para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade dos compósitos poliméricos com fibras de vidro, foram confeccionados corpos de prova de 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento conforme dimensões mínimas recomendadas pela ASTM D3039/3039M. A espessura variou de 0,49 mm a 1,51 mm dependendo do número de camadas inseridas no compósito.

Foram ensaiados 9 corpos de prova com 1 camada de tecido bidimensional de vidro (densidade: 330 g/m<sup>2</sup>) (Figura 4.7) embebidos com resina epóxi bicomponente e espessura média 0,51 mm e outros 9 com 3 camadas e espessura média igual a 1,28 mm, simulando as duas conformações de reforço aplicados nas vigas de madeira.



Figura 4.7 Tecido de fibra de vidro bidirecional 330 g/m<sup>2</sup>.

Foi utilizado um molde de acrílico (Figura 8a), de dimensões 560 mm x 380 mm, para moldagem de compósitos têxteis. A Figura 8b mostra o esquema de moldagem.

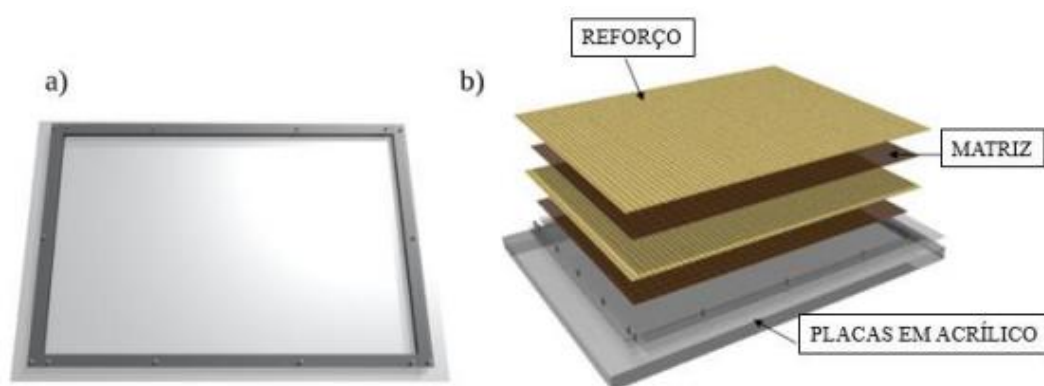


Figura 4.8 Molde utilizado para a confecção dos compósitos; e b) esquema de moldagem (Trindade, 2017).

Os testes foram realizados na máquina de ensaios universais *MTS* modelo 311.11, com capacidade de carga 1.000 kN, do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio. O controle foi feito por deslocamento, com velocidade de aplicação da carga igual a 2,0 mm/min.

O ensaio foi instrumentado com um extensômetro elétrico da marca *MTS* modelo 632 13F-20 posicionado no eixo longitudinal (Figura 4.10) para leitura da deformação específica do polímero reforçado com fibra de vidro, determinação da

deformação máxima de ruptura e construção do gráfico tensão-deformação específica.

A metodologia para obtenção da tensão resistente à tração e do módulo de elasticidade atendeu às recomendações da norma ASTM D3039/3039M.

### **4.2.3. Compósitos de fibra de juta**

#### **4.2.3.1. Ensaio mecânicos**

##### **4.2.3.1.1. Tração**

Para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade dos compósitos poliméricos com fibras de juta, foram confeccionados corpos de prova de 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento conforme dimensões mínimas recomendadas pela ASTM D3039/3039M. A espessura variou de 1,90 mm a 4,18 mm dependendo do número de camadas inseridas no compósito.

Foram ensaiados 8 corpos de prova com 1 camada de tecido bidimensional de juta (densidade: 320 g/m<sup>2</sup>) (Figura 4.9) embebidos com resina epóxi bicomponente e espessura média 2,03 mm e outros 8 com 3 camadas e espessura média igual a 4,08 mm, simulando as duas conformações de reforço aplicados nas vigas de madeira.

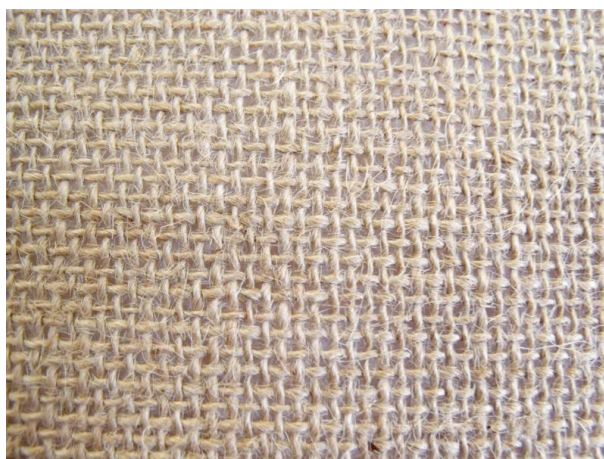


Figura 4.9 Tecido de fibra de juta bidirecional 320 g/m<sup>2</sup> (F9).

Os testes foram realizados na máquina de ensaios universais *MTS* modelo 311.11, com capacidade de carga 1.000 kN, do Laboratório de Estruturas e

Materiais (LEM) da PUC-Rio. O controle foi feito por deslocamento, com velocidade de aplicação da carga igual a 2,0 mm/min.

O ensaio foi instrumentado com um extensômetro elétrico da marca *MTS modelo 632 13F-20* posicionado no eixo longitudinal (Figura 4.10) para leitura da deformação específica do polímero reforçado com fibras de juta, determinação da deformação máxima de ruptura e construção do gráfico tensão-deformação específica.

A metodologia para obtenção da tensão resistente à tração e do módulo de elasticidade atendeu as recomendações da norma ASTM D3039/3039M.





Figura 4.10 Esquema do ensaio de tração para os compósitos.

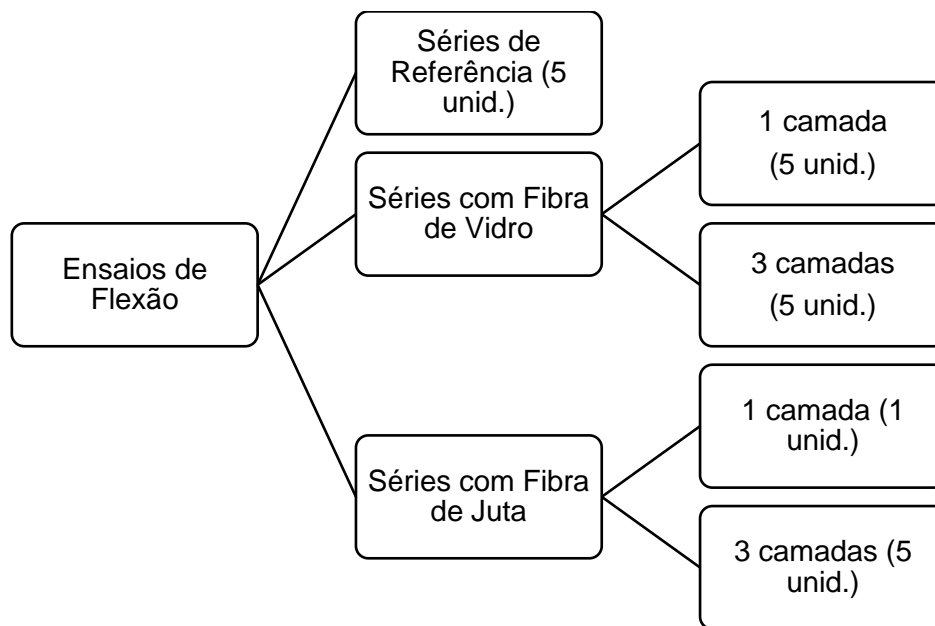
### **4.3. Análise experimental de vigas solicitadas à flexão com e sem reforço**

#### **4.3.1. Descrição das vigas**

O programa experimental que avalia a influência do reforço em vigas de madeira contou com 22 vigas divididas em 5 séries: 5 vigas para a série de

referência, 5 para série com uma camada de fibra de vidro, 6 para série com três camadas de fibra de vidro, 1 para série com uma camada de fibra de juta e 5 para série com três camadas de fibra de juta.

O Quadro 4.2 a seguir apresenta o fluxograma esquemático dos ensaios à flexão realizados, em escala real, em vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa*, com e sem reforço à flexão.



Quadro 4.2 Fluxograma com séries de ensaios de flexão.

#### 4.3.2. Características geométricas

Todas as vigas foram compradas serradas, não receberam nenhuma forma de tratamento e tinham seção transversal igual a 10x15 cm (largura x altura), e comprimento aproximadamente igual a 300 cm, conforme apresentado na Figura 4.11. O vão livre do ensaios foi igual a 250 cm.

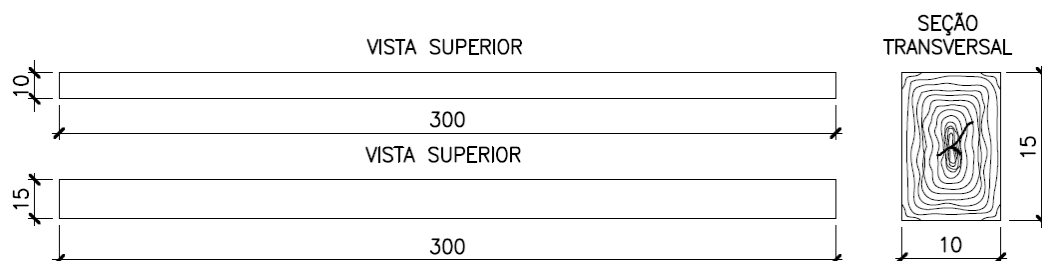


Figura 4.11 Geometria das vigas (dimensões em cm).



Foi feita uma análise visual, antes da realização dos ensaios, onde algumas imperfeições iniciais das vigas foram registradas como arqueaduras de até 3 centímetros, manchas, esmoados, fibras reversas, fendas retas nas extremidades, muitos nós e grupamentos de nós (Figuras 4.12 a 4.15).



Figura 4.12 Imperfeição encontrada nas vigas: fibras reversas.



Figura 4.13 Imperfeição encontrada nas vigas: quantidade excessiva de nós.



Figura 4.14 Imperfeição encontrada nas vigas: fendas nas extremidades.



Figura 4.15 Imperfeição encontrada nas vigas: perda de seção transversal.

A diferença de comprimento encontrada entre as vigas de madeira foi compensada do apoio para fora da região carregada, ou seja, todos os ensaios apresentam o mesmo vão livre e as mesmas distâncias de aplicação das forças.

#### **4.3.3. Instrumentação das vigas**

As vigas foram instrumentadas por meio da colagem de extensômetros elétricos para leitura das deformações específicas nas seções selecionadas. Para o acompanhamento da evolução da deflexão das vigas, utilizou-se transdutor linear de deslocamentos.

##### **4.3.3.1. Extensômetros elétricos de resistência**

As Figura 4.16 e Figura 4.17 mostram o posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência (EER) utilizados para a avaliação das deformações específicas em uma seção transversal das vigas de madeira.

Uma viga por grupo (1CFV, 3CFV, 1CFJ e 3CFJ) foi escolhida aleatoriamente para receber 5 EER: um na face superior, um na face inferior e três, igualmente distantes, em uma das faces laterais. As demais vigas foram instrumentadas apenas com 3 EER: um na face superior, um na face inferior e um no ponto médio de uma das faces laterais.

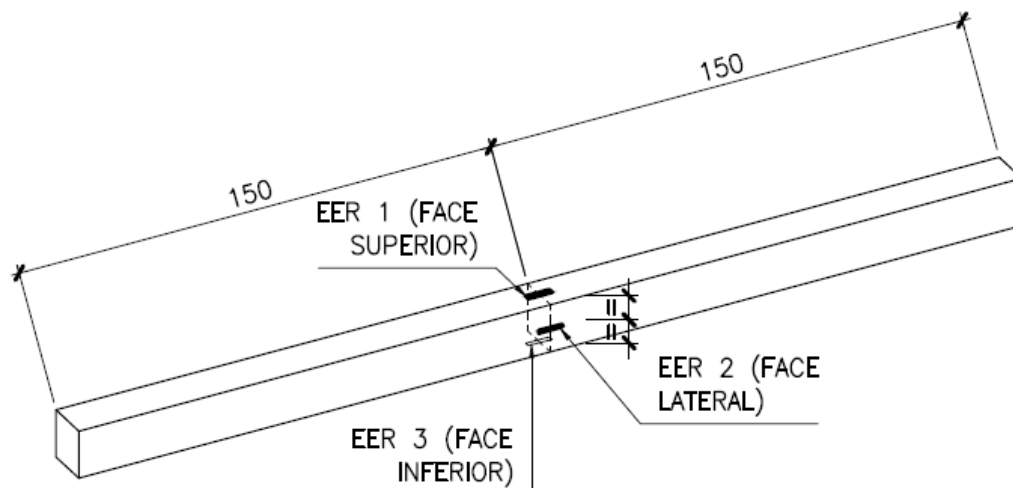


Figura 4.16 Posicionamento dos EER nas vigas de madeira – tipo 1 (dimensões em cm).

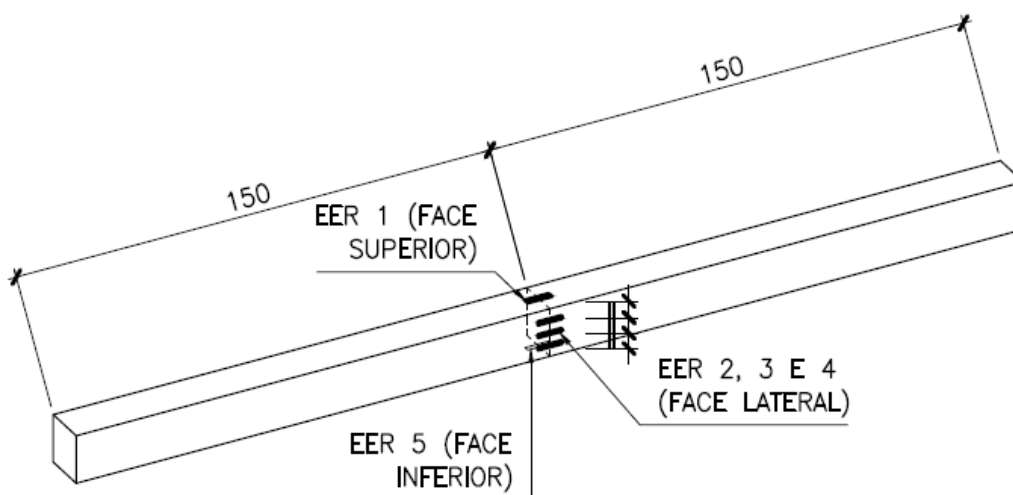


Figura 4.17 Posicionamento dos EER nas vigas de madeira – tipo 2 (dimensões em cm).

#### 4.3.3.2. Transdutores lineares

Foi instalado um transdutor linear de deslocamento da marca *Gefran* modelo *PY2* em cada uma das vigas, localizado no meio do vão livre conforme Figura 4.18.

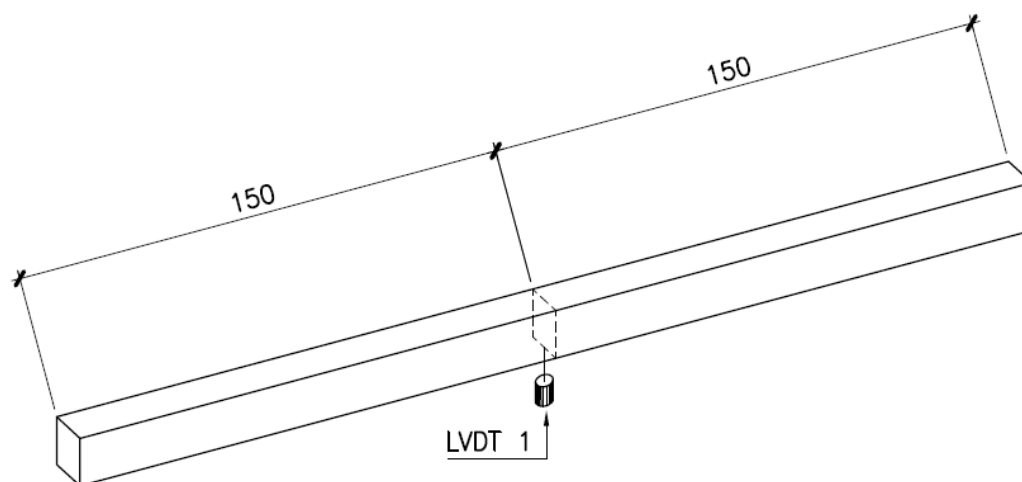


Figura 4.18 Posição do transdutor linear de deslocamento (dimensões em cm).

#### 4.4. Ensaio à flexão

##### 4.4.1. Esquema de ensaio

Para realização dos ensaios de flexão nas vigas de madeira foi montado um esquema com um apoio de primeiro gênero, um de segundo gênero e duas barras U metálicas soldadas linearmente para aplicação da carga em dois pontos garantindo, assim, um ensaio de flexão de quatro pontos.

Nessa barra de aplicação da carga foi soldada uma chapa metálica, em cada uma de suas extremidades (Figura 4.19 e Figura 4.20).

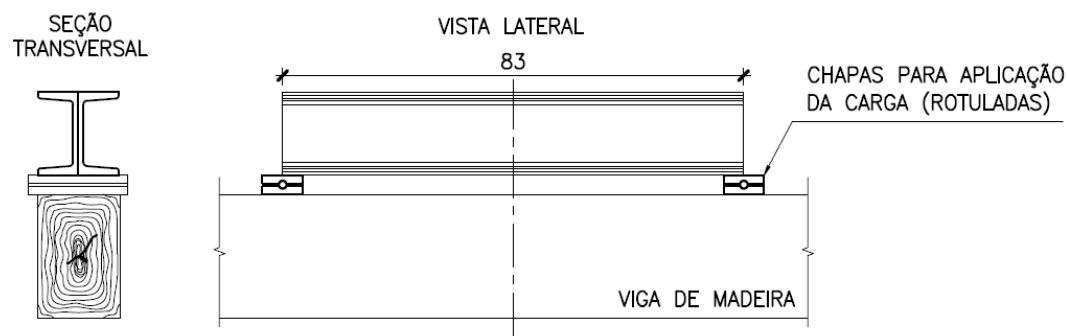


Figura 4.19 Sistema de aplicação das cargas (dimensões em cm).



Figura 4.20 Sistema de aplicação de cargas montado.

A conformação do reforço escolhido segue apresentado na Figura 4.21. Foi escolhido reforçar as vigas de madeira com 1 camada de fibra de vidro, 3 camadas de fibra de vidro, 1 camada de fibra de juta e 3 camadas de fibra de juta.

O tecido bidirecional de fibra de vidro utilizado apresenta  $330 \text{ g/m}^2$  e foi adquirida junto à *LokalFibra Comercial Ltda* enquanto a fibra de juta apresenta  $320 \text{ g/m}^2$  e adquirida junto à *Companhia Textil de Castanhal* com especificação F9.

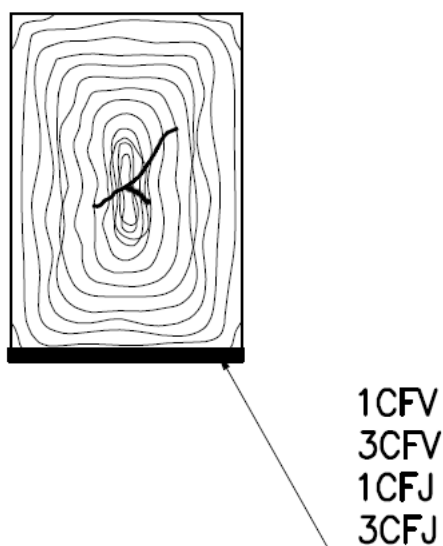


Figura 4.21 Conformação de reforço escolhido para as vigas de madeira.

#### 4.4.2.

#### Aplicação do sistema de reforço

Para aplicação do sistema de reforço, foi feito, inicialmente, o preparo da superfície da face inferior das vigas de modo a garantir que a mesma estivesse limpa, seca, livre de partículas soltas e quaisquer outras impurezas. Essa limpeza da superfície foi realizada com pano seco e o lixamento foi feito localmente apenas na área onde ocorreria a colagem de extensômetros elétricos de resistência.

A etapa seguinte foi a aplicação da resina epóxi bicomponente (proporções 1:2) da empresa *Lokalfibra Comercial Ltda*, especificada como resina epóxi RB031 e endurecedor epóxi 042R. Aplicou-se a primeira demão de resina, com simultânea aplicação do tecido no fundo das vigas, e em seguida, uma segunda demão da mesma. Após duas horas do início da secagem foi aplicada uma terceira, e última, demão de resina. O tecido de reforço foi aplicado em toda a extensão da superfície inferior das vigas de madeira.

Já para as vigas reforçadas com três camadas de tecido, demãos intermediárias foram aplicadas para garantir aderência e preenchimento da maior parte de vazios possível.

O consumo de adesivo foi em torno de 300g por viga de madeira para 1 camada de fibra de vidro, 450g para 3 camadas de fibra de vidro, 1000g para uma camada de fibra de juta e 1400g para 3 camadas de fibra de juta.

#### 4.4.3.

#### Execução dos ensaios

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM) conforme Figura 4.22 sem travamentos à torção nos apoios. O carregamento foi aplicado de forma similar em todas as vigas, com incrementos de deslocamento de 2 mm por minuto até a ruptura das mesmas.





Figura 4.22 Ensaio de flexão das vigas de madeira.

## **5**

### **Apresentação e análise dos resultados**

#### **5.1.Introdução**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental realizado de acordo com as descrições do item 4, no qual foram apresentados os ensaios das vigas de madeira, com e sem reforço, submetidas à flexão e os demais ensaios referentes à caracterização dos materiais envolvidos.

#### **5.2.**

##### **Ensaio de caracterização**

##### **5.2.1.**

###### **Madeira**

##### **5.2.1.1.**

###### **Caracterização do material à temperatura ambiente**

##### **5.2.1.1.1.**

###### **Propriedades físicas**

A seguir, na Tabela 5.1 são apresentados os valores de massa, em gramas, obtidos na execução do ensaio de umidade para os 12 corpos de prova analisados.

Em média, a umidade da madeira obtida foi de 18,46%, com coeficiente de variação de 7,47%.



Tabela 5.1 Valores de massa para obtenção da umidade da madeira e resultados.

Nº do CP	Leituras (g)				Resultados
	1	2	3	4	
1	14,46	11,86	11,81	11,80	22,54%
2	11,06	9,29	9,25	9,28	19,18%
3	11,79	9,95	9,89	9,90	19,09%
4	12,96	10,98	10,93	10,97	18,14%
5	11,18	9,48	9,43	9,43	18,56%
6	13,55	11,57	11,55	11,54	17,42%
7	13,82	11,77	11,75	11,72	17,92%
8	13,55	11,51	11,50	11,45	18,34%
9	11,17	9,50	9,48	9,45	18,20%
10	11,16	9,55	9,51	9,51	17,35%
11	13,06	11,25	11,21	11,15	17,13%
12	13,46	11,53	11,48	11,44	17,66%

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de densidade, em quilogramas por metro cúbico, obtidos a partir do ensaio de densidade feito para os 12 corpos de prova analisados no ensaio de umidade.

Tabela 5.2 Densidades da madeira.

Nº do CP	Densidade (kg/m³)
1	393,33
2	309,33
3	330,00
4	365,67
5	314,33
7	390,67
8	381,67
9	315,00
10	317,00
11	371,67
12	381,33

A densidade básica média da madeira em questão foi de 354,56 kg/m³ com coeficiente de variação de 9,22%. A ABNT NBR 7190:1997 determina um valor de massa específica aparente igual a 538kg/m³ utilizado como referência para madeiras do tipo *Pinus oocarpa* com umidade igual a 12%. Sabendo que os valores de densidade básica são menores que os de massa específica aparente, ainda assim é possível perceber uma menor qualidade da madeira trabalhada já que a variação entre o encontrado e o valor de referência foi de 34%.

Na base de dados utilizada para este estudo não foi possível encontrar valores de referência para *Pinus oocarpa* de segunda categoria, entretanto, o menor valor obtido por outros autores que trabalharam com essa espécie foi de 380 kg/m<sup>3</sup>. Uma comparação poderia ser feita com valores de densidade da ABNT NBR 7190:1997 para madeiras estruturais de resistência inferior, classificadas como C20. Essa menor classe de resistência apresenta densidade básica aproximada de 400 kg/m<sup>3</sup>, o que corresponderia a 11% de variação.

Não foi uma preocupação durante o estudo a má aproximação entre os valores de referência encontrados na ABNT NBR 7190:1997 e os valores obtidos experimentalmente já que o programa busca comprovar a eficácia do reforço em vigas de madeira com baixa qualidade, tanto devido ao rápido crescimento das árvores de reflorestamento de origem quanto pela degradação das peças ao longo do tempo.

Na Tabela 5.3 são apresentadas as três dimensões, em milímetros obtidas a partir do ensaio de estabilidade dimensional para os 6 corpos de prova analisados.

Tabela 5.3 Valores de comprimento após ciclos de secagem e umedecimento dos corpos de prova.

Leitura	Nº do CP	Comprimento (mm)				Altura (mm)				Largura (mm)			
		C1	C2	C3	<C>	A1	A2	A3	<A>	L1	L2	L3	<L>
1	1	92,59	92,65	92,77	92,67	61,34	61,08	61,11	61,18	70,17	69,98	69,77	69,97
	2	92,45	92,38	92,28	92,37	60,93	60,49	59,92	60,45	70,45	69,91	69,35	69,90
	3	92,65	92,85	92,76	92,75	61,15	61,11	61,63	61,30	69,43	69,76	70,02	69,74
	4	92,07	92,14	92,23	92,15	60,94	60,50	60,15	60,53	70,19	69,87	69,43	69,83
	5	92,04	91,95	91,98	91,99	61,29	60,66	60,36	60,77	69,50	69,78	69,97	69,75
	6	92,03	92,05	91,95	92,01	60,80	61,55	61,58	61,31	70,09	69,78	69,19	69,69
2	1	92,63	92,63	92,59	92,62	61,56	61,54	60,62	61,24	70,05	69,94	69,50	69,83
	2	92,45	92,38	92,28	92,37	60,93	60,49	59,92	60,45	70,45	69,91	69,35	69,90
	3	92,79	92,76	92,70	92,75	61,07	60,84	60,38	60,76	69,36	69,75	69,98	69,70
	4	92,07	92,21	92,18	92,15	60,84	60,47	59,92	60,41	70,15	69,77	69,29	69,74
	5	92,08	92,01	91,86	91,98	61,09	60,78	60,10	60,66	69,33	69,76	69,91	69,67
	6	92,02	92,06	91,90	91,99	60,83	61,29	61,56	61,23	70,03	69,68	69,10	69,60
3	1	92,60	92,52	92,65	92,59	61,16	61,26	61,30	61,24	69,71	69,87	69,90	69,83
	2	92,41	92,42	92,38	92,40	61,46	61,50	61,42	61,46	70,15	69,76	69,52	69,81
	3	92,69	92,78	92,75	92,74	61,05	61,07	61,08	61,07	69,13	69,87	70,03	69,68
	4	92,10	92,15	92,21	92,15	60,97	61,44	61,41	61,27	69,50	69,66	69,93	69,70
	5	91,35	91,23	91,24	91,27	60,57	60,71	60,62	60,63	69,45	69,67	69,79	69,64
	6	92,01	91,97	91,80	91,93	60,90	61,48	61,32	61,23	69,87	69,54	69,32	69,58
4	1	92,94	93,08	93,00	93,01	61,98	61,91	61,73	61,87	72,18	71,83	71,47	71,83
	2	92,92	93,00	92,87	92,93	62,37	62,21	61,85	62,14	72,50	72,40	72,12	72,34
	3	93,15	93,28	93,17	93,20	61,94	61,84	61,71	61,83	71,77	71,91	71,98	71,89
	4	92,63	92,62	92,56	92,60	62,00	61,91	61,58	61,83	72,21	72,07	71,81	72,03
	5	92,40	92,35	92,18	92,31	61,87	61,68	61,43	61,66	71,83	71,78	71,85	71,82
	6	92,49	92,42	92,17	92,36	61,92	62,06	62,17	62,05	71,77	71,73	71,57	71,69
5	1	93,36	93,07	92,98	93,14	62,11	61,96	61,86	61,98	72,02	72,02	71,64	71,89
	2	92,97	92,93	92,91	92,94	62,35	62,52	61,86	62,24	72,35	72,47	72,41	72,41
	3	93,28	93,21	93,16	93,22	62,01	61,88	61,62	61,84	72,05	71,93	71,69	71,89
	4	92,78	92,67	92,53	92,66	62,25	61,85	61,62	61,91	72,30	72,11	71,85	72,09
	5	92,45	92,35	92,19	92,33	62,03	61,78	61,48	61,76	71,88	71,90	71,92	71,90
	6	92,48	92,48	92,29	92,42	61,95	62,09	62,15	62,06	71,85	71,72	71,59	71,72

A Tabela 5.4 apresenta os valores obtidos para as deformações específicas e variação volumétrica, em porcentagem, dos 6 corpos de prova analisados, determinados conforme item 4.2.1.1.3.

Tabela 5.4 Deformações específicas e variação volumétrica da madeira.

N° do CP	$\epsilon_{r,1}$	$\epsilon_{r,2}$	$\epsilon_{r,3}$	$\epsilon_{i,1}$	$\epsilon_{i,2}$	$\epsilon_{i,3}$	$\Delta V$
1	0,59%	1,19%	2,87%	0,59%	1,20%	2,96%	4,81%
2	0,57%	1,26%	3,59%	0,58%	1,27%	3,72%	5,65%
3	0,51%	1,25%	3,08%	0,51%	1,26%	3,18%	5,01%
4	0,55%	1,02%	3,32%	0,55%	1,03%	3,43%	5,07%
5	1,14%	1,83%	3,15%	1,16%	1,86%	3,25%	6,39%
6	0,53%	1,34%	2,99%	0,53%	1,36%	3,08%	5,03%
Média	0,65%	1,31%	3,17%	0,65%	1,33%	3,27%	5,33%
C.V.	34,36%	19,02%	7,37%	34,69%	19,32%	7,63%	10,14%

Sendo assim, a variação volumétrica pode ser considerada como sendo igual a 5,43% com coeficiente de variação igual a 9,85%.

Por fim, foi realizada uma análise difratométrica da madeira conforme descrito no item 4.2.1.3.1 e o resultado é apresentado na Figura 5.1.

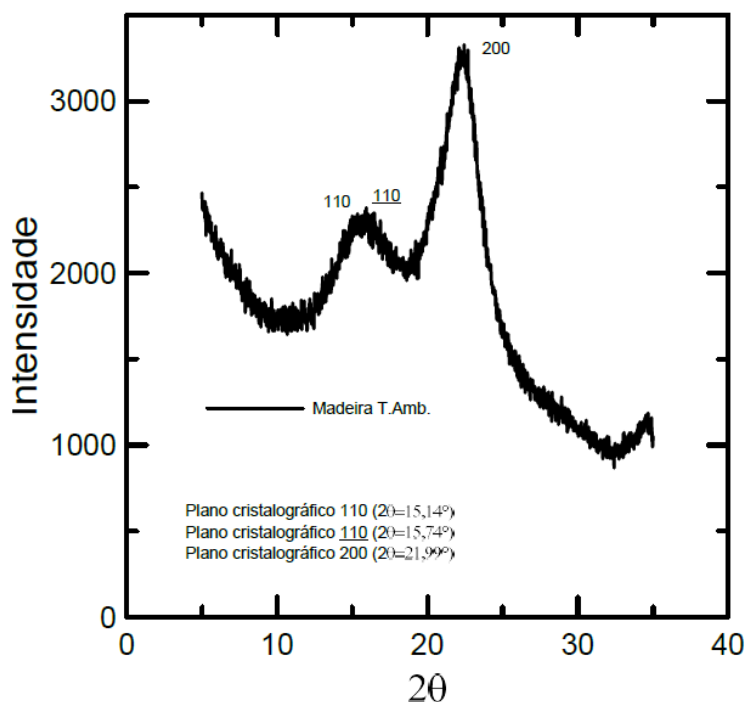


Figura 5.1 DRX da madeira.

O espectro de difração de raios X apresenta, três picos característicos localizados aproximadamente em  $2\theta$  iguais a  $15,14^\circ$ ,  $15,74^\circ$  e  $21,99^\circ$ . Esses valores são posições características de reflexões dos planos cristalográficos (110), (110) e (200) da celulose tipo I, que é uma forma polimórfica da celulose de ocorrência natural. O índice de cristalinidade estimado é igual a 51,05%.

Valores de índice de cristalinidade iguais a 34,1% foram obtidos por Polleto et al. (2012) para *Pinus elliottii* e 75,5%  $\pm 1,2$  para *Pinus taeda* por Poletto et al. (2011).

#### 5.2.1.1.2. Propriedades mecânicas

O módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras médio foi de 1,48 GPa com coeficiente de variação de 35,43% enquanto a resistência à compressão paralela às fibras média foi de 21,09 MPa com coeficiente de variação igual a 13,56%. Os resultados obtidos para cada um dos 8 corpos de prova analisados seguem apresentados na Tabela 5.5.

A ABNT NBR7190:1997 indica valores de referência para *Pinus oocarpa* como sendo iguais a 10,90 GPa para módulo de elasticidade e 43,6 MPa para resistência à compressão de madeiras com umidade de 12%.

Tabela 5.5 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira considerando umidade igual a 12%.

Nº do CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	fc0 (MPa)
CP1	1,66	1,54	21,54
CP2	1,36	0,92	20,05
CP3	1,21	1,11	17,82
CP4	1,52	1,25	20,35
CP5	1,69	1,66	20,56
CP6	1,89	-	24,98
CP7	2,27	-	17,94
CP8	2,06	2,39	25,50
Média	1,71	1,48	21,09
C.V.	20,85%	35,43%	13,56%

O diagrama representativo de tensão-deformação para compressão paralela às fibras é apresentado na Figura 5.2.

Observa-se a existência de um trecho linear, no qual o comportamento da madeira é elástico, até a tensão limite de proporcionalidade. A partir daí verifica-se um comportamento não linear, o qual está associado à flambagem das fibras da madeira. Sob compressão axial, as células que compõem as fibras atuam como

tubos de paredes finas, paralelos e colados entre si. O colapso envolve a fratura do material ligante e flambagem dessas células.

O modelo de Bazan Buchanan (Buchanan 1990) que descreve o comportamento à compressão da madeira e a considera como um material linear elástico até um ponto de limite de proporcionalidade e a partir deste ponto, a plastificação ocorre linearmente, é uma aproximação aceitável e pode ser observada no diagrama da Figura 5.2.

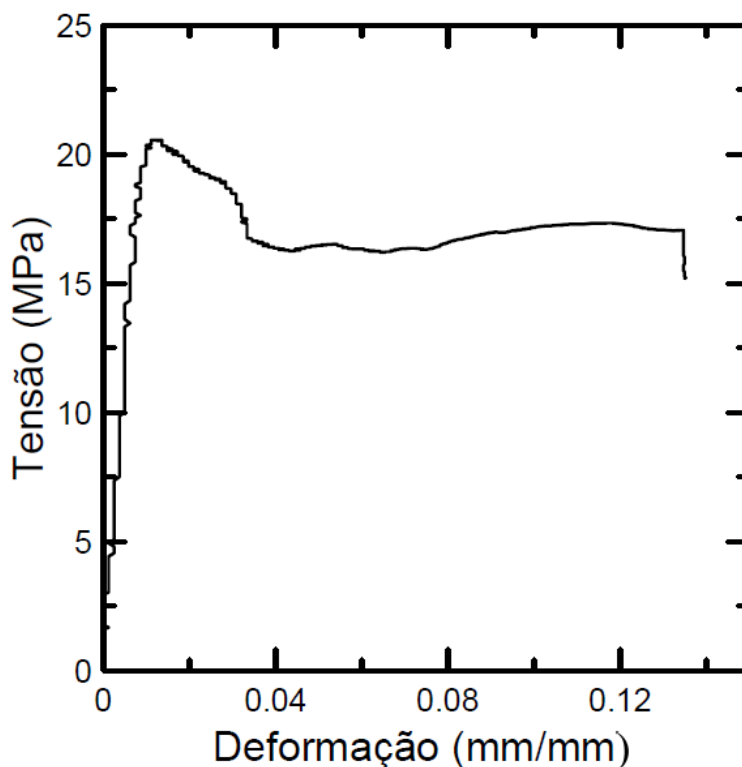


Figura 5.2 Diagrama tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras.

A madeira utilizada neste estudo apresenta, portanto, 42,75% de diferença quando comparada com o valor de referência da norma brasileira para a resistência à compressão e 84,36% em relação ao módulo de elasticidade.

O menor valor de resistência à compressão levantado na revisão bibliográfica deste estudo foi de 18,09MPa (Klock 1989), podendo chegar a valores iguais a 39MPa (Trianoski et al. 2014).

Já o módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras obtida foi 159,29 MPa com coeficiente de variação de 57,47% enquanto a resistência à compressão perpendicular às fibras foi de 2,11 MPa com coeficiente de variação igual a 25,36%. Os resultados obtidos para cada um dos 8 corpos de prova analisados seguem apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Módulo de elasticidade e resistência à compressão perpendicular às fibras da madeira.

Nº do CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (MPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)
CP1	137,45	97,96	1,27
CP2	188,77	127,39	3,07
CP3	137,59	253,76	2,06
CP4	132,57	206,13	1,66
CP5	124,99	0,00	2,00
CP6	151,77	252,54	2,08
CP7	196,12	177,22	2,44
CP8	142,99	-	2,29
Média	151,53	159,29	2,11
C.V.	17,47%	57,47%	25,36%

O diagrama representativo de tensão-deformação para compressão perpendicular às fibras é apresentado na Figura 5.3.

Conforme esperado, a madeira, ao ser comprimida apresenta comportamento linear até um limite de proporcionalidade. As fibras são constituídas de células ocas que quando comprimidas transversalmente são achatadas, apresentando grandes deformações, situação observada no diagrama tensão-deformação com um patamar quase horizontal.

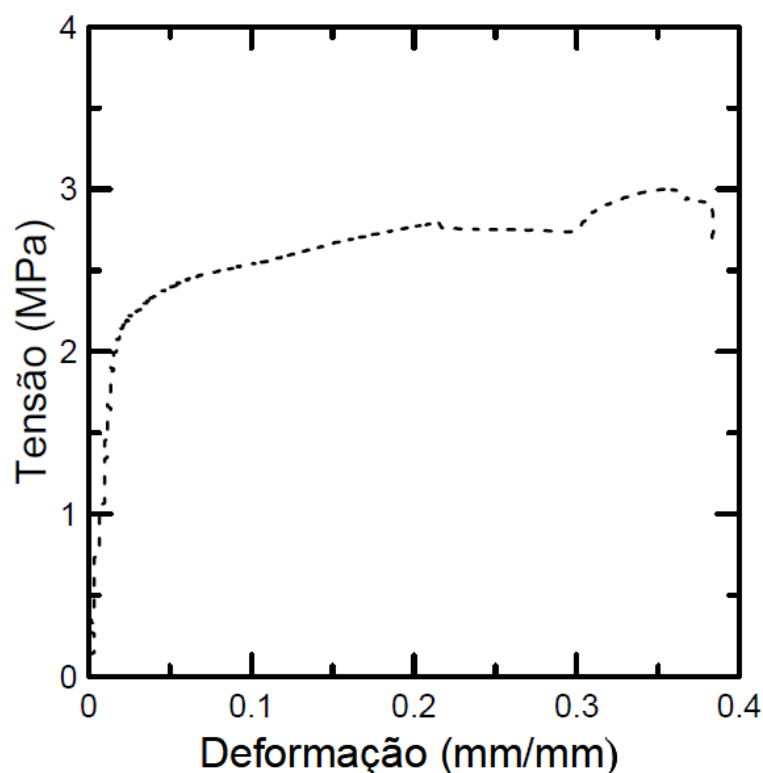


Figura 5.3 Diagrama tensão-deslocamento para compressão perpendicular às fibras.

#### 5.2.1.2.

#### A influência da temperatura nas propriedades da madeira

Para análise da influência da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras e no módulo de elasticidade da madeira, 3 corpos de prova foram pré-aquecidos e ensaiados para cada uma das temperaturas a seguir: 60°C, 80°C, 110°C, 160°C e 200°C, com exceção para a temperatura de 110°C na qual só foram testados dois corpos de prova.

Os valores encontrados para cada uma destas temperaturas seguem sumarizados nas Tabela 5.7, Tabela 5.8, Tabela 5.9, Tabela 5.10 e Tabela 5.11.

Tabela 5.7 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira a 60°C.

Nº DO CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	$f_{c0}$ (MPa)	Força última (kN)
CP1_60	3,44	2,45	29,17	61,65
CP2_60	2,05	2,18	29,58	62,52
CP3_60	2,82	1,99	30,56	64,59
MÉDIA	2,77	2,21	29,77	62,92
C.V.	20,52%	8,43%	1,96%	1,96%

Tabela 5.8 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira a 80°C.



N° DO CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	$f_{co}$ (MPa)	Força última (kN)
CP1_80	2,24	1,47	25,94	54,84
CP2_80	-	1,87	25,56	54,02
CP3_80	2,54	1,35	24,77	52,37
MÉDIA	2,39	1,56	25,42	53,74
C.V.	6,16%	14,09%	1,91%	1,91%

Tabela 5.9 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira a 110°C.

N° DO CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	$f_{co}$ (MPa)	Força última (kN)
CP1_110	1,16	1,36	26,09	55,16
CP2_110	1,47	1,26	25,33	53,54
MÉDIA	1,31	1,31	25,71	54,35
C.V.	11,95%	3,54%	1,49%	1,49%

Tabela 5.10 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira a 160°C.

N° DO CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	$f_{co}$ (MPa)	Força última (kN)
CP1_160	-	1,38	17,65	37,31
CP2_160	-	1,40	20,67	43,69
CP3_160	-	1,92	23,33	49,32
MÉDIA	-	1,57	20,55	43,44
C.V.	-	15,94%	11,29%	11,29%

Tabela 5.11 Módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira a 200°C.

N° DO CP	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir do LVDT (GPa)	$f_{co}$ (MPa)	Força última (kN)
CP1_200	-	1,30	20,16	42,61
CP2_200	1,44	1,13	14,60	30,87
CP3_200	2,09	1,34	22,10	46,71
MÉDIA	1,77	1,26	18,95	40,06
C.V.	18,33%	7,08%	16,76%	16,76%

É possível perceber que, com o aumento da temperatura de exposição da madeira, ocorre uma tendência à redução da resistência à compressão paralela às

fibras (Figura 5.5) assim como do módulo de elasticidade (Figura 5.4) conforme esperado já que a degradação é iniciada pelos extrativos, seguindo para a lignina, hemicelulose e celulose, ou seja, componentes estruturais principais da madeira.

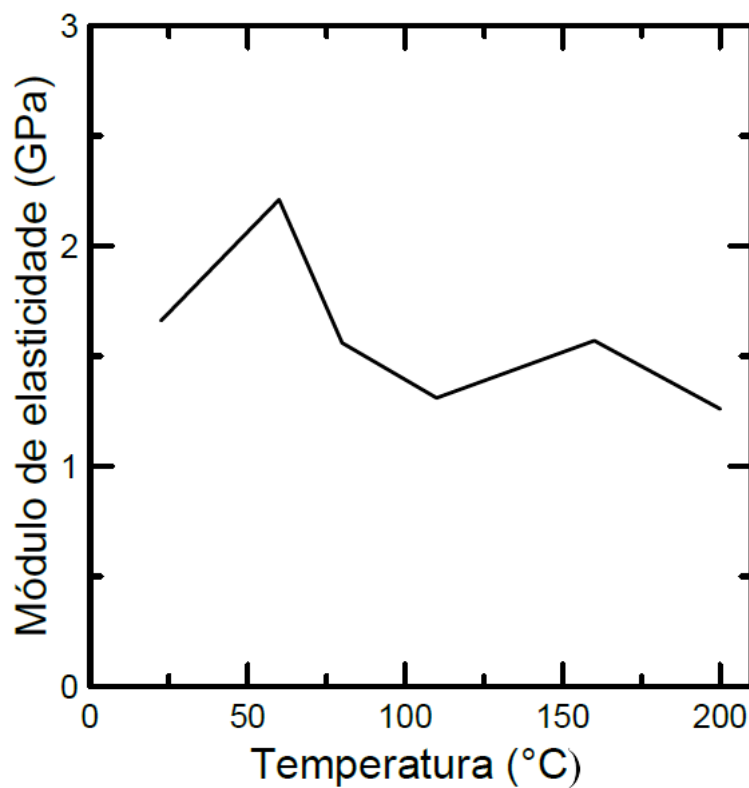


Figura 5.4 Consequências para o módulo de elasticidade à compressão com o aumento da temperatura.

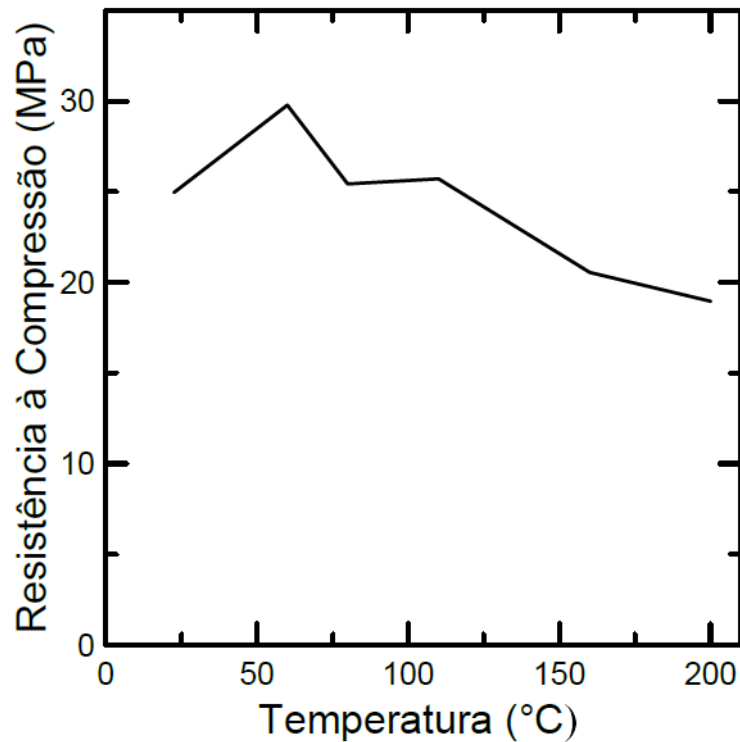


Figura 5.5 Consequências para a resistência à compressão com o aumento da temperatura.

O diagrama foi representativo tensão-deformação nas diferentes temperaturas trabalhadas segue apresentado na Figura 5.6. Os corpos de prova aquecidos a 250°C foram descartados pois nesta temperatura houve carbonização das peças.

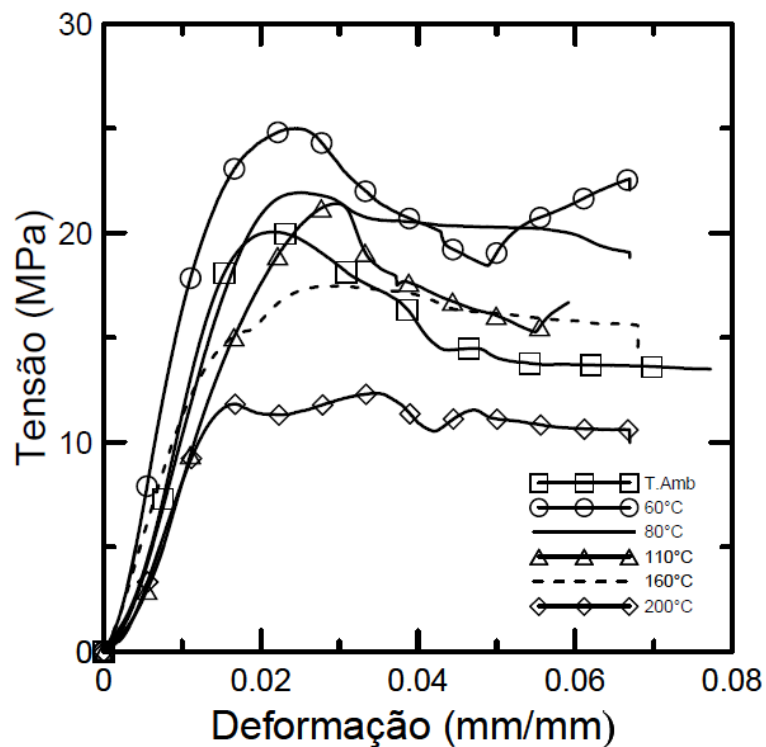


Figura 5.6 Diagrama tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras nas diversas temperaturas aplicadas.

Por fim, foi realizada uma análise difratométrica da madeira conforme descrito no item 4.2.1.4.2 e os resultados, para as temperaturas de 80°C, 160°C e 200°C, são apresentados na Figura 5.7.

O espectro de difração de raios X continua apresentando os três picos característicos deste material. Os índices de cristalinidade estimados, no entanto, foram reduzidos de 51,05% para 47,63%, 47,23% e 41,05% para as temperaturas 80°C, 160°C e 200°C, respectivamente. Indicando, assim, perda de material cristalino devido ao aumento da temperatura.

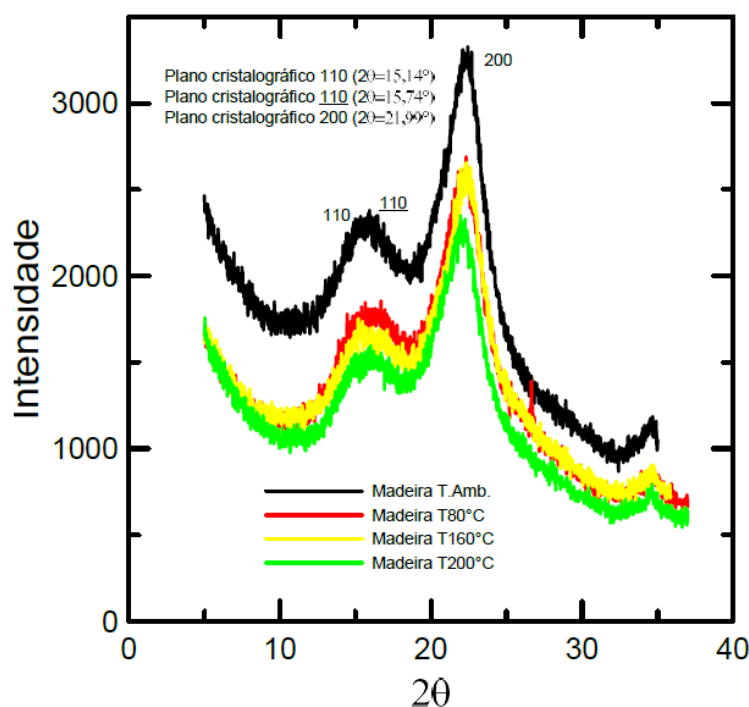


Figura 5.7 DRX da madeira a temperatura ambiente, 80°C, 160°C e 200°C.

### 5.2.2. Compósitos de fibras de vidro

O compósito com 1 camada de tecido fibra de vidro (55,97% em massa) apresentou resistência à tração média de 157,69 MPa (coeficiente de variação de 13,96%) e módulo igual a 8,54 GPa (coeficiente de variação de 13,77%), enquanto o com 3 camadas de fibra de vidro (60,02% em massa) apresentou resistência média de 228,03 MPa (coeficiente de variação igual a 12,94%) e módulo de 11,41 GPa (coeficiente de variação igual a 11,92%).

Os resultados obtidos para cada um dos corpos de prova analisados seguem apresentados nas Tabela 5.12 e Tabela 5.13.

Tabela 5.12 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com uma camada de fibra de vidro.

Nº do CP	Deformação na ruptura calculada a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (mm/mm)	Deformação na ruptura obtida a partir dos dados dos extensômetros elétricos (mm/mm)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados dos extensômetros elétricos (GPa)
CP1	1,23E-02	-	159,52	12,67	-
CP2	1,43E-02	2,35E-02	186,49	13,21	8,17
CP3	1,25E-02	1,53E-02	176,90	14,00	10,84
CP4	1,34E-02	2,05E-02	180,26	12,80	8,66
CP5	1,12E-02	1,59E-02	130,89	11,90	7,70
CP6	1,39E-02	2,19E-02	165,79	12,14	8,01
CP7	1,05E-02	-	121,86	12,42	-
CP8	1,31E-02	-	167,68	12,72	-
CP9	1,21E-02	1,97E-02	150,52	12,78	7,84
CP10	1,02E-02	-	136,96	13,23	-
Média	1,23E-02	3,25E-03	157,69	12,79	8,54
C.V.	11,28%	16,70%	13,96%	4,94%	13,77%
Observação: Os CPs 1, 7, 8 e 10 tiveram problemas no manuseio do extensômetro elétrico acarretando na perda dos dados obtidos através deste equipamento de leitura, não havendo complicações, no entanto, com os valores obtidos a partir do atuador hidráulico da MTS.					

Tabela 5.13 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	Deformação na ruptura calculada a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (mm/mm)	Deformação na ruptura obtida a partir dos dados dos extensômetros elétricos (mm/mm)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados dos extensômetros elétricos (GPa)
CP1	2,04E-02	2,30E-02	251,15	18,19	11,68
CP2	1,03E-02	1,26E-02	164,63	19,98	14,37
CP3	1,72E-02	2,15E-02	216,08	17,73	10,55
CP4	1,58E-02	2,34E-02	248,27	16,97	10,64
CP5	1,56E-02	2,09E-02	241,62	16,91	11,64
CP6	1,64E-02	2,50E-02	263,00	17,56	11,96
CP7	1,33E-02	2,28E-02	223,11	17,90	10,68
CP8	1,46E-02	2,68E-02	235,52	17,92	9,49
CP9	1,35E-02	1,85E-02	208,88	16,57	11,67
Média	1,52E-02	2,16E-02	228,03	17,75	11,41
<b>C.V.</b>	18,53%	19,02%	12,94%	5,63%	11,92%

Os diagramas tensão-deformação representativos para tração dos compósitos reforçados com fibra de vidro seguem apresentados nas Figura 5.8 e Figura 5.9.

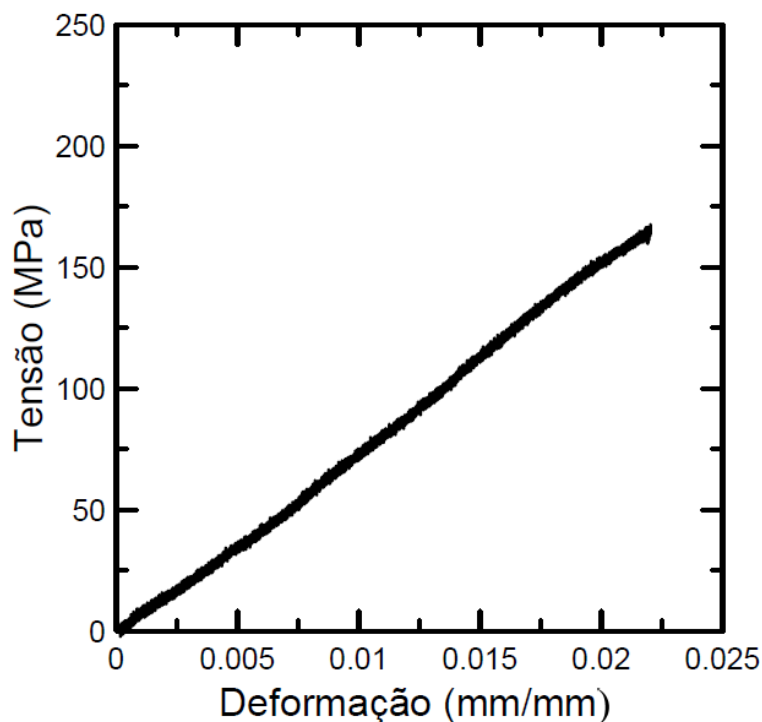


Figura 5.8 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com uma camada de fibra de vidro.

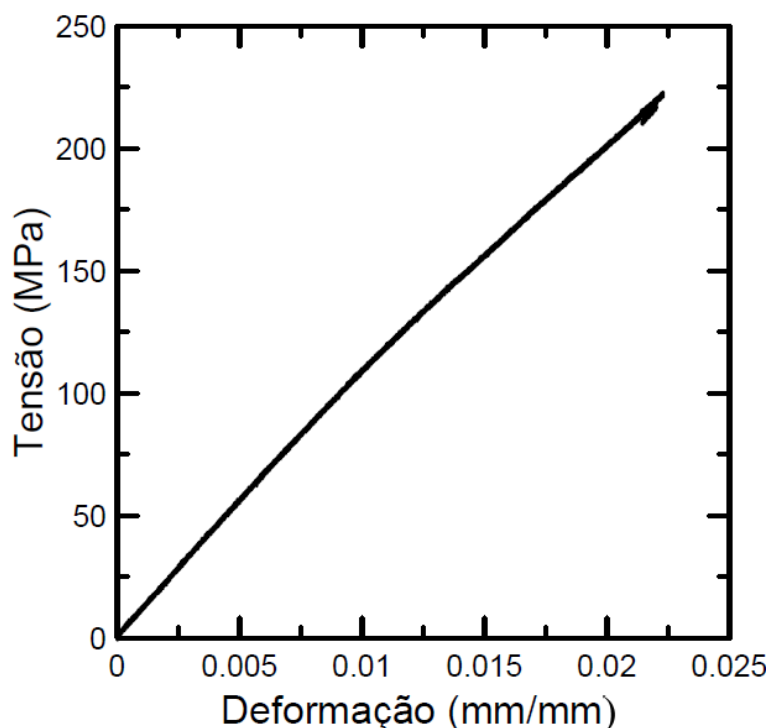


Figura 5.9 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com três camadas de fibra de vidro.

Conforme esperado, compósitos reforçados com fibras de vidro, ao serem tracionados, apresentam comportamento linear até ruptura. Diagramas obtidos com compósitos formados por três camadas de fibra de vidro apresentaram diagramas tendenciados ao comportamento não linear, em alguns casos, apenas quando feitas leituras de deformação a partir do deslocamento do atuador hidráulico.

Jagannatha e Harish (2010) utilizaram um tecido bidirecional de vidro com a mesma densidade que a deste estudo, 330 g/m<sup>2</sup>, e porcentagem em massa de fibras semelhante, 60%, obtendo, no entanto, uma resistência à tração igual a 100 MPa. Resistências próximas a 280,25 MPa, foram encontradas por Sanjay e Yogesha (2016) com 10 camadas de fibras de 280 g/m<sup>2</sup>.

É possível observar, também, a relação de dependência entre a resistência à tração e a quantidade de fibras inseridas na matriz. Com o aumento da fração volumétrica de fibra, há um aumento no módulo de elasticidade (33,61%) e na resistência à tração dos compósitos (44,60%). Deogonda e Chalwa (2013) também perceberam aumento dessa resistência. No estudo feito por eles, com acréscimo de

10% na fração das fibras, era possível alcançar uma melhoria em 9% na resistência à tração do compósito.

### **5.2.3. Compósitos de fibra de juta**

O compósito reforçado com 1 camada de tecido fibra de juta (23,78% em massa) apresentou resistência à tração média de 16,30 MPa (coeficiente de variação de 23,26%) e módulo de 1,12 GPa (coeficiente de variação de 47,95%), enquanto o com 3 camadas de fibra de juta (24,25% em massa) apresentou resistência média de 22,35 MPa (coeficiente de variação igual a 12,95%) e módulo de 1,83 GPa (coeficiente de variação igual a 12,43%).

Mesmo trabalhando em um laboratório, com ambiente e condições cuidadosamente controlados, os resultados podem apresentar grande dispersão. Tal variação nos valores encontrados, que foram um pouco maiores que os obtidos com compósitos de fibra de vidro, pode ser justificada pelas falhas e defeitos presentes, intrinsecamente, nos filamentos de juta que causam a ruptura prematura das fibras.

Esses valores de resistência obtidos foram menores que os encontrados na literatura. Islam et al. (2016), utilizando 30% em massa de fibras de juta, fração próxima a três camadas utilizadas nesta pesquisa, encontraram resistência à tração 60% maior que as dos compósitos deste estudo (35,77 MPa).

Os resultados obtidos para cada um dos corpos de prova analisados seguem apresentados nas Tabela 5.14 e Tabela 5.15.



Tabela 5.14 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com uma camada de fibra de juta.

Nº do CP	Deformação na ruptura calculada a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (mm/mm)	Deformação na ruptura obtida a partir dos dados dos extensômetros elétricos (mm/mm)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados dos extensômetros elétricos (GPa)
CP1	1,22E-02	-	20,97	2,35	-
CP2	8,25E-03	-	17,67	2,61	-
CP3	7,55E-03	-	19,40	2,25	-
CP4	5,37E-03	9,08E-03	13,46	2,44	1,54
CP5	6,66E-03	1,24E-02	14,61	2,39	1,36
CP6	7,49E-03	1,12E-02	16,60	2,62	1,71
CP7	9,50E-03	2,14E-02	9,59	1,00	0,48
CP8	1,48E-02	3,29E-02	13,71	1,10	0,46
CP9	9,65E-03	2,07E-02	20,65	2,36	1,14
Média	9,04E-03	1,80E-02	16,30	2,12	1,12
C.V.	32,14%	49,70%	23,26%	29,32%	47,95%
Observação: Os CPs 1, 2 e 3 tiveram problemas no manuseio do extensômetro elétrico acarretando na perda dos dados obtidos através deste equipamento de leitura, não havendo complicações, no entanto, com os valores obtidos a partir do atuador hidráulico da MTS.					

Tabela 5.15 Módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos reforçados com três camadas de fibra de juta.

Nº do CP	Deformação na ruptura calculada a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (mm/mm)	Deformação na ruptura obtida a partir dos dados dos extensômetros elétricos (mm/mm)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados de deslocamento do atuador hidráulico (GPa)	Módulo de elasticidade calculado a partir dos dados dos extensômetros elétricos (GPa)
CP1	1,36E-02	1,69E-02	24,62	2,99	2,09
CP2	1,30E-02	2,33E-02	25,57	3,05	1,99
CP3	1,34E-02	2,08E-02	25,16	3,00	2,06
CP4	1,13E-02	1,94E-02	23,65	3,00	1,83
CP5	8,80E-03	1,79E-02	17,64	2,70	1,55
CP6	1,14E-02	1,95E-02	21,98	2,88	1,92
CP7	1,18E-02	2,03E-02	19,37	2,48	1,55
CP8	1,14E-02	2,11E-02	20,82	2,78	1,61
Média	1,18E-02	1,99E-02	22,35	2,86	1,83
C.V.	13,12%	10,03%	12,95%	6,88%	12,43%

Os diagramas tensão-deformação representativos para tração dos compósitos reforçados com fibra de juta seguem apresentados nas Figura 5.10 e Figura 5.11.

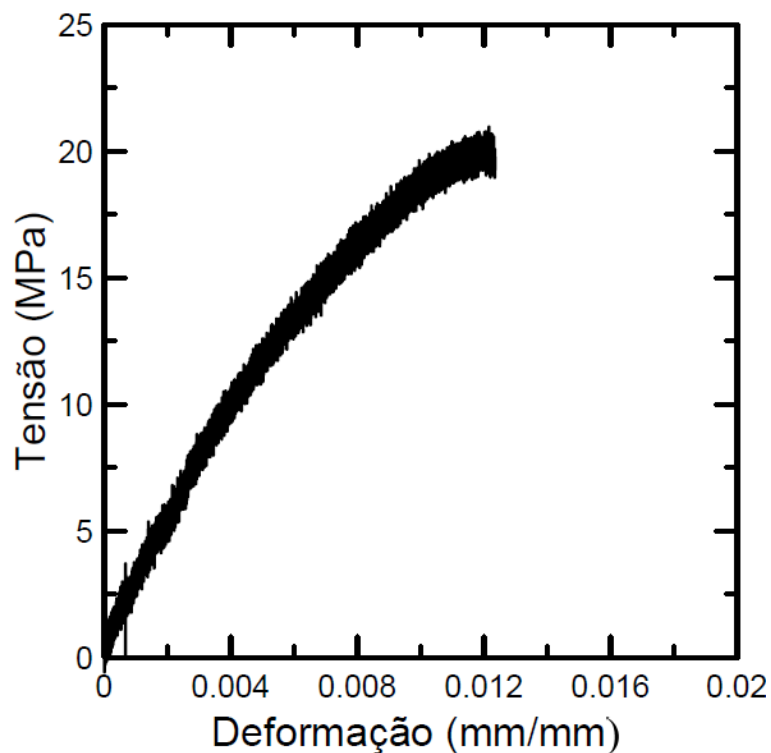


Figura 5.10 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com uma camada de fibra de juta.

Os compósitos reforçados com fibras de juta, ao serem tracionados, apresentam comportamento linear ou quase-linear até a ruptura. Em ambos os casos os corpos de prova mostram-se materiais frágeis nos quais as forças máximas são iguais as forças de ruptura, ou seja, não foi observado nenhum escoamento ou *strain hardening* do compósito. Essa característica pode ser comprovada unindo-se as duas partes dos corpos de prova após colapso. Verifica-se que as peças se encaixam sem que haja nenhuma deformação da seção transversal, nenhum estreitamento na região de corte.

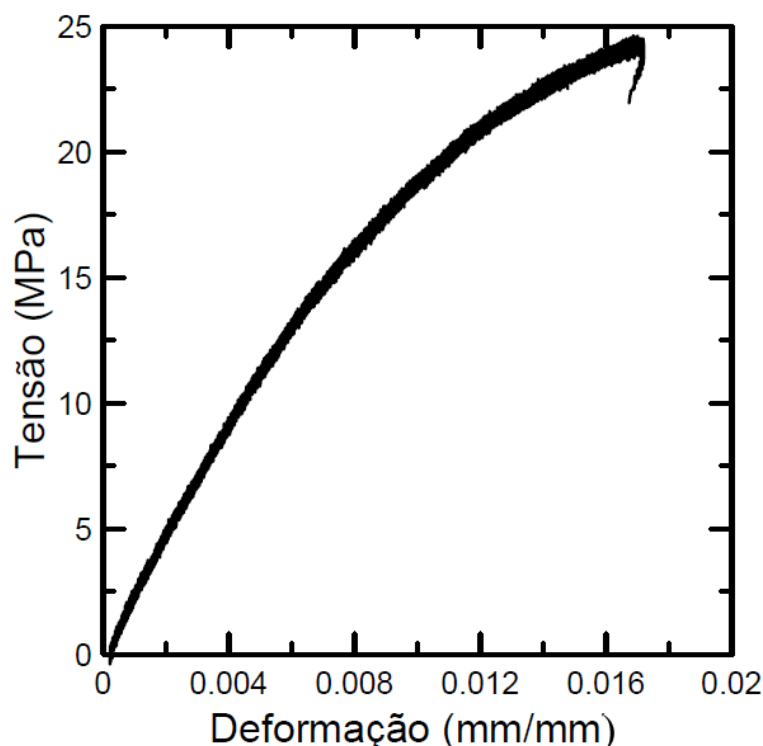


Figura 5.11 Diagrama tensão-deformação para tração no compósito reforçado com três camadas de fibra de juta.

É possível observar, também, a relação de dependência entre a resistência à tração e a quantidade de fibras inseridas na matriz. O aumento da fração volumétrica da fibra, pela regra das misturas, promove um aumento no módulo de elasticidade (63,39%) e na resistência à tração dos compósitos (37,12%).

Frequentemente compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais apresentam fraca adesão fibra/matriz, necessitando de tratamento que modifique a superfície da fibra, alterando principalmente sua rugosidade. A natureza inerentemente polar e hidrofílica das fibras lignocelulósicas e as características apolares da maioria dos polímeros resultam em uma interação ineficiente na interface, constituindo o ancoramento mecânico o principal mecanismo de aderência fibra/matriz em compósitos reforçados com fibras naturais.

A partir da Figura 5.12, é possível comparar as fibras sintéticas e as naturais. Mecanicamente, apresentam mesmo comportamento, ou seja, são materiais frágeis, lineares elásticos (ou quase-lineares) até a ruptura. A maior diferença se encontra nos valores de resistência e módulo de elasticidade que divergem entre si na ordem de dez vezes. Com aumento da fração de fibras,

ambos os compósitos apresentam ganho de resistência e módulo, conforme já citado e esperado.

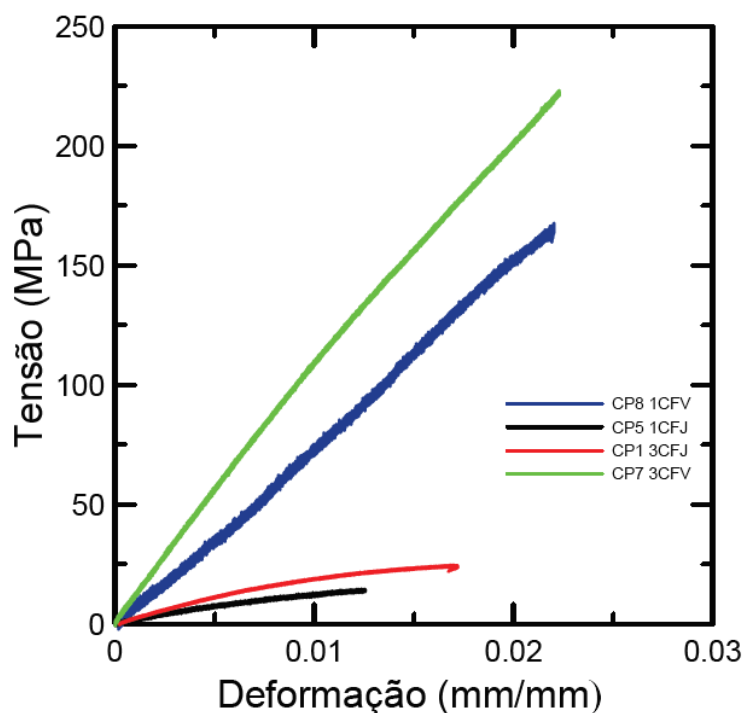


Figura 5.12 Diagramas tensão-deformação representativos para tração nos compósitos reforçados com fibras de juta e vidro.

### 5.3. Ensaio de flexão

#### 5.3.1. Série de referência SR

O comportamento nos ensaios de flexão de quatro pontos das vigas de madeira não reforçadas segue apresentado na Figura 5.13. Na Tabela 5.16 estão sumarizados os resultados para 4 dos 5 corpos de prova ensaiados, apresentando a força última, deslocamento máximo para esta força e rigidez com os respectivos coeficientes de variação.

A rigidez das peças foi calculada conforme equação [5.1] apresentada a seguir. Sendo assim, é o coeficiente angular do trecho linear do diagrama momento-curvatura das vigas quando solicitadas á flexão.

$$EI = \frac{M_{50\%} - M_{10\%}}{\phi_{50\%} - \phi_{10\%}} \quad [5.1]$$

Para obtenção do diagrama momento curvatura, duas fórmulas foram utilizadas e seguem apresentadas abaixo:

$$M = \frac{Fa}{2} \quad [5.2]$$

Para F igual a força aplicada pelo atuador hidráulico, a a distância do apoio ao primeiro ponto de aplicação da carga.

$$Curvatura(\Phi) = \frac{24\delta}{L^2\left(3-4\frac{a^2}{L^2}\right)} \quad [5.3]$$

Para L igual ao vão livre das vigas ensaiadas e  $\delta$  igual a flecha encontrada no meio do vão. Esta equação foi retirada do estudo do Calderoni et al. (2006).

Tabela 5.16 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para quatro vigas de madeira não reforçadas.

Nº do CP	Força Última (kN)	Deslocamento na força última (mm)	EI (kN.m <sup>2</sup> )
1	15,54	30,32	153,20
2	17,18	37,78	132,38
3	9,17	23,90	109,38
4	10,30	26,13	108,56
Média	13,05	29,53	125,88
C.V.	29,97%	20,69%	16,92%

O quinto corpo de prova foi descartado desta análise pois foi o único, desta série de vigas, classificado, visualmente, como madeira de primeira categoria devido a um menor número de imperfeições, ou seja, quantidade reduzida de nós, ausência de fendas e locais com perda de seção. Os resultados do CP5, muito superiores aos dos demais deste mesmo grupo, no entanto, constam no anexo A. Os demais corpos de prova, também avaliados segundo os critérios da norma alemã DIN4074, foram considerados como sendo de segunda categoria.

A força última média foi de 13,05 kN (coeficiente de variação igual a 29,97%) e flecha máxima de 29,53 mm (coeficiente de variação igual a 20,69%).

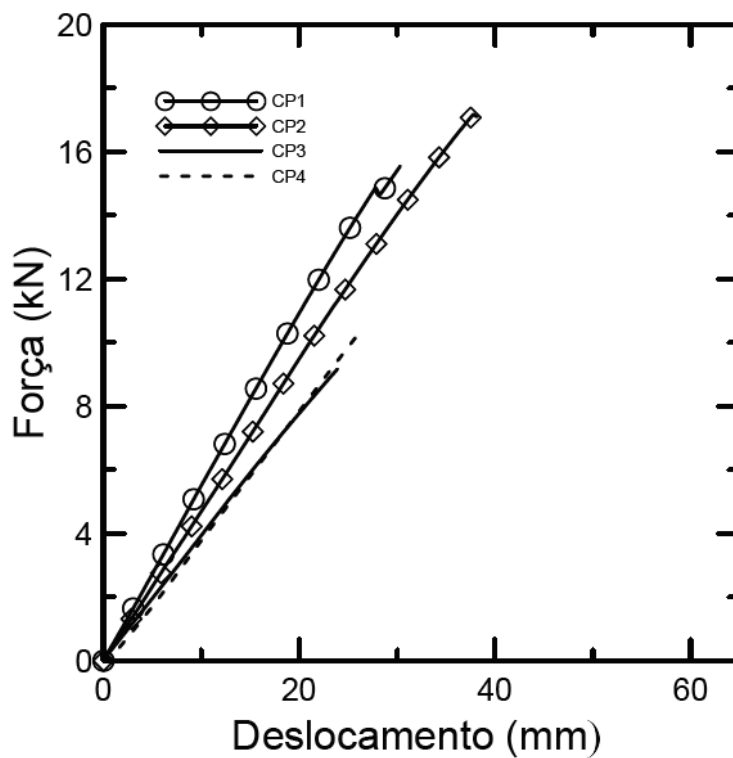


Figura 5.13 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira sem reforço.

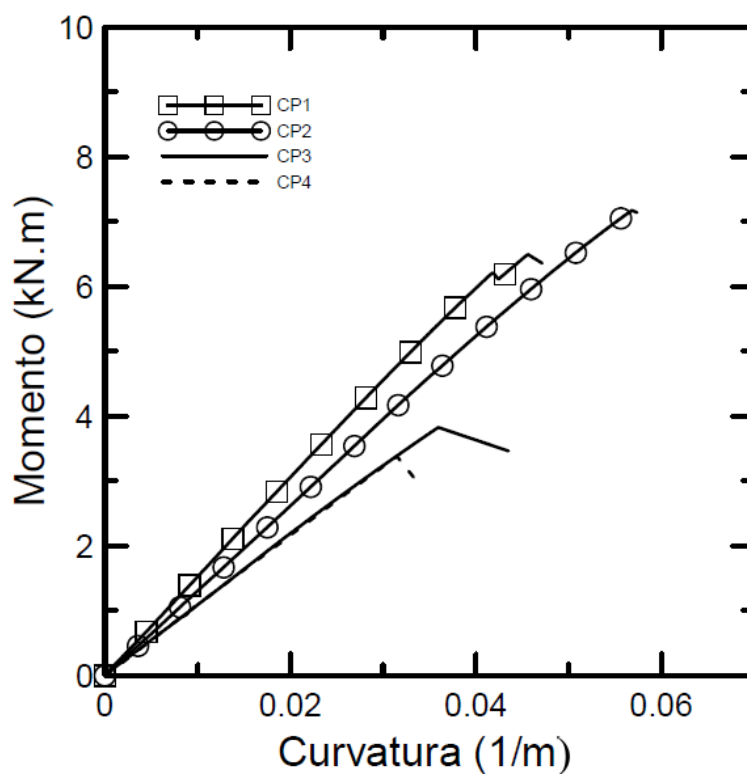


Figura 5.14 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira sem reforço.

A partir dos diagramas força-deslocamento (Figura 5.13) e dos diagramas momento-curvatura (Figura 5.14), esta madeira, quando submetida a esforços de

flexão, apresenta ruptura nas fibras tracionadas, característica justificada pela linearidade do gráfico até o ponto de ruptura. Todas as vigas apresentadas nesta seção foram classificadas como vigas de segunda categoria, com qualidade bastante inferior e, por isso, a plastificação das fibras comprimidas não chega a ocorrer antes da ruptura à tração.

Essa conclusão foi baseada no estudo feito por Buchanan (1990) que, pelo diagrama momento-curvatura obtido a partir dos ensaios de flexão, é possível concluir o modo de ruptura das peças. Ou seja, diagramas onde se observa uma reta até o último ponto do gráfico indica colapso por tração nas fibras inferiores conforme apresentado na Figura 5.15.

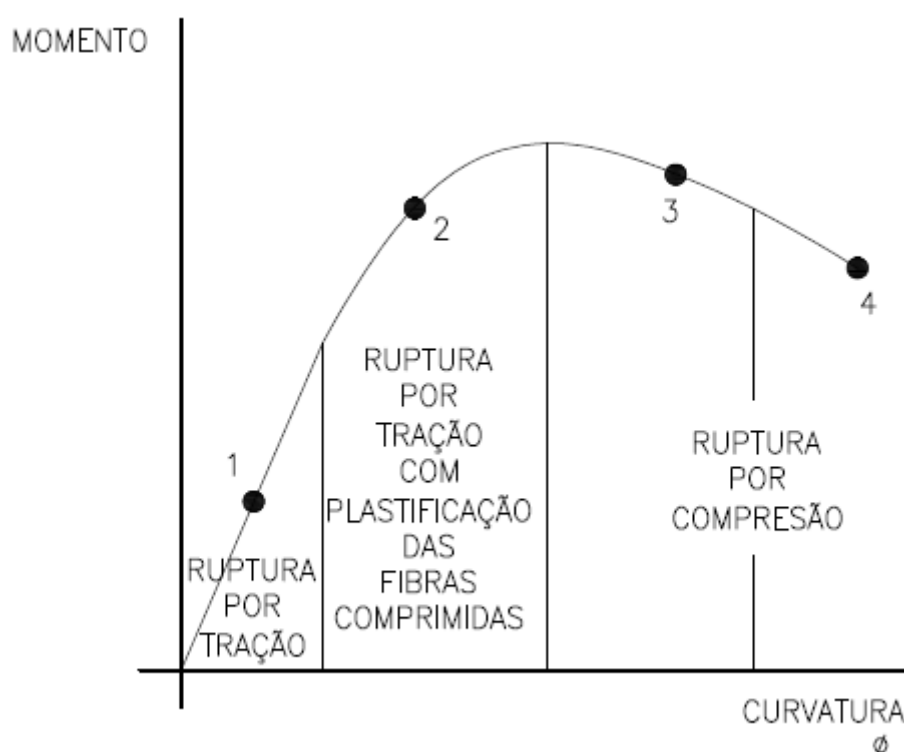


Figura 5.15 Relação entre o diagrama momento-curvatura e os modos de ruptura da madeira quando solicitada à flexão.

### 5.3.2. Série 1CFV

Os diagramas obtidos a partir dos ensaios de quatro pontos das vigas de madeira reforçadas com uma camada de compósito de fibra de vidro seguem apresentados na Figura 5.16. Na Tabela 5.17 estão sumarizados os resultados dos 5 corpos de prova ensaiados, apresentando a força última, deslocamento máximo

para esta força, rigidez com os respectivos coeficientes de variação e modos de ruptura observados.

Tabela 5.17 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para cinco vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

Nº do CP	Força Última (kN)	Deslocamento na Força última (mm)	EI (kN.m <sup>2</sup> )	Modo de Ruptura
1	25,65	69,96	150,48	Tração com plastificação das fibras comprimidas
2	20,38	45,70	139,10	Tração com plastificação das fibras comprimidas
3	20,92	48,86	135,53	Tração
4	15,16	35,68	129,77	Tração
5	18,73	61,50	101,82	Tração com plastificação das fibras comprimidas
Média	20,17	52,34	131,34	-
C.V.	18,85%	25,78%	13,82%	-

A força última média obtida foi de 20,17 kN (coeficiente de variação igual a 18,85%) e flecha máxima de 52,34 mm (coeficiente de variação igual a 25,78%). Observa-se, assim, um aumento na força última igual a 54,56% em relação às vigas não reforçadas, mas sem aumento significativo na rigidez das peças.

A principal diferença dessas vigas reforçadas quando comparadas à série de referência, além do ganho obtido pela força máxima, é que se nota, em 3 das 5 vigas, um comportamento linear até um ponto de limite de proporcionalidade. A partir deste ponto, as vigas apresentam comportamento não linear (Figura 5.17). Isso quer dizer que a presença das fibras de reforço altera a posição da linha neutra da viga, possibilitando, assim, a ocorrência da plastificação das fibras comprimidas, o que não é observado nas peças sem reforço.



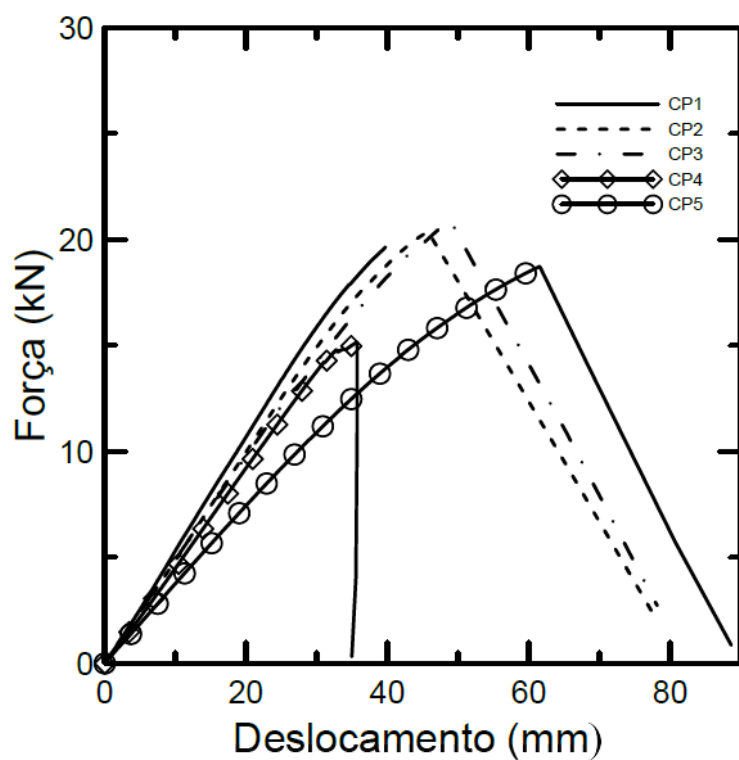


Figura 5.16 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

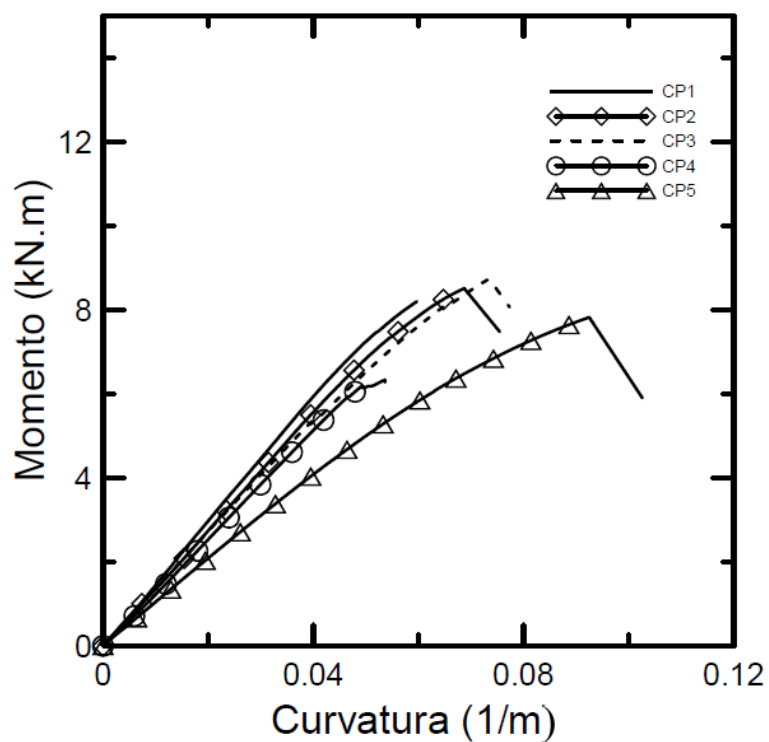


Figura 5.17 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

### 5.3.3. Série 3CFV

Ao serem adicionadas mais duas camadas de fibra de vidro ao sistema de reforço, novos diagramas força-deslocamento foram obtidos e seguem apresentados na Figura 5.18. Na Tabela 5.18 estão sumarizados os resultados dos 6 corpos de prova ensaiados, apresentando a força última, deslocamento máximo para esta força e a rigidez.

Tabela 5.18 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para seis vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	Categoria	Força Última (kN)	Deslocamento na Força última (mm)	EI (kN.m <sup>2</sup> )	Modo de Ruptura
1	3ª	18,67	80,69	100,09	Tração com plastificação das fibras comprimidas
2	3ª	11,40	40,51	95,41	Tração com plastificação das fibras comprimidas
3	2ª	25,24	65,36	129,96	Tração com plastificação das fibras comprimidas
4	2ª	20,66	43,98	136,53	Tração
5	2ª	25,06	54,24	152,30	Tração
6	3ª	15,69	80,74	86,76	Tração com plastificação das fibras comprimidas
Média 2ªcat.	-	23,65	54,52	139,60	-
C.V. 2ªcat.	-	10,97%	19,61%	8,22%	-
Média 3ªcat.	-	15,25	67,31	94,09	-
C.V. 3ªcat.	-	23,95%	34,49%	7,19%	-

É possível observar dois grupos de resultados a partir dos diagramas da Figura 5.18. Os corpos de prova de números 3, 4 e 5, então, foram classificados como de segunda categoria, enquanto os CP 1, 2 e 6 de terceira categoria. Como já levantado anteriormente, a qualidade da madeira está diretamente ligada com suas propriedades mecânicas. Além disso, por tratar-se de um material orgânico e heterogêneo, a dispersão dos resultados é comum e compreensível. Por esses motivos verificam-se dois comportamentos diferentes em um mesmo sistema de reforço.

Mesmo com forças últimas e módulos de elasticidade diferentes, o comportamento não linear a partir de um ponto de proporcionalidade também é

observado com a utilização do reforço em três camadas de fibra de vidro em ambas as categorias de qualidade observadas para esta série de corpos de prova.

Logo, observa-se um aumento na força última igual a 81,23% em relação às vigas não reforçadas para os corpos de prova considerados como de segunda categoria, ainda sem alterações conclusivas na rigidez das peças (Figura 5.19). Já para os de terceira categoria, houve um aumento na força última, porém, este aumento foi de apenas 16,86%, sem acréscimos na rigidez.

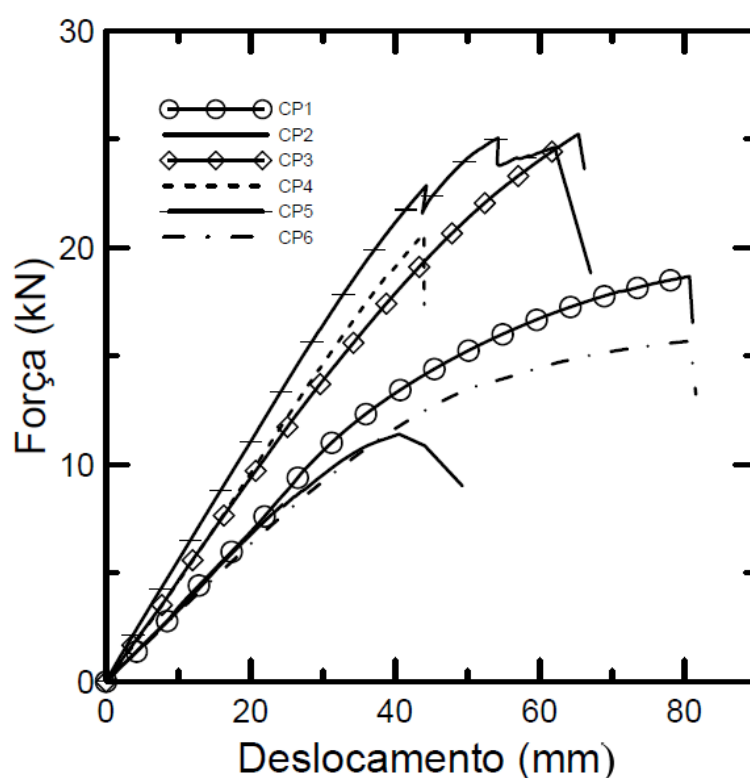


Figura 5.18 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

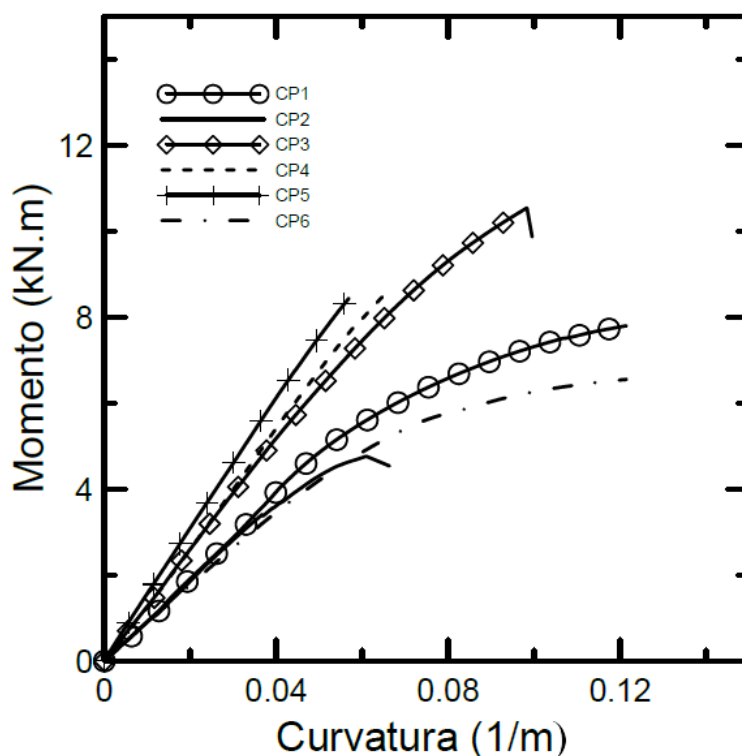


Figura 5.19 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

#### 5.3.4. Série 1CFJ

O reforço realizado com compósitos em fibras de juta apresenta comportamento diferente do observado com fibras de vidro, fato que pode ser justificado com a resistência à tração e módulo de elasticidade muito inferiores desses compósitos de fibras naturais quando comparado aos sintéticos.

Sendo assim, o diagrama força-deslocamento para a viga reforçada com uma camada de fibra de juta, apresentado na Figura 5.20, mostra uma relação linear entre a força e o deslocamento até a ruptura da peça quando solicitada à flexão, significando, então, que o momento de inércia da fibra adicionada não aprimora as propriedades geométricas da viga para que possa ocorrer a plastificação das fibras comprimidas antes do colapso. Esta mesma linearidade é verificada na Figura 5.21.

O resultado obtido para a única viga ensaiada segue exposto na Tabela 5.19 na qual se observa um aumento de 16,09% na força última sem alterações significativas na rigidez. Devido a esse pequeno acréscimo, foi optado por não dar

continuidade nos ensaios com compósitos de apenas uma camada de fibra de juta, passando, então para os de três camadas.

Tabela 5.19 Resultado do ensaio de flexão a 4 pontos para uma viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

Nº do CP	Força Última (kN)	Deslocamento na Força última (mm)	EI (kN.m <sup>2</sup> )	Modo de Ruptura
1	15,15	38,93	119,74	Tração

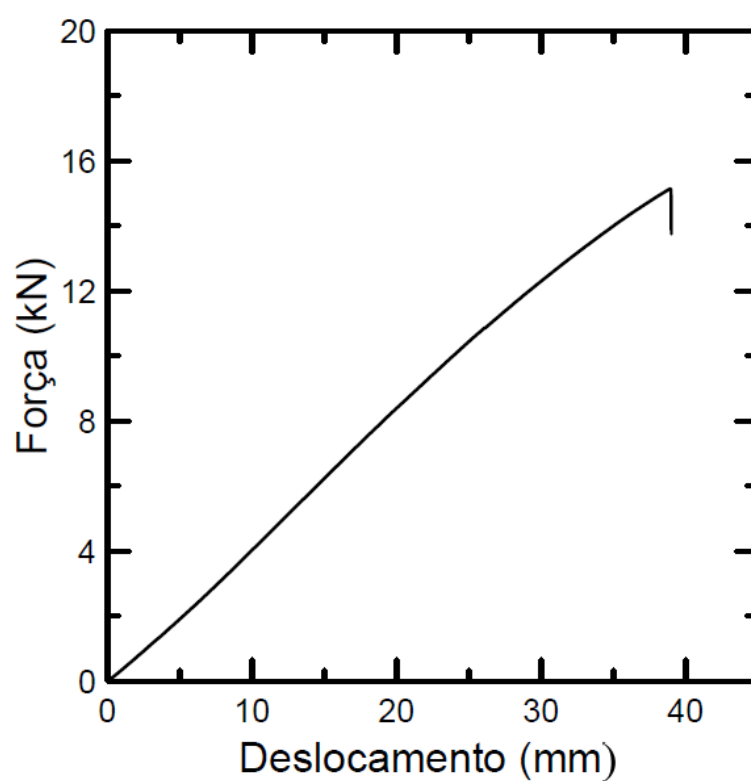


Figura 5.20 Diagrama força-deslocamento para flexão na viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

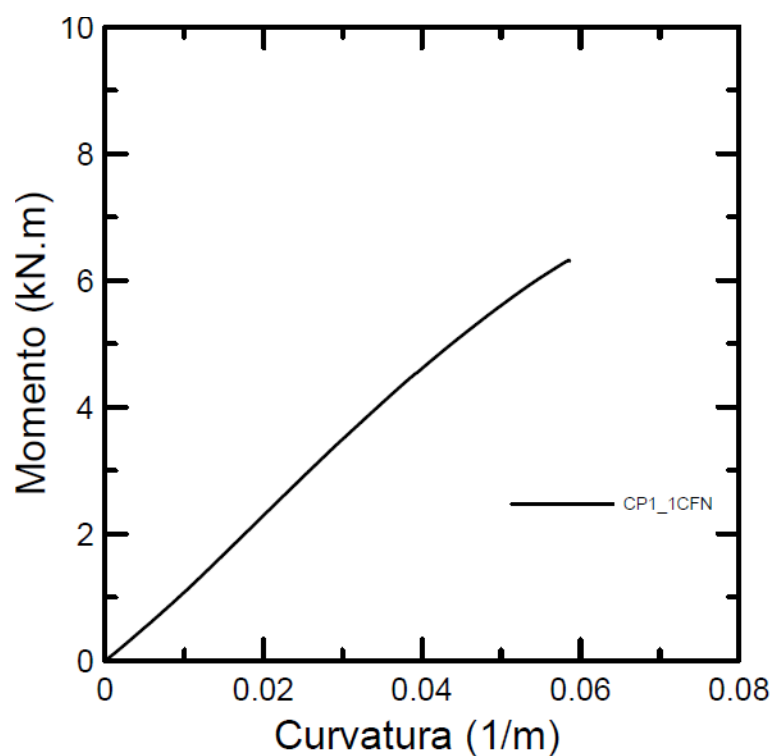


Figura 5.21 Diagrama momento-curvatura para flexão na viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

### 5.3.5. Série 3CFJ

A última série de corpos de prova envolvem peças com reforço em três camadas de fibra de juta e seus resultados seguem sumarizados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos para cinco vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

Nº do CP	Força Última (kN)	Deslocamento na Forço última (mm)	EI (kN.m <sup>2</sup> )	Modo de Ruptura
1	15,75	33,16	123,48	Tração
2	19,75	30,87	172,42	Tração
3	21,12	33,77	152,12	Tração
4	10,61	31,23	165,24	Tração com plastificação das fibras comprimidas
5	14,78	23,70	126,87	Tração
Média	16,40	30,54	148,03	
C.V.	25,52%	13,16%	14,95%	

Em 4 das 5 vigas, quando se adiciona mais duas camadas de fibra de juta, o comportamento continua linear conforme observado nos diagramas força-deslocamento da Figura 5.22 e momento-curvatura da Figura 5.23, indicando que,

mesmo com o aumento da fração volumétrica das fibras no sistema de reforço, ela ainda é insuficiente para promover a plastificação das fibras comprimidas antes da ruptura das peças.

A força última foi melhorada em 25,67% quando comparadas às vigas da série de referência. E, é a primeira série em que se nota aumento da rigidez das peças com acréscimo do sistema de reforço. Esse aumento é de aproximadamente 18%.

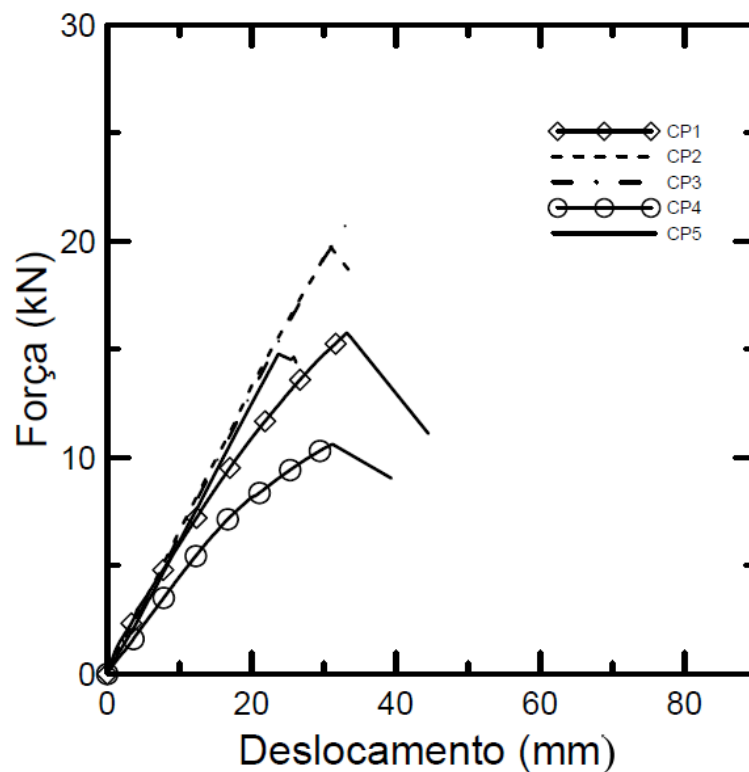


Figura 5.22 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

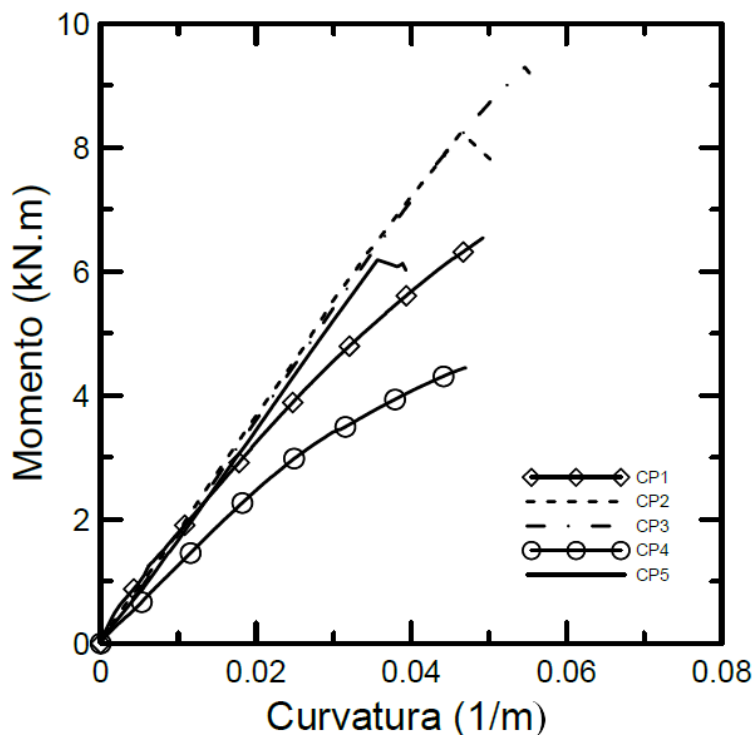


Figura 5.23 Diagramas momento-curvatura para flexão nas vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

Sendo assim, verifica-se ganho na força última para as vigas reforçadas com compósitos formados por fibras de vidro, com um aumento considerável na mesma ao serem adicionadas mais duas camadas de reforço. Ou seja, variando-se de 1 camada para 3 camadas, verifica-se um aumento na força máxima de 28,60% se forem consideradas apenas as peças classificadas como sendo de mesma categoria de qualidade.

Já para as vigas reforçadas com fibras de juta, o ganho na força última foi pequeno, e, considerando a quantidade de resina epóxi necessária para a sua execução, não tão vantajoso quando as reforçadas com fibra de vidro. Em contrapartida, o aumento do número de camadas de reforço com este tipo de material promove um aumento considerável na rigidez das peças (17,60%).

A comparação do comportamento das vigas das cinco séries ensaiadas neste estudo segue apresentado nos diagramas força-deslocamento representativos da Figura 5.24 e momento-curvatura da Figura 5.25.

Como é possível perceber, mesmo já tendo concluído que a resistência à tração dos compósitos reforçados com fibras de vidro é cerca de dez vezes maior que os de fibra de juta, essa diferença na ordem de grandeza não é verificada na



força última das vigas fletidas. Mostrando, então, a aplicabilidade da fibra de juta como reforço em vigas de madeira com baixa qualidade e resistência.

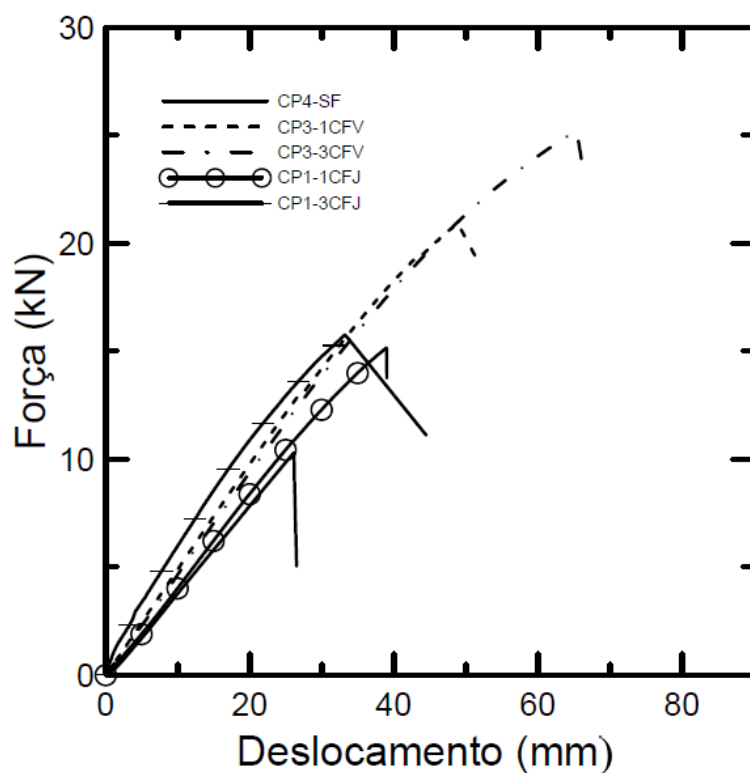


Figura 5.24 Diagramas força-deslocamento para flexão nas vigas de madeira das 5 séries ensaiadas.

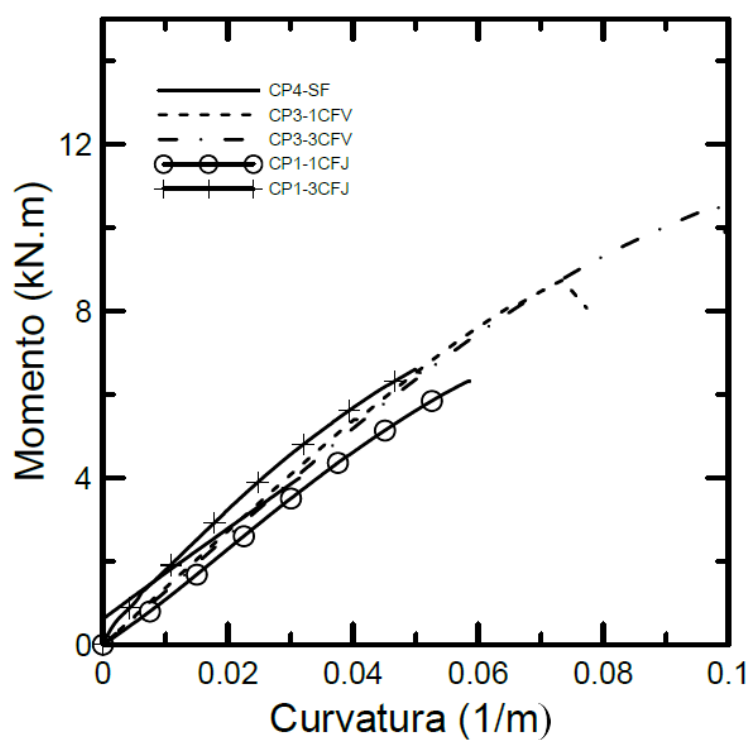


Figura 5.25 Diagramas momento curvatura para flexão nas vigas de madeira das 5 séries ensaiadas.

Não foi verificada, porém, nenhuma redução significativa no coeficiente de variação dos resultados com a utilização do reforço. Conforme levantado na literatura, os compósitos auxiliariam num comportamento mais uniforme das vigas. Isso pode ser justificado pela pequena de corpos de prova ensaiados por série durante esta pesquisa.

A literatura utilizada como revisão bibliográfica para este estudo cita o aumento da força última quando aplicado o reforço em vigas de madeira de diversas espécies diferentes. Esse reforço pode ser executado com fibras sintéticas como as de vidro, carbono e aço ou então as naturais como basalto, linho, bambu, cânhamo e juta. Comparando os resultados apenas com estudos que utilizam sistemas de reforços semelhantes, verifica-se acréscimos próximos, com 7 camadas de fibra de bambu, 2 camadas de fibra de basalto ou 2 de cânhamo em um abeto da espécie *Albies Alba* (Borri et al. 2013). Quanto ao reforço com tecido de fibras de vidro esperava-se aumento de 25 a 50% para frações em massa de fibra entre 20 e 80% (Gentile 2000).

## 6 Modelo analítico

### 6.1. Modelo básico de seção composta (método da seção transformada)

São apresentados na Tabela 6.1 a seguir os valores de módulo de elasticidade obtidos através dos ensaios descritos e analisados anteriormente, para a madeira e para os compósitos reforçados com fibras de vidro e juta.

Tabela 6.1 Parâmetros de entrada para o cálculo da rigidez das vigas a partir do primeiro modelo de cálculo.

Parâmetro	Valores (GPa)
Módulo de elasticidade para a madeira quando solicitada à compressão paralela às fibras	1,48
Módulo de elasticidade para o compósito reforçado com uma camada de fibra de vidro quando solicitado à tração	8,54
Módulo de elasticidade para o compósito reforçado com uma camada de fibra de vidro quando solicitado à tração	11,41
Módulo de elasticidade para o compósito reforçado com uma camada de fibra de juta quando solicitado à tração	1,12
Módulo de elasticidade para o compósito reforçado com uma camada de fibra de juta quando solicitado à tração	1,83

Esses valores de módulo de elasticidade foram obtidos diretamente a partir de ensaios axiais de compressão em corpos de prova reduzidos. Conforme exposto por Buchanan (1990), e apresentado

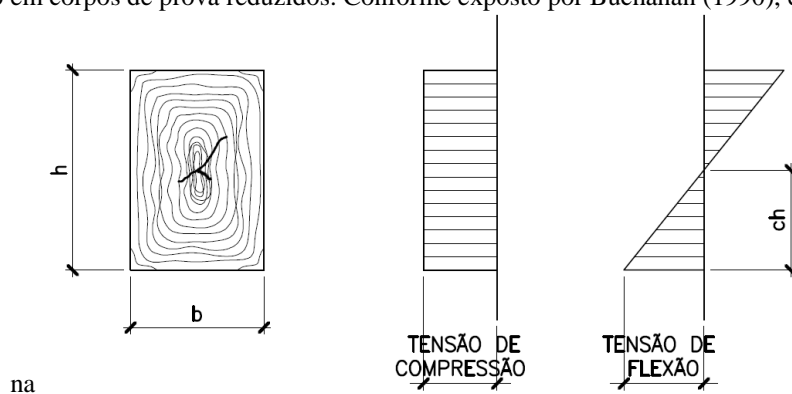


Figura 6.1, por estarem sendo avaliados corpos de prova submetidos à flexão, um ajuste é necessário antes de serem aplicados nas fórmulas expostas no item 3 e segue apresentado na fórmula [6.1].

$$E^* = \left( \frac{k_3 + 1}{c} \right)^{\frac{1}{k_3}} E \quad [6.1]$$

Para  $k_3$  igual a 10, valor sugerido por Buchanan para o fator de correção da distribuição de esforços entre peças submetidas a esforços axiais e de flexão (Buchanan 1990). E para  $c$  igual a razão entre a distância da fibra inferior mais externa à linha neutra e a altura da viga.

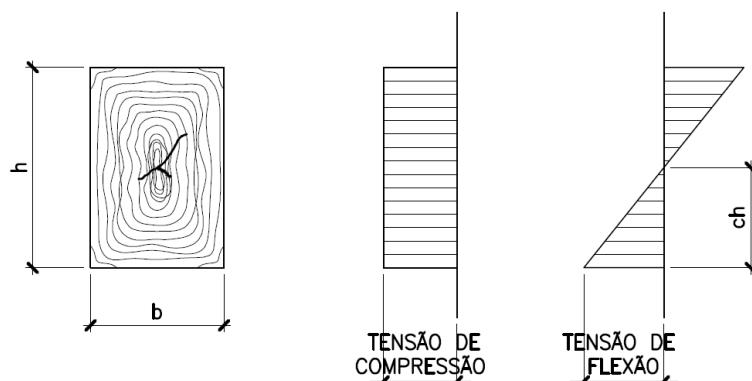


Figura 6.1 Distribuições das tensões de compressão e flexão na seção transversal.

### 6.1.1. Série SR

Esta primeira série, por ser formada por vigas de seção simples, apresenta resultados que podem ser retirados diretamente de equações conhecidas de resistência dos materiais. Sendo assim, a rigidez  $EI$  é igual a  $67,17 \text{ kN.m}^2$ , cerca de 53,36% do obtido experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.2.

A partir da equação [3.8] apresentada na seção 3.2, se obtém o momento de ruptura médio teórico igual a  $2,98 \text{ kN.m}$ , equivalendo a 52,51% do momento último experimental.

Tabela 6.2 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas não reforçadas.

Nº do CP	$c$ (m)	$E^*$ (kPa)	$\delta$ na força última (mm)	$EI_{\text{teo}}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{\text{teo}}$ (kN.m)	$EI_{\text{exp}}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{\text{exp}}$ (kN.m)	$EI_{\text{teo}}/EI_{\text{exp}}$
CP1-SR	0,11259	2,34E+06	30,32	65,82	3,00	153,20	6,98	42,96%
CP2-SR	0,09125	2,40E+06	37,78	67,22	3,82	132,38	7,52	50,78%
CP3-SR	0,08214	2,42E+06	23,90	67,93	2,44	109,38	3,93	62,10%
CP4-SR	0,08469	2,41E+06	26,13	67,72	2,66	108,56	4,27	62,38%

### 6.1.2. Série 1CFV

Os parâmetros necessários para o cálculo do módulo de elasticidade de uma seção mista de madeira com uma camada de fibra de vidro, transformada em uma seção equivalente de compósito, no regime elástico, seguem apresentados abaixo.

$$n = \frac{E_{mad}^*}{E_{comp}} = \frac{2,43}{8,54} = 0,284$$

$$b' = b \times n = 10 \times 0,284 = 2,84cm$$

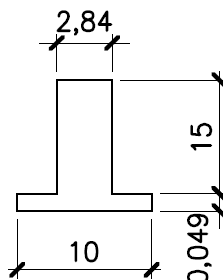


Figura 6.2 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 1CFV (dimensões em cm).

$$I = 8,26 \times 10^{-6} m^4$$

Sendo assim, a rigidez  $EI$  é igual a 70,56 kN.m<sup>2</sup>, cerca de 53,72% do obtido experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.3. Já o momento de ruptura médio teórico igual a 5,55 kN.m, equivalendo a 53,68% do momento último experimental.

Tabela 6.3 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

Nº do CP	c (m)	E (kPa)	δ na força última (mm)	$EI_{teo}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{teo}$ (kN.m)	$EI_{exp}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{exp}$ (kN.m)	$EI_{teo}/EI_{exp}$
CP1-1CFV	0,08989	8,54E+06	69,96	70,56	7,42	150,48	15,83	46,89%
CP2-1CFV	0,06635	8,54E+06	45,70	70,56	4,85	139,10	9,56	50,72%
CP3-1CFV	0,07835	8,54E+06	48,86	70,56	5,18	135,53	9,96	52,06%
CP4-1CFV	0,08392	8,54E+06	35,68	70,56	3,78	129,77	6,96	54,37%
CP5-1CFV	0,07701	8,54E+06	61,50	70,56	6,52	101,82	9,42	69,29%

### 6.1.3. Série 3CFV

Os parâmetros necessários para o cálculo do módulo de elasticidade de uma seção mista de madeira com três camadas de fibra de vidro, transformada em uma seção equivalente de compósito, no regime elástico, seguem apresentados abaixo.

$$n = \frac{E_{mad}}{E_{comp}} = \frac{2,37}{11,41} = 0,208$$

$$b' = b \times n = 10 \times 0,208 = 2,08cm$$

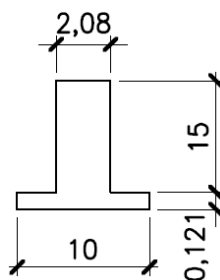


Figura 6.3 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 3CFV (dimensões em cm).

$$I = 6,52 \times 10^{-6} m^4$$

Sendo assim, a rigidez  $EI$  é igual a 74,35 kN.m<sup>2</sup>, cerca de 63,64% do obtido experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.4. Já o momento de ruptura médio teórico igual a 6,81 kN.m, equivalendo a 65,17% do momento último experimental.

Tabela 6.4 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	c (m)	E (kPa)	$\delta$ na força última (mm)	$EI_{teo}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{teo}$ (kN.m)	$EI_{exp}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{exp}$ (kN.m)	$EI_{teo}/EI_{exp}$
CP1-3CFV	0,08920	11,41E+06	80,69	74,35	9,02	100,01	12,13	74,34%
CP2-3CFV	0,12265	11,41E+06	40,51	74,35	4,53	95,43	5,81	77,91%
CP3-3CFV	0,07706	11,41E+06	65,36	74,35	7,31	129,96	12,77	57,21%
CP4-3CFV	0,10898	11,41E+06	43,98	74,35	4,92	136,53	9,03	54,46%
CP5-3CFV	0,09743	11,41E+06	54,24	74,35	6,06	152,30	12,42	48,82%
CP6-3CFV	0,09834	11,41E+06	80,74	74,35	9,03	86,76	10,53	85,70%

#### 6.1.4. Série 1CFJ

Os parâmetros necessários para o cálculo do módulo de elasticidade de uma seção mista de madeira com uma camada de fibra de juta, transformada em uma seção equivalente de madeira, no regime elástico, seguem apresentados abaixo.

$$n = \frac{E_{comp}}{E_{mad}} = \frac{1,12}{2,41} = 0,465$$

$$b' = b \times n = 10 \times 0,465 = 4,65 cm$$

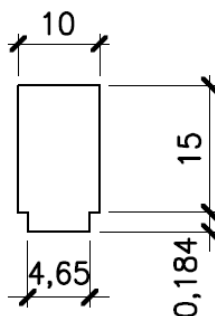


Figura 6.4 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 1CFJ (dimensões em cm).

$$I = 2,86 \times 10^{-5} m^4$$

Sendo assim, a rigidez  $EI$  é igual a 69,00 kN.m<sup>2</sup>, cerca de 57,63% do obtido experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.5. Já o momento de ruptura médio teórico igual a 4,04 kN.m, equivalendo a 57,63% do momento último experimental.

Tabela 6.5 Valor de rigidez obtido experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teórico obtido a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com uma camada de fibra de juta.

Nº do CP	c (m)	E* (kPa)	δ na força última (mm)	EI <sub>teo</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	M <sub>teo</sub> (kN.m)	EI <sub>exp</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	M <sub>exp</sub> (kN.m)	EI <sub>teo</sub> /EI <sub>exp</sub>
CP1-1CFJ	0,08	2,41E+06	38,93	69,00	4,04	119,74	7,01	57,63%

### 6.1.5. Série 3CFJ

Os parâmetros necessários para o cálculo do módulo de elasticidade de uma seção mista de madeira com três camadas de fibra de juta, transformada em uma seção equivalente de compósito, no regime elástico, seguem apresentados abaixo.

$$n = \frac{E_{comp}}{E_{mad}} = \frac{1,83}{2,39} = 0,765$$

$$b' = b \times n = 10 \times 0,765 = 7,65 cm$$

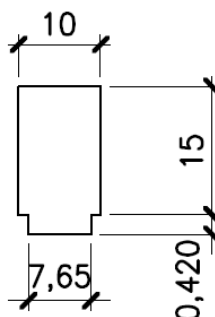


Figura 6.5 Seção transversal transformada para vigas reforçadas com 3CFJ (dimensões em cm).

$$I = 3,02 \times 10^{-5} m^4$$

Sendo assim, a rigidez  $EI$  é igual a 65,12 kN.m<sup>2</sup>, cerca de 57,95% menor que o obtido experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.6. Já o momento de ruptura médio teórico igual a 3,11 kN.m, 54,63% menor que o momento último experimental.

Tabela 6.6 Valores de rigidez obtidos experimentalmente a partir do diagrama momento-curvatura e teóricos obtidos a partir do modelo de cálculo 1 para vigas reforçadas com três camadas de fibra de juta.

Nº do CP	c (m)	E* (kPa)	$\delta$ na força última (mm)	$EI_{teo}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{teo}$ (kN.m)	$EI_{exp}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{exp}$ (kN.m)	$EI_{teo}/EI_{exp}$
CP1-3CFJ	0,11	2,36E+06	33,16	70,64	3,52	123,48	6,16	57,21%
CP2-3CFJ	0,08	2,41E+06	30,87	72,37	3,36	172,42	8,00	41,97%
CP3-3CFJ	0,09	2,39E+06	33,77	71,77	3,64	152,12	7,72	47,18%
CP4-3CFJ	0,10	2,37E+06	31,23	71,05	3,34	165,24	7,76	43,00%
CP5-3CFJ	0,08	2,41E+06	23,70	72,31	2,58	126,87	4,52	57,00%

A Tabela 6.7 apresenta os resultados sintetizados para as rigidezes à flexão e momentos de ruptura, seguindo o primeiro modelo teórico de cálculo e as rigidezes e momentos considerando os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 6.7 Resultados para a rigidez à flexão e momentos de ruptura obtidos a partir do modelo numérico 1 e dos ensaios em laboratório para as cinco séries de vigas.

Série	$EI_{teo}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{teo}$ (kN.m)	$EI_{exp}$ (kN.m <sup>2</sup> )	$M_{exp}$ (kN.m)	$EI_{teo}/EI_{exp}$	$M_{teo}/M_{exp}$
SR	67,17	2,98	125,88	5,68	53,36%	52,51%
1CFV	70,56	5,55	131,34	10,34	53,72%	53,68%
3CFV	74,35	6,81	116,83	10,45	63,64%	65,17%
1CFJ	69,00	4,04	119,74	7,01	57,63%	57,63%
3CFJ	71,19	3,41	143,31	6,86	49,68%	49,74%

Como é possível perceber pela tabela acima, o modelo numérico para o regime elástico de uma peça com seção transformada representa uma aproximação aceitável ao que foi obtido experimentalmente já que os resultados foram 50 a 65% dos obtidos na prática. Esse modelo poderia ser utilizado para o dimensionamento, pois garantiria a segurança estrutural das peças. Em contrapartida, não é muito econômico já que a divergência entre os valores é alta.

Uma justificativa para essa diferença considerável entre o comportamento teórico e o experimental está na constante utilizada para ajustar o módulo de elasticidade obtido a partir dos ensaios axiais de compressão paralela às fibras, transformando-o em um módulo de elasticidade à flexão. O coeficiente  $k_3$  adotado foi igual a 10 por recomendação de Buchanan (1990). Com a utilização de



coeficientes  $k_3$  menores que 10, o módulo de elasticidade seria maior, e assim, a rigidez e o momento de ruptura também, promovendo, então, uma variação menor entre o esperado e o obtido.

A maior parte das vigas ensaiadas nesta pesquisa rompeu por tração sem plastificação das fibras comprimidas. O modelo básico de cálculo apresentado nesta seção, então, seria uma metodologia aceitável para o dimensionamento das peças à ruptura, após calibração das constantes utilizadas, já que considera apenas o comportamento elástico das vigas quando solicitadas à flexão.

Algumas peças reforçadas, no entanto, demonstraram indícios de plastificação da zona comprimida, necessitando, assim, de uma análise no regime não linear, apresentada nas seções a seguir.

## 6.2.

### Modelo bilinear elasto-plástico (com patamar de plastificação)

Algumas das vigas reforçadas apresentaram ruptura com indícios de plastificação da zona comprimida. Esta seção supõe ruptura por tração com plastificação parcial das fibras comprimidas em todas as vigas de madeira ensaiadas.

Considerando que a maior parte das vigas ensaiadas tiveram comportamento linear até ruptura em termos das tensões de compressão e, conforme sugerido por Corradi e Borri (2007), foram adotadas as duas igualdades [6.2] e [6.3] abaixo para a realização dessa segunda análise numérica.

$$\varepsilon_{cmu} = 2\varepsilon_{cmo} \quad [6.2]$$

$$k = 0,02 \quad [6.3]$$

A metodologia para obtenção da rigidez das peças, através das considerações citadas acima e pressupostos expostos no item 3.2, está apresentada na lista a seguir.

- Através das leituras de deformação relativa obtidas pelos extensômetros elétricos colados na face superior das vigas (zona comprimida) foram obtidas as deformações no limite de proporcionalidade do diagrama tensão de compressão-deformação conforme equação [6.2] para o momento em que a viga apresenta 50% da flecha máxima. A opção por se utilizar 50% da flecha

máxima é justificada pelo fato de que a rigidez experimental, apresentada no item 5.3, considerou intervalo elástico até este ponto de deslocamento.

- Utilizando os diagramas tensão-deformação obtidos por ensaios de compressão paralela às fibras conforme exposto nos itens 4.2.1.2.1.1 e 5.2.1.1.2, foram obtidas as tensões de compressão nas vigas de madeira.
- Por serem tensões obtidas através do ensaio de compressão, o mesmo ajuste indicado por Buchanan (1990) foi realizado para estas tensões conforme justificado no item e equação [6.4] a seguir.

$$\sigma^* = \left( \frac{k_3 + 1}{c} \right)^{\frac{1}{k_3}} \sigma \quad [6.4]$$

- Como não foram realizados ensaios de tração na madeira para definição do módulo de elasticidade à tração, e considerando que o somatório de forças da seção transversal da madeira é igual à zero (equações [3.3] a [3.6]), foi obtido o esforço de tração da madeira ( $F_{III}$ ).
- Com o somatório de forças equilibrado, foi obtido o momento atuante na linha neutra da seção transversal.
- Com o momento atuante na linha neutra da seção transversal, e utilizando o valor de 50% da flecha máxima, foi obtida a rigidez teórica conforme modelo 2 de cálculo seguindo equação [3.7].

### 6.2.1. Série SR

Os parâmetros adotados para cálculo da rigidez à flexão seguem apresentados na Tabela 6.8 e Figura 6.6. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas anteriormente nesta seção e no item 3.2.

Tabela 6.8 Parâmetros utilizados para cálculo da rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.

N° do CP	$\varepsilon_f$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mu}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mo}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$y'$ (m)	$y$ (m)	$\sigma^*$ (kPa)	50% $\delta$ (mm)
CP1-SR	0,00	5.396,95	2.698,47	0,06741	0,08259	3.597,39	15,16
CP2-SR	0,00	5.381,88	2.690,94	0,05875	0,09125	3.561,70	18,89
CP3-SR	0,00	3.600,31	1.800,15	0,06786	0,08214	2.272,58	11,95
CP4-SR	0,00	3.787,42	1.893,71	0,06531	0,08469	2.406,75	13,07

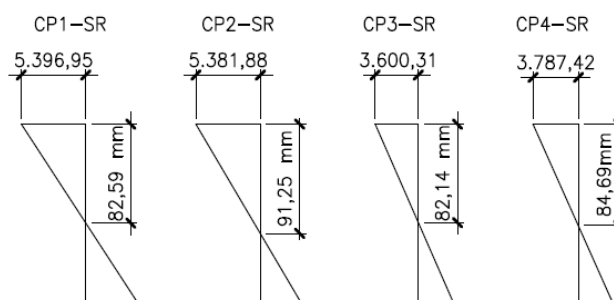


Figura 6.6 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 4 vigas sem reforço ensaiadas à flexão (valores de deformação em  $\mu\text{m/m}$ ).

Os valores obtidos para as vigas de madeira sem reforço seguem apresentados na Tabela 6.9. A rigidez das peças de madeira sem reforço é igual a 57,35 kN.m<sup>2</sup>, o que equivale a 45,56% do valor obtido experimentalmente.

Tabela 6.9 Resultados para rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.

N° do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
CP1-SR	0,00	14,86	14,86	0,00	65,18	153,20	42,54%
CP2-SR	0,65	15,93	16,58	0,00	58,34	132,38	44,07%
CP3-SR	0,37	9,15	9,52	0,00	52,98	109,38	48,44%
CP4-SR	0,41	9,99	10,40	0,00	52,91	108,56	48,73%

## 6.2.2. Série 1CFV

Os parâmetros adotados para da rigidez à flexão seguem apresentados na Tabela 6.10 e Figura 6.7. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas anteriormente nesta seção e no item 3.2.

Tabela 6.10 Parâmetros utilizados para cálculo da rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de vidro.

N° do CP	$\varepsilon_f$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mu}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mo}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$y'$ (m)	$y$ (m)	$\sigma^*$ (kPa)	50% $\delta$ (mm)
CP1-1CFV	5.686,39	9.399,95	4.699,98	0,05672	0,09377	7.441,94	34,98
CP2-1CFV	2.717,21	5.812,68	2.906,34	0,04794	0,10255	3.889,74	22,85
CP3-1CFV	2.912,35	6.151,38	3.075,69	0,04836	0,10213	4.162,74	24,43
CP4-1CFV	2.145,49	4.975,31	2.487,65	0,04534	0,10515	3.198,42	17,84
CP5-1CFV	2.834,59	6.597,31	3.298,66	0,04523	0,10526	4.558,08	30,75

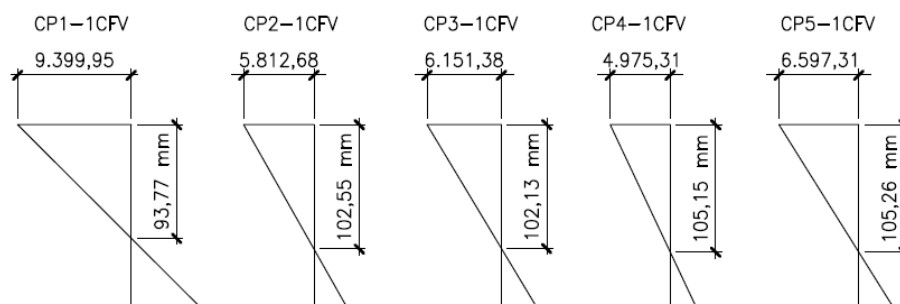


Figura 6.7 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 5 vigas reforçadas com uma camada de fibra de vidro ensaiadas à flexão (valores de deformação em  $\mu\text{m/m}$ ).

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro seguem apresentados na Tabela 6.11. A rigidez das peças é igual a 61,11 kN.m<sup>2</sup>, o que equivale a 46,53% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.11 Resultados para rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

N° do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	E <sub>lteo</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	E <sub>lexp</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	E <sub>lteo</sub> /E <sub>lexp</sub>
CP1-1CFV	1,40	34,19	33,21	2,38	68,51	150,48	45,53%
CP2-1CFV	0,80	19,55	19,21	1,14	59,73	139,10	42,94%
CP3-1CFV	0,85	20,83	20,46	1,22	59,55	135,53	43,94%
CP4-1CFV	0,67	16,48	16,25	0,90	64,45	129,77	49,66%
CP5-1CFV	0,96	23,51	23,28	1,19	53,30	101,82	52,34%

### 6.2.3. Série 3CFV

Os parâmetros adotados para cálculo da rigidez à flexão seguem apresentados na Tabela 6.12 e Figura 6.8. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas anteriormente e no item 3.2.

Tabela 6.12 Parâmetros utilizados para cálculo da rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	$\varepsilon_f$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mu}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\varepsilon_{mo}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$y'$ (m)	$y$ (m)	$\sigma^*$ (kPa)	50% $\delta$ (mm)
CP1-3CFV	3.982,20	7.059,67	3.529,83	0,05453	0,09668	5.029,70	40,34
CP2-3CFV	2.900,13	4.216,51	2.108,25	0,06162	0,08959	2.683,42	20,25
CP3-3CFV	4.173,33	7.278,88	3.639,44	0,05510	0,09611	5.198,93	32,68
CP4-3CFV	1.722,62	5.187,96	2.593,98	0,03769	0,11352	3.357,56	21,99
CP5-3CFV	4.722,58	7.407,47	3.703,74	0,05887	0,09234	5.349,59	27,12
CP6-3CFV	3.230,29	6.199,50	3.099,75	0,05180	0,09941	4.208,27	40,37

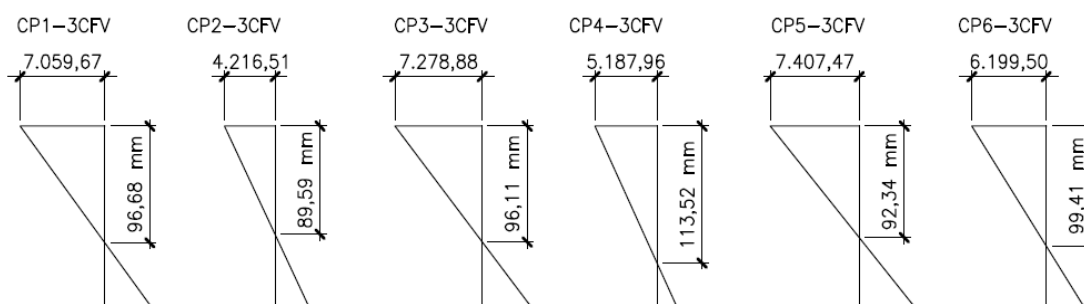


Figura 6.8 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das 6 vigas reforçadas com três camadas de fibra de vidro ensaiadas à flexão (valores de deformação em  $\mu\text{m/m}$ ).

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro seguem apresentados na Tabela 6.13. A rigidez das peças é igual a 50,10 kN.m<sup>2</sup>, valor que representa 42,89% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.13 Resultados para rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	El <sub>exp</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/El <sub>exp</sub>
CP1-3CFV	0,97	23,83	19,30	5,50	42,54	100,01	42,54%
CP2-3CFV	0,48	11,78	8,26	4,00	42,98	95,43	45,04%
CP3-3CFV	1,00	24,48	19,72	5,76	54,03	129,96	41,58%
CP4-3CFV	0,76	18,68	17,06	2,38	59,70	136,53	43,73%
CP5-3CFV	0,99	24,21	18,67	6,52	64,95	152,30	42,64%
CP6-3CFV	0,84	20,50	16,88	4,46	36,43	86,76	41,99%

## 6.2.4. Série 1CFJ

Os parâmetros adotados para cálculo da rigidez à flexão seguem apresentados na Tabela 6.14 e Figura 6.9. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas anteriormente e no item 3.2.

Tabela 6.14 Parâmetros utilizados para cálculo da rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

N° do CP	$\epsilon_f$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{\text{mu}}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{\text{mo}}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$y'$ (m)	$y$ (m)	$\sigma^*$ (kPa)	50% $\delta$ (mm)
CP1-1CFJ	1.531,33	4.246,97	2.123,49	0,04024	0,1116	2.663,05	19,47

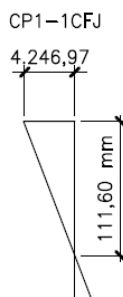


Figura 6.9 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, da viga reforçada com uma camada de fibra de juta ensaiadas à flexão (valor de deformação em  $\mu\text{m/m}$ ).

N° do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
CP1-1CFJ	0,59	14,56	14,84	0,32	51,92	119,74	43,36%

Os valores obtidos para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta seguem apresentados na Tabela 6.15. A rigidez da peça é igual a 51,92 kN.m<sup>2</sup> que representa valor igual a 43,36% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.15 Resultados para rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

N° do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
CP1-1CFJ	0,59	14,56	14,84	0,32	51,92	119,74	43,36%

### 6.2.5. Série 3CFJ

Os parâmetros adotados para cálculo da rigidez à flexão seguem apresentados na Tabela 6.16 e Figura 6.10. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas anteriormente e no item 3.2.

Tabela 6.16 Parâmetros utilizados para cálculo da rigidez à flexão seguindo o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

N° do CP	$\epsilon_f$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{cmu}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$\epsilon_{cmo}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$y'$ (m)	$y$ (m)	$\sigma^*$ (kPa)	50% $\delta$ (mm)
CP1-3CFJ	2.794,90	4.517,35	2.258,67	0,05894	0,09526	2.885,98	16,58
CP2-3CFJ	3.054,00	5.099,87	2.549,93	0,05776	0,09644	3.335,36	15,44
CP3-3CFJ	3.152,18	5.033,16	2.516,58	0,05938	0,09482	3.312,11	16,88
CP4-3CFJ	2.265,59	4.734,58	2.367,29	0,04991	0,10429	3.043,68	15,61
CP5-3CFJ	1.989,72	3.700,06	1.850,03	0,05392	0,10028	2.308,76	11,85

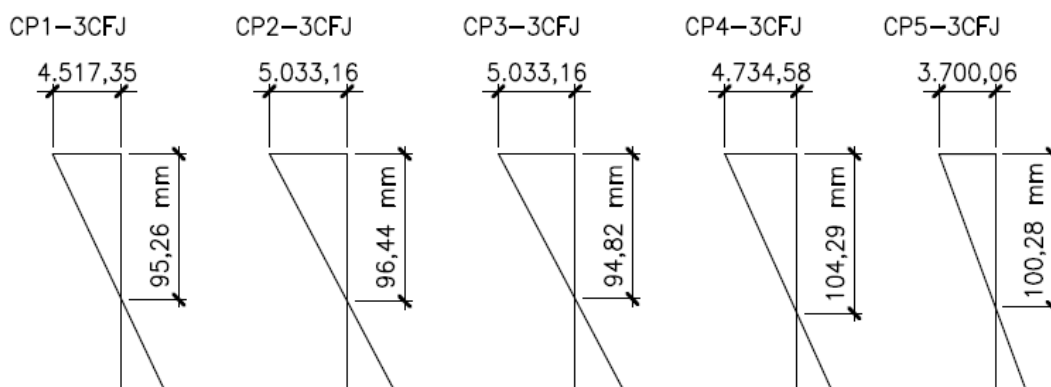


Figura 6.10 Distribuição das deformações para a seção transversal do meio do vão, das vigas reforçadas com três camadas de fibra de juta ensaiadas à flexão (valor de deformação em  $\mu\text{m/m}$ ).

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta seguem apresentados na Tabela 6.17. A rigidez das peças é igual a 66,76 kN.m<sup>2</sup>, valor que representa 45,10% da rigidez experimental obtida experimentalmente.

Tabela 6.17 Resultados para rigidez à flexão considerando o segundo modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

N° do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	EI <sub>teo</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	EI <sub>exp</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	EI <sub>teo</sub> /EI <sub>exp</sub>
CP1-3CFJ	0,55	13,47	11,87	2,15	57,99	123,48	46,97%
CP2-3CFJ	0,64	15,76	14,06	2,35	72,68	172,42	42,15%
CP3-3CFJ	0,63	15,39	13,59	2,42	65,04	152,12	42,75%
CP4-3CFJ	0,63	15,55	14,45	1,74	70,23	165,24	42,50%
CP5-3CFJ	0,46	11,34	10,28	1,53	67,86	126,87	53,49%

A Tabela 6.18 sintetiza os valores obtidos experimentalmente e teoricamente para as cinco séries de corpos de prova. Devido a grande variação entre os resultados, conclui-se que o segundo modelo de cálculo é uma aproximação melhor que a obtida com o primeiro modelo de cálculo.

É válido ressaltar que a grande maioria das vigas ensaiadas apresenta comportamento elástico até a ruptura sem a ocorrência de uma plastificação

parcial da zona comprimida, ou seja, modelos não lineares não representam todas as vigas desse estudo.

Algumas considerações feitas para a obtenção dos resultados, sugeridas por alguns autores da literatura, ainda podem ser ajustadas para obtenção de resultados mais próximos, é o caso do  $k_3=10$ , da constante  $k=0,02$  e da igualdade entre a deformação última e a deformação no início da plastificação. Então, a calibração dos modelos se torna necessária e fica como sugestão para trabalhos futuros. Para um resultado aproximado, mantendo os valores de  $k$  já adotados e, considerando  $\varepsilon_{cmo} = 93\% \varepsilon_{cmu}$ , se obtém valores de rigidez de 93% a 106% dos valores encontrados experimentalmente.

Um último ponto a ser ressaltado é que, conforme já dito anteriormente, as peças de madeira apresentam muitas imperfeições como nós, fibras reversas, perdas de seção em alguns trechos e fendas, que podem influenciar nos resultados práticos, e promover variabilidade e heterogeneidade nos mesmos.

Tabela 6.18 Resultados para rigidez à flexão médios considerando o segundo modelo de cálculo para as cinco séries de corpos de prova.

Série	E <sub>Iteo</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	E <sub>Iexp</sub> (kN.m <sup>2</sup> )	E <sub>Iteo</sub> /E <sub>Iexp</sub>
SR	57,35	125,88	45,56%
1CFV	61,11	131,34	46,53%
3CFV	50,10	116,83	42,89%
1CFJ	51,92	119,74	43,36%
3CFJ	66,76	148,03	45,10%

### 6.3.

#### Modelo bilinear elasto-plástico (método de Bazan-Buchanan)

Algumas das vigas reforçadas apresentaram ruptura com indícios de plastificação da zona comprimida. Esta seção supõe ruptura por tração com plastificação parcial das fibras comprimidas em todas as vigas de madeira ensaiadas.

Conforme sugerido por Corradi e Borri (2007), e utilizado na seção 6.2, foram consideradas as igualdades [6.2] e [6.3] para a realização dessa segunda análise numérica. Além dessa consideração, outra igualdade [6.4] foi sugerida por Corradi e Borri (2007) para aplicação do modelo:

$$\sigma_{cmu} = 0,8\sigma_{cmo} \quad [6.4]$$



### 6.3.1. Série SR

Os parâmetros adotados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão são os mesmos apresentados na Tabela 6.8. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas no item 3.3.

Os valores obtidos para as vigas de madeira sem reforço seguem apresentados na Tabela 6.19. A rigidez das peças de madeira sem reforço é igual a 71,74 kN.m<sup>2</sup>, representando, então, 56,99% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.19 Resultados para rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira sem reforço.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
CP1-SR	0,67	18,20	18,87	0,00	82,68	153,20	53,97%
CP2-SR	0,73	19,91	20,64	0,00	72,56	132,38	54,81%
CP3-SR	0,42	11,43	11,85	0,00	65,90	109,38	60,25%
CP4-SR	0,46	12,48	12,94	0,00	65,80	108,56	60,61%

### 6.3.2. Série 1CFV

Os parâmetros adotados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão são os mesmos apresentados na Tabela 6.10. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas no item 3.3.

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro seguem apresentados na Tabela 6.20. A rigidez das peças é igual a 75,85 kN.m<sup>2</sup>, representando, então, 57,75% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.20 Resultados para rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com uma camada de fibra de vidro.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
CP1-1CFV	1,57	42,74	41,93	2,38	85,00	150,48	56,48%
CP2-1CFV	0,90	24,43	24,19	1,14	74,15	139,10	53,31%
CP3-1CFV	0,96	26,04	25,78	1,22	73,92	135,53	54,54%
CP4-1CFV	0,76	20,60	20,46	0,90	80,01	129,77	61,65%
CP5-1CFV	1,08	29,39	29,28	1,19	66,18	101,82	64,99%

### 6.3.3. Série 3CFV

Os parâmetros adotados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão são os mesmos apresentados na Tabela 6.12. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas no item 3.3.

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro seguem apresentados na Tabela 6.21. A rigidez das peças é igual a 61,82 kN.m<sup>2</sup>, representando, então, 52,92% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.21 Resultados para rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de vidro.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	EIexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/EIexp
CP1-3CFV	1,09	29,78	25,38	5,50	52,50	100,01	52,49%
CP2-3CFV	0,54	14,72	11,26	4,00	52,79	95,43	55,32%
CP3-3CFV	1,12	30,60	25,97	5,76	66,66	129,96	51,29%
CP4-3CFV	0,86	23,35	21,82	2,38	74,00	136,53	54,20%
CP5-3CFV	1,11	30,26	24,85	6,52	80,00	152,30	52,53%
CP6-3CFV	0,94	25,62	22,11	4,46	44,98	86,76	51,85%

### 6.3.4. Série 1CFJ

Os parâmetros adotados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão são os mesmos apresentados na Tabela 6.14. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas no item 3.3.

Os valores obtidos para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta seguem apresentados na Tabela 6.22. A rigidez da peça é igual a 64,52 kN.m<sup>2</sup>, representando, então, 53,88% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.22 Resultados para rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para a viga de madeira reforçada com uma camada de fibra de juta.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	EIexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/EIexp
CP1-1CFJ	0,67	18,20	18,56	0,32	64,52	119,74	53,88%

### 6.3.5. Série 3CFJ

Os parâmetros adotados para cálculo do momento de ruptura e rigidez à flexão são os mesmos apresentados na Tabela 6.16. A metodologia de cálculo, assim como as equações utilizadas para o dimensionamento, foram descritas no item 3.3.

Os valores obtidos para as vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta seguem apresentados na Tabela 6.23. A rigidez das peças é igual a 82,60 kN.m<sup>2</sup>, representando, então, 55,80% da rigidez obtida experimentalmente.

Tabela 6.23 Resultados para rigidez à flexão considerando o terceiro modelo de cálculo para vigas de madeira reforçadas com três camadas de fibra de juta.

Nº do CP	Força I (kN)	Força II (kN)	Força III (kN)	Força IV (kN)	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	EIexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/EIexp
CP1-3CFJ	0,62	16,84	15,31	2,15	71,69	123,48	58,06%
CP2-3CFJ	0,72	19,70	18,08	2,35	89,90	172,42	52,14%
CP3-3CFJ	0,71	19,24	17,52	2,42	80,40	152,12	52,85%
CP4-3CFJ	0,71	19,44	18,42	1,74	87,02	165,24	52,66%
CP5-3CFJ	0,52	14,18	13,17	1,53	84,00	126,87	66,21%

A Tabela 6.24 sintetiza os valores obtidos experimentalmente e teoricamente para as cinco séries de corpos de prova. Devido a grande variação entre os resultados, conclui-se que o terceiro modelo de cálculo, para as considerações adotadas anteriormente, é uma aproximação ruim do que ocorre durante os ensaios.

É válido ressaltar que a grande maioria das vigas ensaiadas apresenta comportamento elástico até a ruptura sem a ocorrência de uma plastificação parcial da zona comprimida, ou seja, modelos não lineares não representam todas as vigas desse estudo.

Algumas considerações feitas para a obtenção dos resultados, sugeridas por alguns autores da literatura, ainda podem ser ajustadas para obtenção de resultados mais próximos, é o caso do  $k_3=10$ , da constante  $k=0,02$  e da igualdade entre a deformação última e a deformação no início da plastificação. Então, a calibração dos modelos se torna necessária e fica como sugestão para trabalhos futuros. Para um resultado aproximado, mantendo os valores de  $k$  já adotados e, considerando  $\varepsilon_{cmo} = 72\% \varepsilon_{cmu}$ , se obtém valores de rigidez de 100% a 112% dos valores encontrados experimentalmente.

Um último ponto a ser ressaltado é que, conforme já dito anteriormente, as peças de madeira apresentam muitas imperfeições como nós, fibras reversas, perdas de seção em alguns trechos e fendas, que podem influenciar nos resultados práticos, reduzindo-os drasticamente.

Tabela 6.24 Resultados para rigidez à flexão médios considerando o terceiro modelo de cálculo para as cinco séries de corpos de prova.

Série	Elteo (kN.m <sup>2</sup> )	Elexp (kN.m <sup>2</sup> )	Elteo/Elexp
SR	71,74	125,88	56,99%
1CFV	75,85	131,34	57,75%
3CFV	61,82	116,83	52,92%
1CFJ	64,52	119,74	53,88%
3CFJ	82,60	148,03	55,80%

## 7 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os tópicos desenvolvidos num estudo teórico e experimental de vigas de madeira solicitadas à flexão reforçadas com compósitos de fibras de vidro e juta, com uma e três camadas de tecido bidirecional e matriz epoxídica.

O estudo experimental foi composto por ensaios em 22 vigas de madeira da espécie *Pinus oocarpa* com mesma seção transversal de 10x15cm, realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As vigas ensaiadas foram divididas em cinco séries, sendo 5 delas como série de referência (SR), 5 reforçadas com uma camada de vidro (1CFV), 6 com três camadas de fibra de vidro (3CFV), 1 com uma camada de fibra de juta (1CFJ) e, por último, 5 com três camadas de fibra de juta (3CFJ).

O estudo teórico desenvolvido consta de três modelos numéricos. O primeiro, bastante simplificado, considera apenas o regime elástico das peças de madeira, no qual uma seção mista é transformada em uma equivalente de apenas um material. O segundo e o terceiro, modelos que consideram a não linearidade da madeira quando submetida a tensões de compressão, realizam aproximações lineares a partir do ponto de limite de proporcionalidade.

A revisão bibliográfica mostrou que existem muitas conformações de reforço, muitos materiais possíveis para se fabricar um compósito com base epóxi e muitas espécies de madeira que podem ser variáveis importantes para o estudo de reforços à flexão.

A partir da análise dos resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

- A madeira da espécie *Pinus oocarpa*, ao ser aquecida por duas horas em temperaturas entre 60° e 200°C, apresentou uma tendência à perda de módulo de elasticidade e resistência à compressão (paralela e perpendicular às fibras). Esta avaliação foi feita qualitativamente a

partir dos diagramas tensão-deformação obtidos devido ao número reduzido de corpos de prova por temperatura de aquecimento;

- A madeira da espécie *Pinus oocarpa*, ao ser aquecida por duas horas em temperaturas iguais a 80°, 160° e 200°C, apresenta uma variação em sua composição química, confirmada por ensaios de DRX. O índice de cristalinidade é reduzido com o aumento da temperatura demonstrando a degradação do material não amorfo, ou seja, da celulose I, natural da madeira, componente principal em sua estruturação. Essa redução no material lenhoso justifica a perda nas propriedades mecânicas avaliadas neste estudo;
- O número de camadas das fibras de reforço adicionadas nos materiais compósitos interfere diretamente na resistência à tração dos mesmos. Ao serem comparados compósitos reforçados com uma camada e três camadas de fibra de vidro e juta, verificou-se acréscimo na resistência de 44,60% e 37,12%, respectivamente. O mesmo pode ser dito para o módulo de elasticidade que variou 33,61% e 63,39%;
- Todas as vigas de madeira reforçadas apresentaram aumento na força última. As vigas reforçadas com fibras de vidro apresentaram melhor comportamento que as com fibras de juta, fato que pode ser justificado pela resistência e módulo de elasticidade superiores do material compósito.
- Com a adição de mais camadas de fibra de reforço é observado um acréscimo na força última das peças solicitadas à flexão. Este aumento foi de 17,26% para compósitos reforçados com três camadas de fibra de vidro em relação a uma camada. Já para as vigas reforçadas com juta, esse aumento com o acréscimo de camadas de reforço foi ainda menor (8,2%).
- O reforço instalado nas vigas de madeira promoveu uma alteração no modo de ruptura das mesmas. Vigas sem reforço romperam por tração, sem plastificação das fibras comprimidas, o que pode ser justificado pela qualidade inferior das peças ensaiadas. Quando se insere o reforço, algumas peças apresentam plastificação das fibras

superiores mas continuam rompendo à tração. O reforço, então, contribui para uma modificação no posicionamento da linha neutra das vigas, facilitando a plastificação das fibras comprimidas e, assim, aumentando a força de tração última das fibras inferiores.

- Observou-se aumento na rigidez apenas nas vigas reforçadas com material compósito formado por três camadas de fibra de juta. Este aumento foi de 18%, aproximadamente.
- O modelo numérico da seção transformada, utilizado para o cálculo de vigas mistas solicitadas à flexão no regime elástico, é uma aproximação aceitável para o comportamento real das vigas ensaiadas. Os valores teóricos são equivalentes a 53%-63% dos valores experimentais em termos de rigidez das peças, o que garantiria o coeficiente de segurança necessário para o dimensionamento, não proporcionando, porém, a eficiência econômica desse projeto. Os dois modelo lineares elasto-plásticos resultaram em valores próximos entre si, representando 42%-46% do valor encontrado experimentalmente para o modelo 2 e 53-57% para o modelo 3. Para indicação desses dois modelos de cálculo, deve-se, entretanto, realizar uma calibração dos mesmos, ajustando as constantes e igualdades adotadas e, assim, tornando-o uma aproximação ainda mais precisa. Por exemplo, pra o modelo 2, caso as deformações de plastificação sejam iguais a 93% das deformações últimas, e mantendo-se os valores das constantes adotadas, as rigidezes teóricas chegam a representar 93%-106% dos valores experimentais.

### 7.1.

#### **Sugestões para trabalhos futuros**

A partir das conclusões obtidas nesta pesquisa, pode-se sugerir a realização de outras análises experimentais, para justificar e fundamentar os efeitos não conclusivos deste trabalho como, por exemplo:

1. O desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de madeira solicitadas à flexão com pré-carregamento, ou seja,

com aplicação do reforço com CFJ e CFV após a viga atingir 70% do momento fletor de ruptura;

2. O desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de madeira solicitadas à flexão com outras conformações de reforço;
3. O desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de madeira solicitadas à flexão com reforço pré-tensionado;
4. O desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de madeira solicitadas à flexão já previamente degradadas por temperatura, por exemplo;
5. O estudo de vigas de madeira reforçadas com CFJ e CFV com variação da taxa de reforço na direção transversal e variação da espécie da madeira;
6. A compilação dos resultados obtidos nas pesquisas descritas anteriormente, e elaboração de estudo estatístico;
7. O desenvolvimento de um modelo de análise não linear para vigas de madeira reforçadas com CFJ e CFV solicitadas à flexão que melhor se adapte aos resultados obtidos experimentalmente;
8. O desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de madeira reforçadas, solicitadas à flexão, com carregamentos cíclicos;
9. Estudo da durabilidade deste sistema de reforço.



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

ALMAZÁN, F J ADELL, E HERMOSO PRIETO, F ARRIAGA MARTITEGUI, E C RICHTER. Comparison of the Spanish Visual Strength Grading Standard for Structural Sawn Timber (UNE 56544) with the German One (DIN 4074) for Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) from Germany. **Holz Roh Werkst** 66: 253–58, 2008.

ANOOP, E V, V AJAYGHOSH, J M NIJIL, E C M JJEESH. Evaluation of Pulp Wood Quality of Selected Tropical Pines Raised in the High Ranges of Idukki District, Kerala. **Journal of Tropical Agriculture** 52(1): 59–66, 2014.

ARAUJO, VICTOR ALMEIDA DE, JULIANO FIORELLI, ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO, E FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR. Density Evaluation of *Pinus Oocarpa* Submitted to Heat Treatment. **International Journal of Materials Engineering** 5(3): 39–45, 2015.

BALAJI, R, C SIVAKANDHAN, P MUNUSAMY, E D MUTHUKUMAR. Experimental Study of Mechanical Properties and Drilling Properties of Glass Fibre Composite. **International Journal of Engineering Research** 7(1): 24–30, 2017.

BORRI, A., E M. CORRADI. Strengthening of Timber Beams with High Strength Steel Cords. **Composites Part B** 42: 1480–91, 2011.

BORRI, A., M. CORRADI, E E. SPERANZINI. Reinforcement of Wood with Natural Fibers. **Composites Part B** 53: 1–8, 2013.

BORRI, ANTONIO, MARCO CORRADI, E ANDREA GRAZINI. A Method for Flexural Reinforcement of Old Wood Beams with CFRP Materials. **Composites Part B** 36: 143–53, 2005.

BORYSIK, S, E B DOCZEKALSKA. X-Ray Diffraction Study of Pine Wood Treated with NaOH. **Fibres & Textiles in Eastern Europe** 13(5): 87–89, 2005.

BUCHANAN, ANDREW H. Bending Strength of Lumber. **Journal of Structural Engineering** 116(5): 1213–29, 1990.

CALDERONE, C., MATTEIS, G. DE, GIUBILEO, C. E F.M. MAZZOLANI. Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation. **Engineering Structures** 28: 729-744, 2006.

CARVALHO, AMÉLIA GUIMARÃES ET AL. Método de Ressonância Para Predição Das Propriedades Mecânicas Das Madeiras de *Eucalyptus Urophylla* E *Pinus Oocarpa* Termorretrificadas. **Revista Matéria** 22(1), 2017.

CORRADI, MARCO, E ANTONIO BORRI. Fir and Chestnut Timber Beams Reinforced with GFRP Pultruded Elements. **Composites Part B** 38: 172–81, 2007.

CORRADI, MARCO, ANTONIO BORRI, LUCA RIGHETTI, E EMANUELA SPERANZINI. Uncertainty Analysis of FRP Reinforced Timber Beams. **Composites Part B** 113: 174–84, 2017.

D'AMBRISI, ANGELO, FRANCESCO FOCACCI, E RAIMONDO LUCIANO. Experimental Investigation on Flexural Behavior of Timber Beams Repaired with CFRP Plates. **Composite Structures** 108: 720–28, 2014.

DEOGONDA, PATIL, E VIJAYKUMAR N CHALWA. Mechanical Property of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites. **International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)** 1(4): 6–9, 2013.

FIORELLI, JULIANO, E ANTONIO ALVES DIAS. Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. **Materials Research** 6(2): 193–202, 2003.

GARCÍA, PILAR DE LA ROSA, ALFONSO COBO ESCAMILLA, E M. NIEVES GONZÁLEZ GARCÍA. Bending Reinforcement of Timber Beams with Composite Carbon Fiber and Basalt Fiber Materials. **Composites Part B** 55: 528–36, 2013.

GENTILE, C, D SVECOVA, W SALTZBERG, E S H RIZKALLA. **Flexural Strengthening of Timber Beams Using GFRP**, 2000.

GEZER, HALE, E BULENT AYDEMIR. The Effect of the Wrapped Carbon Fiber Reinforced Polymer Material on Fir and Pine Woods. **Materials and Design** 31: 3564–67, 2010.

GOPINATH, AJITH, SENTHIL KUMAR, E A ELAYAPERUMAL. Experimental Investigations on Mechanical Properties Of Jute Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin Matrices. **Procedia Engineering** 97: 2052–63, 2014.

HERNANDEZ, ROLAND ET AL. Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams. **Research paper FPL** 554, 1997.

HIBBELER, R.C. **Resistência Dos Materiais**. 7a edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ISLAM, MAKSUDUL, HABIBUR RAHMAN, SANIAT TALUKDAR, E NAHID HASAN. Mechanical Property Evaluation of Glass – Jute Fiber Reinforced Polymer Composites. **Polymers Advanced Technologies** 27: 1308–16, 2016.

JAGANNATHA, T D, E G HARISH. Mechanical Properties of Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Polymer Composites. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research** 4(2): 131–37, 2015.

JANKOWSKI, LUDOMIR J, JERZY JASIENKO, E TOMASZ PIOTR NOWAK. Experimental Assessment of CFRP Reinforced Wooden Beams by 4-Point Bending Tests and Photoelastic Coating Technique. **Materials and Structures** 43: 141–50, 2010.

JASIEŃKO, JERZY, E TOMASZ P. NOWAK. Solid Timber Beams Strengthened with Steel Plates - Experimental Studies. **Construction and Building Materials** 63: 81–88, 2014.

JOHNS, KENNETH C., E SIMON LACROIX. Composite Reinforcement of Timber in Bending. **Canadian Journal of Civil Engineering** 27: 899–906, 2000.

KLOCK, UMBERTO, E ALAN SULATO DE ANDRADE. **Química Da Madeira**. 4a edição. Universidade Federal do Paraná, 2013.

KOLLMANN, FRANZ F P, E WILFRED A COTE. **Principles of Wood Science and Technology I - Solid Wood**. 1st editio. Heidelberg: Springer-Verlag New York Inc, 1968.

LEONHARDT, GABRIELA, SETSUO IWAKIRI, DANIELLE PREVIDI OLANDOSKI, E MARTHA ANDREIA BRAND. Produção de Chapas de Madeira Compensada de Cinco Espécies de Pinus Tropicais. **Ciência Florestal** 11(2): 71–77, 2001.

LEPAGE, ENNIO SILVA. **Manual de Preservação das Madeiras**. Volume 1. 2a edição. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1989.

LI, YEOU FONG, YAO MING XIE, E MING JER TSAI. Enhancement of the Flexural Performance of Retrofitted Wood Beams Using CFRP Composite Sheets. **Construction and Building Materials** 23: 411–22, 2009.

MATOS, JORGE LUIS MONTEIRO, E ROSILANI TRIANOSKI. Evaluation of Mechanical Properties of the Wood of Tropical Pines Species. **Scientia Forestalis** 42(101): 21–28, 2014.

MENEZZI, CLAUDIO HENRIQUE SORARES DEL, CHRISTINE LAROCA, E IVAN VENSON. Produção de Compensados de Pinus Taeda E Pinus Oocarpa Com Resina Fenol-Formaldeído. **Cerne** 8(2): 092–097, 2012.

MISHRA, VIVEK, E SANDHYARANI BISWAS. Physical and Mechanical Properties of Bi-Directional Jute Fiber Epoxy Composites. **Procedia Engineering** 51: 561–66, 2013.

MORAES, POLIANA DIAS DE, E MANUEL JESÚS MANRIQUEZ FIGUEROA. Comportamento Da Madeira a Temperaturas Elevadas. **Ambiente Construído** 9(4): 157–74, 2009.

MORESCHI, JOÃO CARLOS. **Propriedades Da Madeira**. Universidade Federal do Paraná, 2012.

NOWAK, TOMASZ P., JERZY JASIEŃKO, E DARIUSZ CZEPIZAK. Experimental Tests and Numerical Analysis of Historic Bent Timber Elements Reinforced with CFRP Strips. **Construction and Building Materials** 40: 197–203, 2013.

OLIVEIRA, ANA KARLA FREIRE DE. **Estudo Da Viabilidade Técnica de Utilização Do Compósito Poliuretano de Resina de Mamona E Fibra de Ubuçu Na Fabricação de Pisos E Revestimentos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

OUMAROU, NOURA, DUYGU KOCAEFE, E YASAR KOCAEFE. Some Investigations on Moisture Injection , Moisture Diffusivity and Thermal Conductivity Using a Three-Dimensional Computation of Wood Heat Treatment at High Temperature. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 61: 153–61, 2015.

PFEIL, WALTER, E MICHÈLE PFEIL. **Estruturas de Madeira**. 6a edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

PIAZZA, MAURIZIO, E MARIAPAOLA RIGGIO. Visual Strength-Grading and NDT of Timber in Traditional Structures. **Journal of Building Appraisal** 3(4): 267–96, 2008.

POLETTTO, MATHEUS, VINÍCIOS PISTOR, MARA ZENI, E ADEMIR J ZATTERA. Crystalline Properties and Decomposition Kinetics of Cellulose Fibers in Wood Pulp Obtained by Two Pulping Processes. **Polymer Degradation and Stability** 96: 679–85, 2011.

POLETTTO, MATHEUS, ADEMIR J ZATTERA, MARIA M C FORTE, E RUTH M C SANTANA. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. **Bioresource Technology** 109: 148–53, 2012.

POLETTTO, MATHEUS, ADEMIR J ZATTERA, E RUTH M C SANTANA. Thermal Decomposition of Wood: Kinetics and Degradation Mechanisms. **Bioresource Technology** 126: 7–12, 2012.

REIS, ANA CRISTINA MALHEIRO DOS. **Efeito da Temperatura de Cura na Temperatura de Transição Vítreia de uma Adesivo Estrutural**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

RESCH, H, E K BUSTENDORFF. Some Wood Properties of Plantation Pines, *Pinus Caribaea* and *Pinus Oocarpa*. **Wood and Fiber** 10(3): 210–17, 1978.

RIDLEY-ELLIS, DAN, PETER STAPEL, E VANESA BAÑO. Strength Grading of Sawn Timber in Europe: An Explanation for Engineers and Researchers.” **European Journal of Wood and Wood Products** 74: 291–306, 2016.

SANJAY, M R, E B YOGESHA. Studies on Mechanical Properties of Jute / E-Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering** 4: 15–25, 2016.

SCHAFFER, E.L. Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas-Fir. **ASTM International**, 1973.

SCHOBER, KAY UWE ET AL. FRP Reinforcement of Timber Structures. **Construction and Building Materials** 97: 106–18, 2015.

SCHOBER, KAY UWE, E K RAUTENSTRAUCH. Post-Strengthening of Timber Structures with CFRP's. **Materials and Structures** 40: 27–35, 2006.

SEGUNDINHO, PEDRO GUTEMBERG DE ALCÂNTARA, LEILIANE CRISTINA COSSOLINO, ANTÔNIO HENRIQUE ALVES PEREIRA, E CARLITO CALIL JUNIOR. Aplicação Do Método de Ensaio Das Frequências Naturais de Vibração Para Obtenção Do Módulo de Elasticidade de Peças Estruturais de Madeira. **Revista Árvore** 36(9): 1155–61, 2012.

SPERANZINI, EMANUELA, E SIMONE TRALASCIA. Engineered Lumber: LVL and Solid Wood Reinforced with Natural Fibres. **World Conference on Timber Engineering**, 2010.

TRIANOSKI, ROSILANI, JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS, SETSUO IWAKIRI, E JOSÉ GUILHERME PRATA. Avaliação Das Propriedades

Mecânicas Da Madeira de Especies de Pinus Tropicais. **Scientia Forestalis** 42(101): 21–28, 2014.

WADA, MASAHISA, TAKESHI OKANO, E JUNJI SUGIYAMA. Allomorphs of Native Crystalline Cellulose I Evaluated by Two Equatorial D-Spacings. **Journal of Wood Science** 47: 124–28, 2001.

YANG, HONG, WANLI CHENG, E GUANGPING HAN. Wood Modification at High Temperature and Pressurized Steam: A Relational Model of Mechanical Properties Based on a Neural Network. **Bioresource Technology** 10(3): 5758–76, 2015.

YANG, HUIFENG ET AL. Flexural Behavior of FRP and Steel Reinforced Glulam Beams: Experimental and Theoretical Evaluation. **Construction and Building Materials**, 2016.

ZANGIACOMI, MARCO HENRIQUE, E EDISON BITTENCOURT. Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras de PANox E Fibras de Aramida. **RECIE** 15(1/2): 55–61, 2006.

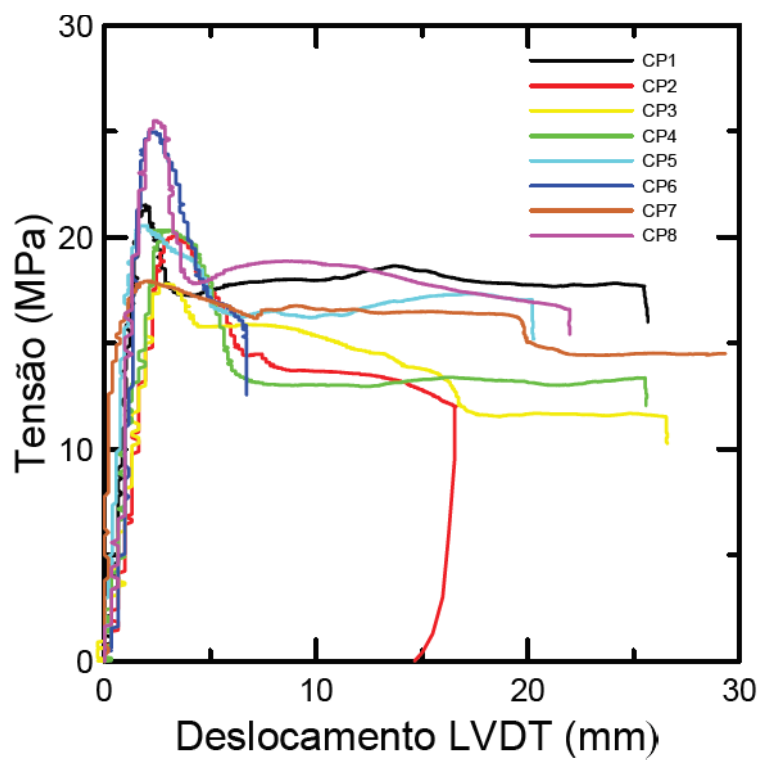


Figura 9.1 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos obtidos através de transdutores de deslocamento.

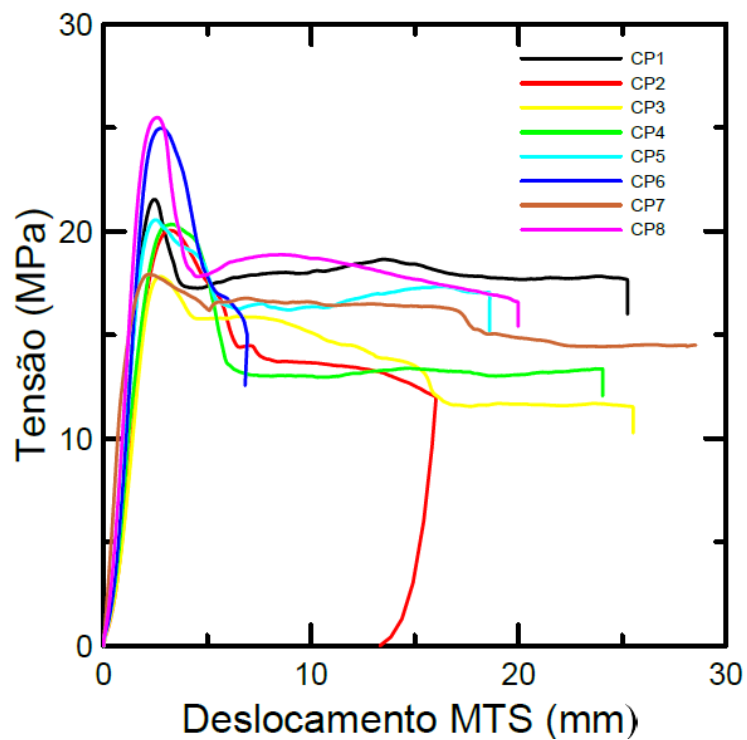


Figura 9.2 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da MTS.

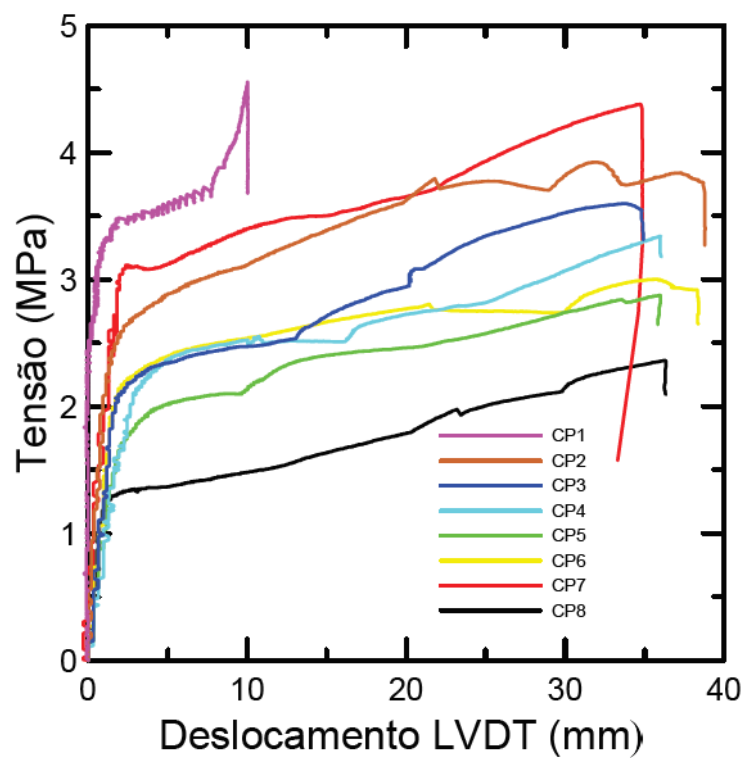


Figura 9.3 Diagramas tensão-deslocamento para compressão perpendicular às fibras a partir dos deslocamentos obtidos através de transdutores de deslocamento.

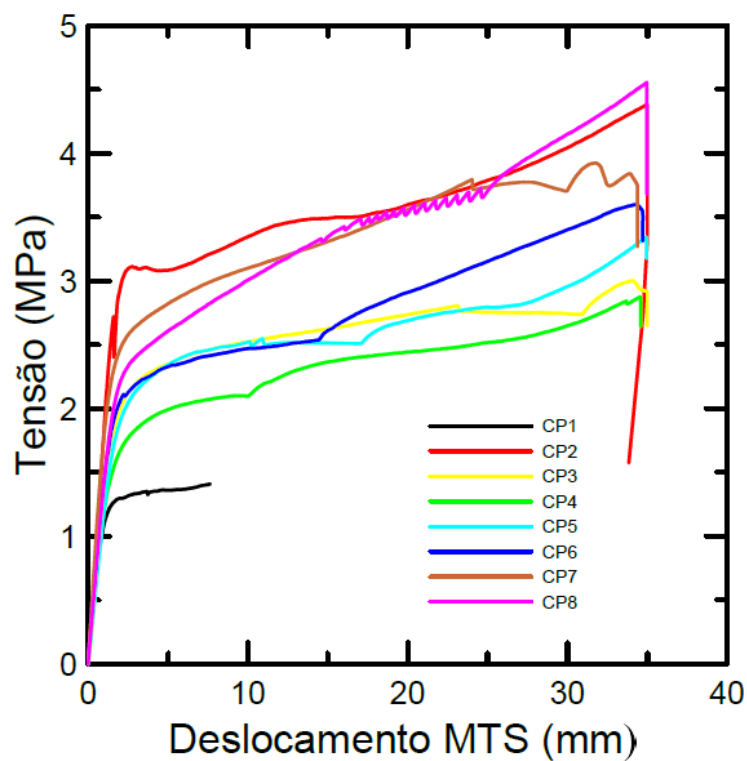


Figura 9.4 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da MTS.

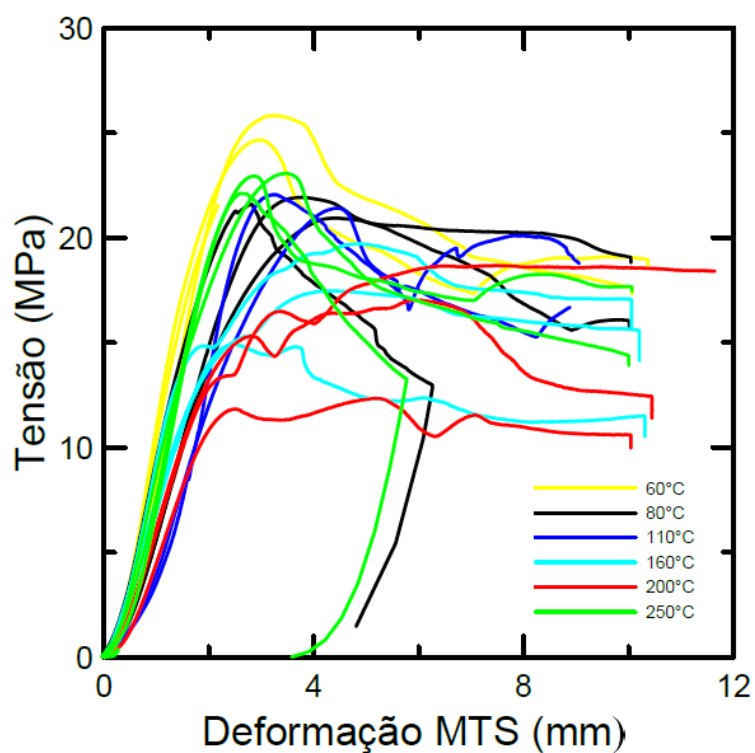


Figura 9.5 Diagramas tensão-deslocamento para compressão paralela às fibras a partir dos deslocamentos do atuador da MTS para os corpos de prova pré-aquecidos nas temperaturas 60°C, 80°C, 110°C, 160°C, 200°C e 250°C.



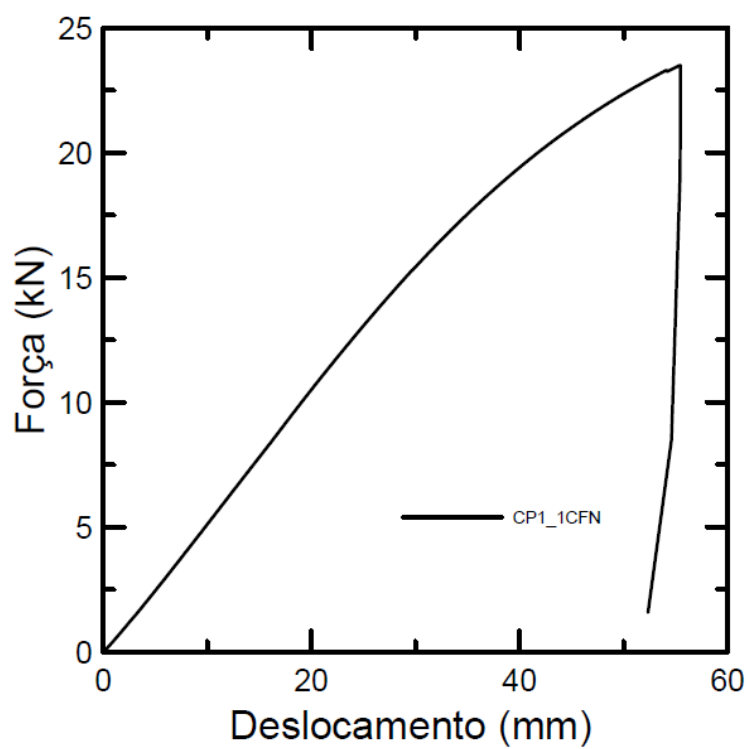


Figura 9.6 Diagrama força-deslocamento para flexão na viga de madeira sem reforço denominada CP5-SR que foi ignorada por apresentar características de madeira de primeira categoria.

## 10

### Anexo B - Fotografias



Figura 10.1 Corpo de prova 1, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Figura 10.2 Corpo de prova 2, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Figura 10.3 Corpo de prova 3, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.





Figura 10.4 Corpo de prova 4, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Figura 10.5 Corpo de prova 5, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Figura 10.6 Corpo de prova 6, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.

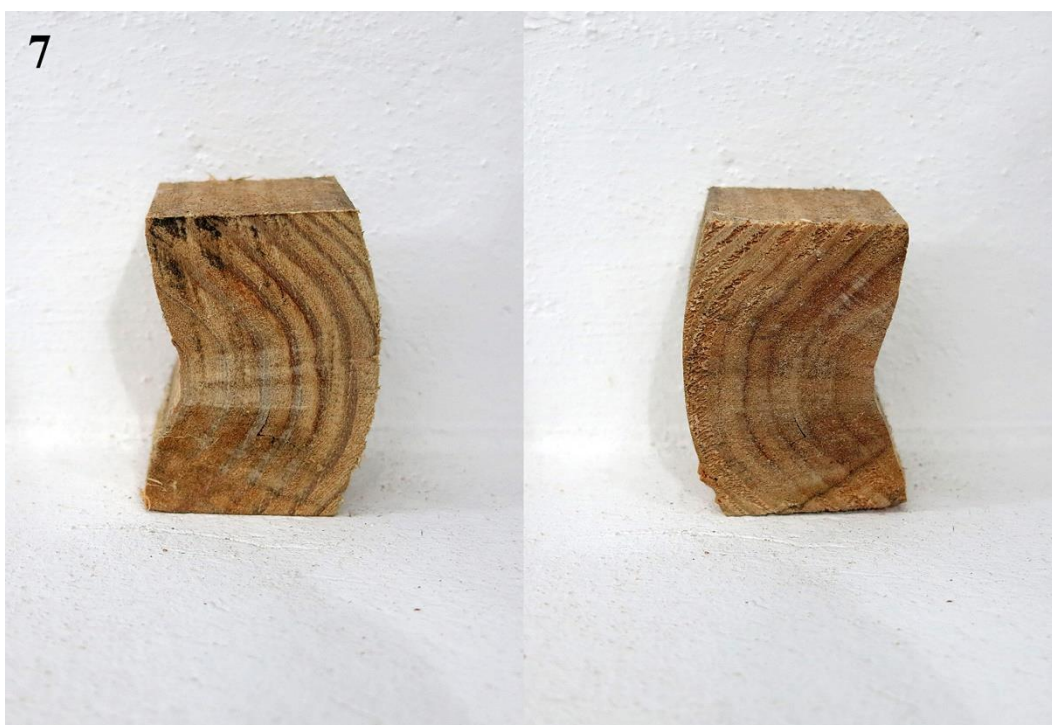


Figura 10.7 Corpo de prova 7, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.





Figura 10.8 Corpo de prova 8, rompido, após ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Figura 10.9 Corpo de prova 1, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.10 Corpo de prova 2, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.11 Corpo de prova 3, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.





Figura 10.12 Corpo de prova 4, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.13 Corpo de prova 5, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.





Figura 10.14 Corpo de prova 6, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.15 Corpo de prova 7, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.16 Corpo de prova 8, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 10.17 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 60°C em estufa por duas horas.





Figura 10.18 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 80°C em estufa por duas horas.



Figura 10.19 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 110°C em estufa por duas horas.



Figura 10.20 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 160°C em estufa por duas horas.



Figura 10.21 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 200°C em estufa por duas horas.



Figura 10.22 Corpo de prova, rompido, após ensaio de compressão paralela às fibras com pré-aquecimento à 250°C em mufla por cinco minutos.



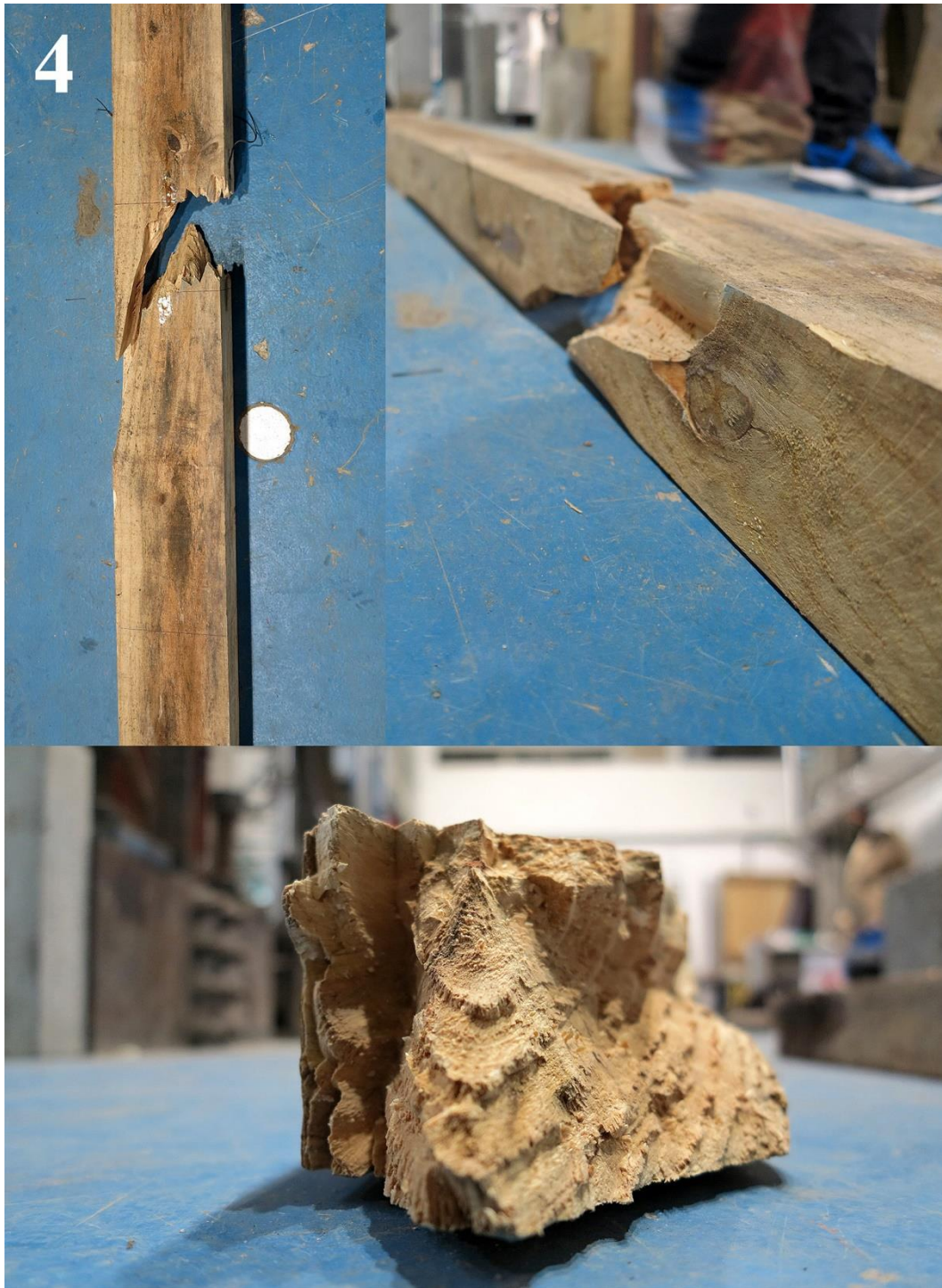


Figura 10.23 Viga 4 da série sem reforço após ensaio de flexão.



Figura 10.24 Viga 5 da série sem reforço após ensaio de flexão.





Figura 10.25 Viga 1 da série 1CFV após ensaio de flexão.





Figura 10.26 Viga 2 da série 1CFV após ensaio de flexão.





Figura 10.27 Viga 3 da série 1CFV após ensaio de flexão.



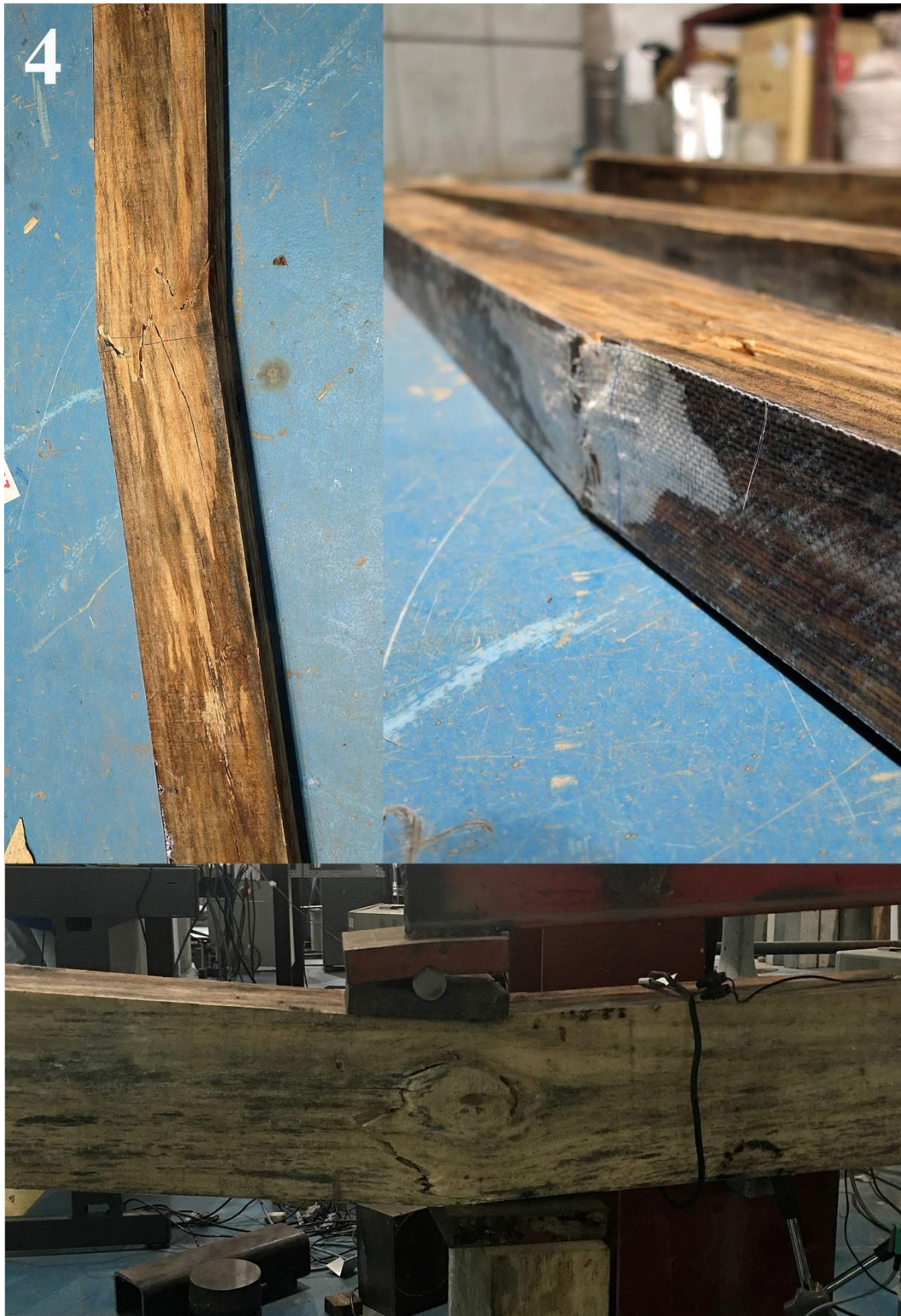


Figura 10.28 Viga 4 da série 1CFV após ensaio de flexão.





Figura 10.29 Viga 5 da série 1CFV após ensaio de flexão.



Figura 10.30 Viga 1 da série 3CFV após ensaio de flexão.



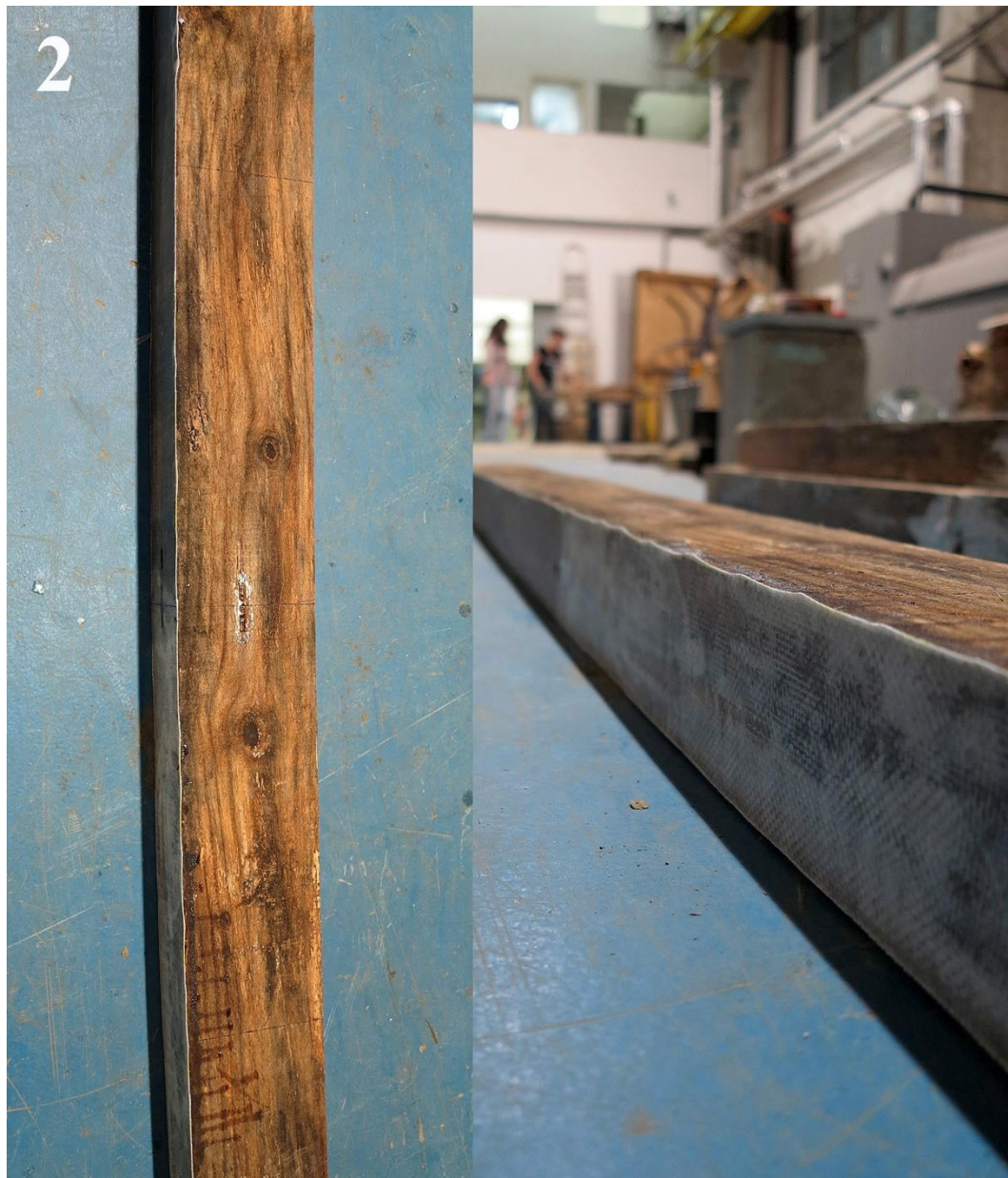


Figura 10.31 Viga 2 da série 3CFV após ensaio de flexão.



Figura 10.32 Viga 3 da série 3CFV após ensaio de flexão.





Figura 10.33 Viga 4 da série 3CFV após ensaio de flexão.





Figura 10.34 Viga 5 da série 3CFV após ensaio de flexão.



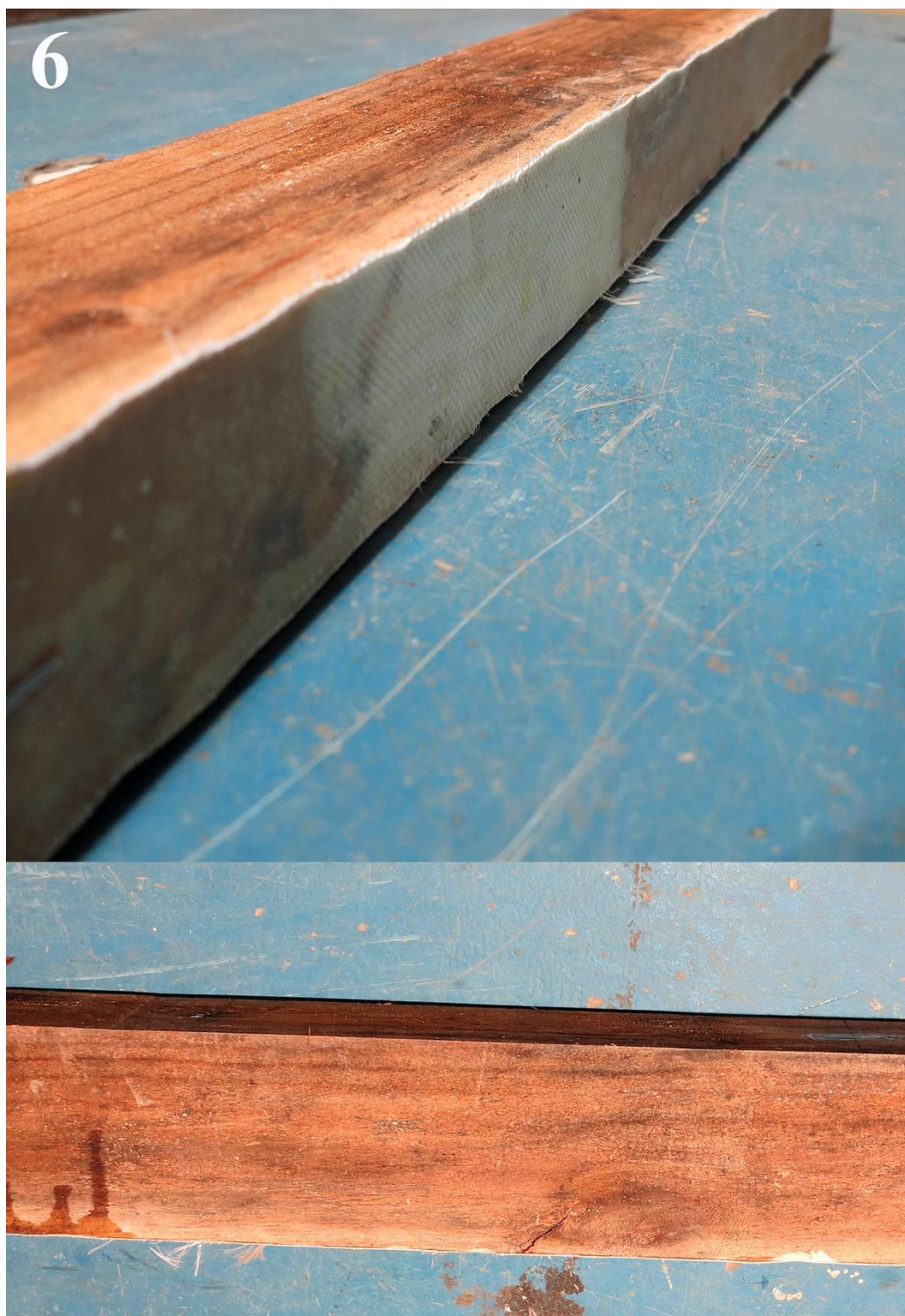


Figura 10.35 Viga 6 da série 3CFV após ensaio de flexão.



Figura 10.36 Viga 1 da série 1CFJ após ensaio de flexão.





Figura 10.37 Viga 1 da série 3CFJ após ensaio de flexão.



Figura 10.38 Viga 2 da série 3CFJ após ensaio de flexão.





Figura 10.39 Viga 3 da série 3CFJ após ensaio de flexão.



Figura 10.40 Viga 4 da série 3CFJ após ensaio de flexão.



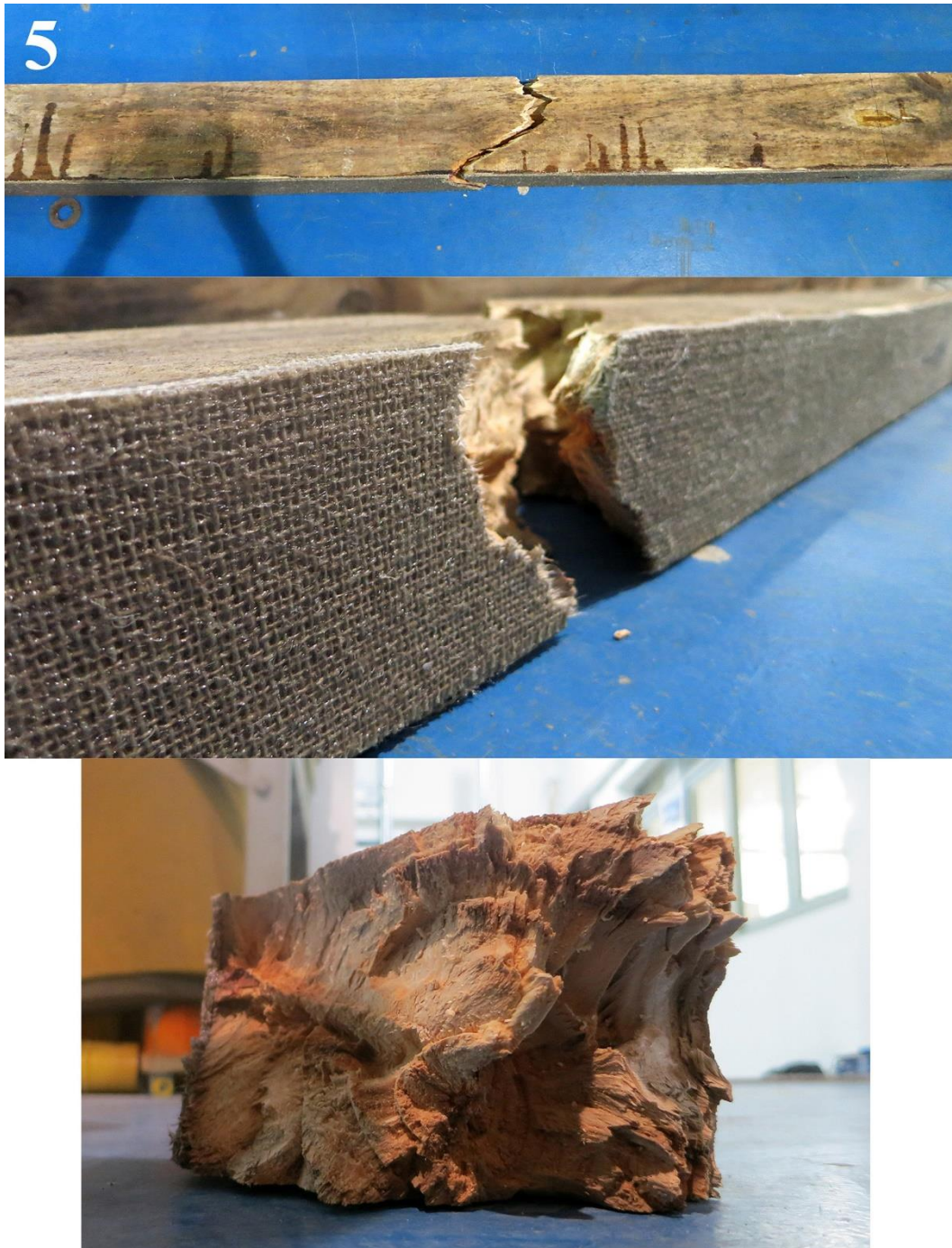


Figura 10.41 Viga 5 da série 3CFJ após ensaio de flexão.