



# **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE ABETO DE DOUGLAS**

**LUIZ MIGUEL VILCHE LOPES**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:  
**Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica**

**Outubro de 2019**



# **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE ABETO DE DOUGLAS**

**LUIZ MIGUEL VILCHE LOPES**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:  
**Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica**

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:

**Prof. Dr.<sup>a</sup> Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira**

**Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita**

Orientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Francisco**

**Outubro de 2019**

*Dedico este trabalho aos meus pais e meus irmãos.*



# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me abençoado em todos os dias de minha vida e em meus estudos. Aos meus pais e meus irmãos que sempre me apoiaram e incentivaram ao longo de minha trajetória acadêmica, nunca medindo esforços para que eu conseguisse alcançar todos meus objetivos.

Agradeço imensamente à minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira e meu orientador Prof.<sup>o</sup> Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita ambos do Instituto Politécnico de Bragança, por todo apoio e o ensinamento, não somente profissional mas como pessoal, que me proporcionaram durante toda a elaboração deste trabalho e por sempre estarem disponíveis para ajudar e esclarecer dúvidas e também ao meu co-orientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Julio Cesar de Souza Francisco por estar sempre disposto a ajudar.

Aos técnicos dos laboratórios Jorge Paulo e Abílio do Laboratório de Tecnologia Mecânica pelas dicas e auxílio na fabricação de peças para o setup de ensaios de flexão. Ao Jorge Santos do FabLab pelas instruções e cooperação nos cortes das amostras. À Luisa Barreira do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais por toda contribuição, cooperação e ensinamento para com a realização dos ensaios e também pela amizade cultivada.

Agradeço também a todos meus amigos, de forma especial ao Arthur Casarini, Gláucio Kenji Matoba, Jean Hilário, Guilherme Irigoyen, Isabelle Corrêa, Allana Netto, Juliana Hermsdorf, Ricardo Williams, Gabriela Mascarenhas, Gabriel Alves, Isabela Urbanetz e Pedro Chebensi, que me acompanharam ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, pelos conselhos e apoio, não somente na área profissional, mas também pessoal.

Também deixo aqui a minha sincera gratidão por todos aqueles que se preocuparam, me deram suporte e cuidados quando sofri a lesão no dedo, o meu muito obrigado.



## RESUMO

O Abeto de Douglas é uma espécie de madeira conífera nativa da América do Norte que possui uma vasta utilização na construção sendo também aplicada como elemento estrutural. O presente trabalho de dissertação tem por objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira em estudo e averiguar possíveis fatores que podem influenciar tais particularidades, como por exemplo os defeitos que estão presentes na maioria de tais elementos. Numa primeira fase do trabalho, visou-se determinar as propriedades mecânicas do abeto de Douglas, de acordo com *EN 408* através de ensaios de flexão e compressão paralela ao grão onde foi possível obter o módulo de elasticidade e as suas respectivas resistências. Convém mencionar que nos testes de compressão utilizaram-se dois métodos para determinação do módulo de elasticidade, o primeiro foi por meio de correlação digital de imagem e o segundo foi empregue um extensômetro mecânico. Em uma segunda fase foi pretendido definir o teor de humidade e as densidades básica e aparente do material, que estão entre as principais características físicas da madeira e que possuem grande influência sobre as demais propriedades, todos os procedimentos foram realizados em conformidade com a ISO 13061. Afim de analisar a viabilidade das vigas, foram realizados testes de flexão em elementos de escala real utilizados na construção. Os valores de resistência e módulo de elasticidade obtidos nessa etapa foram comparados com os valores determinados com os outros ensaios de flexão. Com base nas *EN 384* e *EN 338* determinaram-se os valores característicos possibilitando a partir dos mesmos a relacionar a madeira a uma classe de resistência definida como C18. Finalmente foi elaborada uma ficha técnica, para madeira “Abeto de Douglas” contendo todos os resultados obtidos em relação às suas propriedades físicas e mecânicas bem como sua classe de resistência.

Palavras Chave: Madeira Abeto de Douglas. Módulo de elasticidade. Resistência. Vigas em escalas reais. Densidade. Teor de humidade. Classe de resistência.

## ABSTRACT

Douglas Fir is a North American native conifer species that has wide use in construction and is also applied as a structural element. The objective of this dissertation was to determine some of the physical and mechanical properties of the wood under study and to investigate possible factors that may influence such particularities, as e.g the defects that are present in most of these elements. In a first stage, it was aimed to determine the mechanical properties of Douglas fir according to EN 408 through tests bending and compression parallel to grain where it was possible to obtain the modulus of elasticity and its respective strengths. It should be mentioned that in the tests compression parallel to grain, two methods of determination of the modulus of elasticity were used, in which the first was by digital image correlation and the second was employed a mechanical extensometer. Also in order to analyze the viability of the beams, flexural tests were performed on real scale elements used in the construction. The values of strength and modulus of elasticity obtained in this step were compared with the values determined with the other flexural tests. In a second phase it was intended to define the moisture content and the basic and apparent densities of the material, which are among the main physical characteristics of the wood and that have great influence on the other properties, all procedures were performed in accordance with ISO 13061. Based on the EN 384 and EN 338 the characteristic values were determined, allowing them to relate the wood to a resistance class defined as C18. Finally, a technical data sheet was prepared containing all the results of its physical and mechanical properties obtained on the wood. of the studied species, as well as its resistance classification.

*Keywords:* Douglas Fir Wood. Modulus of elasticity. Strength. Real Scale Beams. Density. Moisture content. Strength class.

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	IV
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS</b> .....	<b>21</b>
<b>1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE</b> .....	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3 MACROESTRUTURA DA MADEIRA</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4 MICROESTRUTURA DA MADEIRA</b> .....	<b>27</b>
2.4.1 Resinosas .....	27
2.4.2 Folhosas .....	29
<b>2.5 ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA</b> .....	<b>31</b>
<b>2.6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b> .....	<b>33</b>
<b>2.7 DEFEITOS DA MADEIRA</b> .....	<b>34</b>
2.7.1 DEFEITOS DE CRESCIMENTO .....	35
2.7.1.1 Nós .....	35
2.7.1.2 Bolsa de resina .....	36
2.7.1.3 Lenho de reação .....	37
2.7.1.3 Desvio da inclinação do fio.....	38
2.7.1.4 Casca inclusa.....	39
2.7.1.5 Anéis de crescimento .....	39
2.7.2 DEFEITOS DE EXPLORAÇÃO E SECAGEM .....	39
2.7.2.1 Medula .....	39
2.7.2.2 Descaio.....	40
2.7.2.3 Fendas .....	40
2.7.2.4 Empenamento .....	41

2.7.3 DEFEITOS DE ALTERAÇÃO .....	42
<b>2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>42</b>
2.8.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	43
2.8.2 COEFICIENTE DE POISSON .....	44
2.8.3 DUREZA .....	45
2.8.3 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA .....	45
2.8.3.1 Compressão paralela às fibras .....	45
2.8.3.2 Compressão perpendicular às fibras .....	46
2.8.3.3 Tração paralela às fibras .....	47
2.8.3.4 Tração perpendicular às fibras .....	47
2.8.3.5 Resistência à Flexão estática .....	48
2.8.3.6 Resistência ao corte .....	48
<b>2.9 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>49</b>
2.9.1 TEOR DE HUMIDADE .....	49
2.9.2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL .....	50
2.9.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	50
2.9.4 DENSIDADE .....	51
2.9.5 RESISTÊNCIA QUÍMICA .....	52
2.9.6 DURABILIDADE .....	52
<b>CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>55</b>
3.2.1 CONDICIONAMENTO DOS PROVETES DE FLEXÃO À ESCALA REDUZIDAS E A COMPRESSÃO .....	55
3.2.1.1 Preparação das amostras de flexão à escala reduzida .....	56
3.2.1.2 Preparação das amostras de compressão paralela as fibras .....	57
3.2.2 CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS DE DENSIDADE E TEOR HUMIDADE .....	58
3.2.2.1 Preparação das amostras de densidade e teor humidade .....	59
3.3.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS .....	60
3.3.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	62
3.3.3 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....	63
<b>3.4 PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS .....</b>	<b>64</b>
3.4.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIO .....	64
3.4.1.1 Técnica de correlação digital de imagem .....	66
3.4.1.2 Procedimento experimental por meio da CDI .....	67
3.4.1.3 Tratamento das imagens e obtenção dos deslocamentos .....	69
3.4.1.4 Procedimento experimental por meio do extensômetro eletromecânico .....	70
3.4.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO PARALELA AO GRÃO .....	70
3.4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	71

<b>3.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON .....</b>	<b>72</b>
<b>3.6 PROCEDIMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE E TEOR DE HUMIDADE ....</b>	<b>74</b>
3.6.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE E BÁSICA .....	74
3.6.1.1 Densidade aparente .....	74
3.6.1.2 Densidade Básica .....	75
3.6.2 TEOR DE HUMIDADE .....	77
<b>3.7 ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS EM ESCALA REAL À FLEXÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO 4:    RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2 ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PROVETES À ESCALA REDUZIDA PD-F .....</b>	<b>81</b>
4.2.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL, $E_{m,g}$ .....	84
4.2.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ( $f_m$ ) .....	85
<b>4.3 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS.....</b>	<b>86</b>
4.3.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO AXIAL UTILIZANDO A CDI.....	88
4.3.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS ONDE FOI EMPREGUE A CDI .....	90
4.3.3 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO AXIAL UTILIZANDO EXTENSÔMETRO ELETROMECCÂNICO. ....	91
4.3.4 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS PD-EM-200. ....	93
<b>4.4 RESULTADOS DO COEFICIENTE DE POISSON.....</b>	<b>94</b>
<b>4.5 RESULTADOS DO TEOR DE HUMIDADE, DENSIDADE BÁSICA E APARENTE.....</b>	<b>95</b>
4.5.1 DENSIDADES APARENTE E BÁSICA.....	95
4.5.2 TEOR DE HUMIDADE .....	96
<b>4.6 ANÁLISE E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM ESCALA REAL.....</b>	<b>96</b>
4.6.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL NAS AMOSTRAS DE ESCALA REAL ( $E_{m,g,r}$ ) .....	98
4.6.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM ESCALA REAL ( $f_{m,r}$ ).....	100
4.6.3 RESULTADOS DA ROTAÇÃO NAS EXTREMIDADES .....	101
<b>4.7 CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA .....</b>	<b>102</b>
4.7.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO MÉDIO CARACTERÍSTICO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO.....	103
4.7.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR CARACTERÍSTICO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....	103
4.7.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR CARACTERÍSTICO DA DENSIDADE .....	104
4.7.1 CLASSES DE RESISTÊNCIAS .....	105
<b>CAPÍTULO 5:    CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>106</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>106</b>
<b>5.2 LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>113</b>

---

ANEXO I – RESULTADOS PRÉVIOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PROVETES DE ESCALA REDUZIDA. ....	113
ANEXO II – RESULTADOS OBTIDOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS PROVETES DE ESCALA REDUZIDA.....	114
ANEXO III – RESULTADOS PRÉVIOS DAS AMOSTRAS ENSAIADAS À COMPRESSÃO AXIAL. ....	115
ANEXO IV - RESULTADOS OBTIDOS DO $E_{c,0}$ E $F_{c,0}$ DAS AMOSTRAS ENSAIADAS À COMPRESSÃO AXIAL.....	117
ANEXO V – RESULTADOS OBTIDOS DO COEFICIENTE DE POISSON NAS DIREÇÕES LONGITUDINAL E TANGENCIAL.....	119
ANEXO VI – RESULTADOS OBTIDOS DO TEOR DE HUMIDADE, DENSIDADES APARENTE ( $P_{AP}$ ) E BÁSICA ( $P_{BAS}$ ). ....	120
ANEXO VII – RESULTADOS PRÉVIOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PROVETES DE ESCALA REAL. ....	121
ANEXO VIII – RESULTADOS OBTIDOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS PROVETES DE ESCALA REAL.....	121
ANEXO IX – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DAS AMOSTRAS PD-F. ....	122
ANEXO X– GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DE ESCALA REAL DAS AMOSTRAS PD-F-R.....	125
ANEXO XI– GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS PD-IC-186. ....	126
ANEXO XII– GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS PD-IC-200.....	128
ANEXO XIII– GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS PD-EM-200.....	130
ANEXO XIV – RESULTADOS DOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE ACORDO COM CLASSE DE RESISTÊNCIA. ...	132
<b>FICHA TÉCNICA .....</b>	<b>133</b>

## **Lista de figuras**

---

Figura 1 - Corte da secção transversal de uma árvore, [7].	25
Figura 2 – Aspecto macroscópico das duas principais classes de madeira, [8].	25
Figura 3 – Anéis de crescimento anual de madeira de lenho macio, [5].	26
Figura 4 – Direções ou eixos principais, [5].	26
Figura 5 – Microestrutura das resinosas, [3].	28
Figura 6 – Seção transversal de um pinheiro bravo visualizada no microscópio, [10].	29
Figura 7 - Microestrutura das folhosas, [3].	29
Figura 8 – Seção transversal de uma folhosa observada ao microscópio, [10].	30
Figura 9 – Porosidade nas folhosas: a) anel; b) semi-difusa; c) difusa, [10].	31
Figura 10 – Estrutura da parede celular, [10].	32
Figura 11 – Composição química da madeira, [12].	33
Figura 12 – Tipos de nós: (A) nó envolto ou nó solto; (B) nó interligado, [14].	36
Figura 13 – Lenho de compressão (CW) e Lenho oposto (OW), [17].	37
Figura 14 – Lenho de tensão (TW) e lenho oposto (OW), [17].	38
Figura 15 – Representação do desvio da inclinação do fio, [1].	38
Figura 16 – Descaio e presença de casca do toro no elemento de madeira.	40
Figura 17 – Peça de madeira com fendas com grande profundidade, [2].	41
Figura 18 – Diferentes tipos de empenos, [2].	41
Figura 19 – Dureza Janka na direção paralela as fibras, [25].	45
Figura 20- Flexão em um elemento de madeira, [26].	48
Figura 21 – Esquema da estrutura celular da madeira, [27].	50

Figura 22 – Madeira disponibilizada pela empresa. ....	54
Figura 23 – Registrador de temperatura e humidade (modelo: EL-USB-2-LCD+), [34]. ....	55
Figura 24 - Temperatura, ponto de orvalho e humidade relativa no interior da estufa. ....	56
Figura 25 – Esquema da dimensão total das amostras. ....	56
Figura 26 – Balança utilizada para pesagem das amostras.....	57
Figura 27 – Serra de bancada. ....	58
Figura 28 – Dimensões das amostras de compressão (mm).....	58
Figura 29 - Esquema para ensaio de flexão à escala reduzida, [33].....	60
Figura 30 – Máquina de ensaio Instron 4485. ....	61
Figura 31 – Dimensões dos provetes de escala reduzida sujeitos à flexão (mm).....	61
Figura 32 – Realização dos testes.....	62
Figura 33 - Gráfico de carga-deformação dentro da faixa de deformação elástica, [33]. ....	63
Figura 34 - Layout dos ensaios de compressão axial. ....	65
Figura 35 – Variação do estado de referência para o estado deformado, [43] . ....	66
Figura 36 – Modelos de padrões, [43].....	67
Figura 37 – Ensaio de compressão utilizando CDI.....	68
Figura 38 – Amostras sujeitas à compressão.....	68
Figura 39 - Processamento de imagens e obtenção dos deslocamentos. ....	69
Figura 40 – Amostras ensaiadas com o extensômetro eletromecânico. ....	70
Figura 41 – Direção das fibras dos provetes.....	72
Figura 42 – Posicionamento dos extensômetros.....	73
Figura 43 – Medição das amostras. ....	74
Figura 44 – Amostras imersos em água. ....	75
Figura 45 – Estufa utilizada na secagem da madeira.....	76
Figura 46 – Dessecador e balança utilizada para a pesagem. ....	76
Figura 47 – Dimensões da viga (mm). ....	78
Figura 48 – Esquema e dimensões (mm) para flexão em escala real. ....	79

Figura 49 – Montagem do esquema para execução do ensaio. ....	79
Figura 50 - Amostras sujeitas ao ensaio de flexão. ....	80
Figura 51 – Ruptura ao longo do comprimento e rompimento por tração. ....	82
Figura 52 – Ruptura brusca por corte. ....	82
Figura 53 – Amostras que apresentaram valores baixos de carga máxima. ....	83
Figura 54 - Gráfico de Força × Deslocamento das amostras PD-F. ....	84
Figura 55 – Ruptura por compressão paralela às fibras: (a) provete ensaiado utilizando CDI e (b) amostra onde foi empregado o extensômetro mecânico. ....	86
Figura 56 – Ruptura próximas aos nós. ....	87
Figura 57 - Áreas com maiores deformações. ....	88
Figura 58 – Gráfico de Força × Deslocamento referente as amostras PD-IC-200. ....	89
Figura 59 – Ruptura do provete PD-IC-186-5. ....	90
Figura 60 - Gráfico de Força × Deslocamento referente as amostras PD-EM-200. ....	91
Figura 61 – Distorção no dispositivo fixado ao provete e atrelado ao extensômetro. ....	92
Figura 62 – Porosidade contida na amostra PD-EM-200-5. ....	93
Figura 63 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies, [14]. ....	94
Figura 64 – Ruptura das amostras em escala real. ....	97
Figura 65 – Corte brusco ocorrido em uma das amostras. ....	97
Figura 66 – Rompimento da amostra PD-F-R-5. ....	98
Figura 67 – Gráfico de Força × Deslocamento dos ensaios em escala real. ....	99
Figura 68 – Movimento da viga ao ser submetida ao ensaio de flexão. ....	101
Figura 69 – Gráfico Força × deslocamentos nas extremidades. ....	102
Figura 70 – O efeito do número de amostras e seu tamanho no fator $k_s$ . ....	104
Figura 71 – Valores característicos para espécie de coníferas. ....	105
Figura 72 – Provete PD-F-1. ....	122
Figura 73 – Provete PD-F-2. ....	122
Figura 74 – Provete PD-F-3. ....	122
Figura 75 – Provete PD-F-4. ....	122

Figura 76 – Provete PD-F-5. ....	122
Figura 77 – Provete PD-F-6. ....	122
Figura 78 – Provete PD-F-7. ....	122
Figura 79 – Provete PD-F-8. ....	122
Figura 80 – Provete PD-F-9. ....	123
Figura 81 – Provete PD-F-10. ....	123
Figura 82 – Provete PD-F-11. ....	123
Figura 83 – Provete PD-F-12. ....	123
Figura 84 – Provete PD-F-13. ....	123
Figura 85 – Provete PD-F-14. ....	123
Figura 86 – Provete PD-F-15. ....	123
Figura 87 – Provete PD-F-16. ....	123
Figura 88 – Provete PD-F-17. ....	124
Figura 89 – Provete PD-F-R-1. ....	125
Figura 90 – Provete PD-F-R-2. ....	125
Figura 91 – Provete PD-F-R-3. ....	125
Figura 92 – Provete PD-F-R-4. ....	125
Figura 93 – Provete PD-F-R-5. ....	125
Figura 94 – Provete PD-IC-186-1. ....	126
Figura 95 – Provete PD-IC-186-2. ....	126
Figura 96 – Provete PD-IC-186-3. ....	126
Figura 97 Provete PD-IC-186-4. ....	126
Figura 98 – Provete PD-IC-186-5. ....	126
Figura 99 – Provete PD-IC-186-6. ....	126
Figura 100 – Provete PD-IC-186-7. ....	126
Figura 101 – Provete PD-IC-186-8. ....	126
Figura 102 – Provete PD-IC-186-9. ....	127

Figura 103 – Provete PD-IC-186-10. ....	127
Figura 104 – Provete PD-IC-200-1. ....	128
Figura 105 – Provete PD-IC-200-2. ....	128
Figura 106 – Provete PD-IC-200-3. ....	128
Figura 107 – Provete PD-IC-200-4. ....	128
Figura 108 – Provete PD-IC-200-5. ....	128
Figura 109 – Provete PD-IC-200-6. ....	128
Figura 110 – Provete PD-IC-200-7. ....	129
Figura 111 – Provete PD-IC-200-7. ....	129
Figura 112 – Provete PD-IC-200-9. ....	129
Figura 113 – Provete PD-IC-200-10. ....	129
Figura 114 – Provete PD-EM-200-1. ....	130
Figura 115 – Provete PD-EM-200-2. ....	130
Figura 116 – Provete PD-EM-200-3. ....	130
Figura 117 – Provete PD-EM-200-4. ....	130
Figura 118 – Provete PD-EM-200-5. ....	131
Figura 119 – Provete PD-EM-200-6. ....	131
Figura 120 – Provete PD-EM-200-7. ....	131
Figura 121 – Provete PD-EM-200-8. ....	131
Figura 122 – Provete PD-EM-200-9. ....	131
Figura 123 – Provete PD-EM-200-10. ....	131

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Módulo de elasticidade de algumas espécies de madeira, [14].	43
Tabela 2 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras duras e macias,	44
Tabela 3 – Compressão paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14].	46
Tabela 4 - Compressão paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14].	47
Tabela 5 – Resistência ao corte paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14].	49
Tabela 6 – Densidade aparente de espécies de madeiras duras e macias, [14].	51
Tabela 7 – Valores estatísticos derivados do $E_{m,g}$ .	85
Tabela 8 – Resultados estatísticos referente à $f_m$ .	85
Tabela 9 - Valores estatísticos do $E_{c,0}$ referente aos provetes PD-CI-186 e PD-CI-200.	89
Tabela 10 - Resultados do estatísticos do $f_{c,0}$ inerentes aos provetes PD-IC-186 e PD-IC-200.	91
Tabela 11 – Resultados estatísticos do $E_{c,0}$ referentes aos provetes PD-EM-200.	92
Tabela 12 - Resultados do estatísticos da $f_{c,0}$ referentes as amostras PD-EM-200.	93
Tabela 13 – Resultados estatísticos do $v_{LT}$ .	95
Tabela 14 – Resultados estatísticos referente as densidades.	96
Tabela 15 - Resultados estatísticos referente ao teor de humidade.	96
Tabela 16 – Comparação dos resultados estatísticos dos módulos de elasticidade global entre os ensaios de flexão em escala real e escala reduzida.	99
Tabela 17 - Resultados estatísticos da resistência à flexão entre os ensaios de flexão em escala real e escala reduzida.	100
Tabela 18 – Resultados dos valores característicos.	105
Tabela 19 - Amostras de flexão de escala reduzida PD-F.	113
Tabela 20 - Amostras de 1330 mm de comprimento e $h$ de 70 mm.	114

Tabela 21 – Dados das amostras PD-IC-186.....	115
Tabela 22 - Dados das amostras PD-IC-200. ....	115
Tabela 23 – Dados das Amostras PD-EM-200.....	116
Tabela 24 – Valores determinados dos $E_{c,0}$ e $f_{c,0}$ das amostras PD-CI-186.....	117
Tabela 25 - Valores determinados dos $E_{c,0}$ e $f_{c,0}$ das amostras PD-CI-200. ....	117
Tabela 26 - Valores determinados dos $E_{c,0}$ e $f_{c,0}$ das amostras PD-EM-200. ....	118
Tabela 27 – $v_{LT}$ referente as amostras PD-IC-200. ....	119
Tabela 28 – Valores encontrados do conjunto amostral.....	120
Tabela 29 – Resultados prévios dos ensaios de flexão à escala real. ....	121
Tabela 30 – Resultados do módulo de elasticidade global ( $E_{m,g,r}$ ) e resistência à flexão ( $f_{m,r}$ ) dos ensaios em escala real. ....	121
Tabela 31 – Valores característicos para o Abeto de Douglas de acordo com a norma Europeia EN 338: 2009, classe de resistência C18. ....	132

## Nomenclatura

### Letras maiúsculas do alfabeto Latino

Símbolo	Descrição	Unidade
$A$	Área da seção transversal	[MPa]
$\bar{E}$	Módulo de elasticidade média para a amostra	[MPa]
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidade na compressão paralela ao grão	[MPa]
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidade global na flexão das amostras de escala reduzida	[MPa]
$E_{m,g,r}$	Módulo de elasticidade global na flexão das amostras de escala real	[MPa]
$E_{0,méd}$	Valor característico do módulo médio de elasticidade paralelo	[GPa]
$E_{0,05}$	5 % do módulo de elasticidade paralelo	[GPa]
$E_{90,méd}$	Média do módulo de elasticidade transversal	[GPa]
$E_r$	Erro relativo	[%]
$G_{méd}$	Valor característico da densidade	[GPa]
$F$	Força	[N]
$F_{máx}$	Força máxima	[N]
$W$	Módulo da seção	[mm <sup>3</sup> ]

### Letras minúsculas do alfabeto Latino

Símbolo	Descrição	Unidade
$a$	Distância entre uma posição de carregamento e o suporte mais próximo	[mm]
$b$	Espessura da seção transversal na flexão, ou a menor dimensão da seção transversal	[mm]

$h$	Largura da seção transversal nos testes de flexão, ou a maior dimensão da seção transversal, ou a altura do provete em testes perpendiculares ao grão;	[MPa]
$f_{c,0}$	Resistência à compressão paralela ao grão	[MPa]
$f_{c,0,k}$	Valor característico da resistência de compressão paralela ao grão	[MPa]
$f_{c,90,k}$	Valor característico da resistência de compressão perpendicular ao grão	[MPa]
$f_m$	Resistência à flexão das amostras em escala reduzida	[MPa]
$f_{m,r}$	Resistência à flexão das amostras em escala real	[MPa]
$f_{m,k}$	Valor característico da resistência à flexão	[MPa]
$f_{t,0,k}$	Valor característico da tração paralela ao grão	[MPa]
$f_{t,90,k}$	Valor característico da resistência de tração perpendicular ao grão	[MPa]
$f_{v,k}$	Valor característico da resistência de cisalhamento	[MPa]
$l$	Vão na flexão, ou comprimento do provete entre as placas	[mm]
$l_l$	Comprimento do dispositivo para medição do deslocamento na compressão paralela ao grão	[mm]
$w$	Deslocamento à meio vão na flexão	[mm]

### Letras minúsculas do alfabeto Grego

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\rho_{ap}$	Densidade básica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{bas}$	Densidade aparente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	Valor característico da densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{méd}$	Valor médio da densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Rotação nas extremidades das vigas em escala real	[rad]
$\nu_{LT}$	Coefficiente de Poisson nas direções longitudinal e tangencial	[-]



# **Capítulo 1: Introdução**

---

## **1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO**

A madeira é um material muito versátil e suas elevadas características mecânicas e grande durabilidade, quando acondicionadas de forma correta fazem jus ao seu emprego, ainda hoje, como sendo um dos principais elementos presentes na construção. O desenvolvimento tecnológico da madeira, técnicas aplicadas visando melhorias em seu desempenho, teve um aumento considerável nas últimas décadas, [1].

Por ser um material anisotrópico e com uma variabilidade apreciável dentro de uma mesma espécie, a utilização da madeira principalmente como elemento estrutural requer um conhecimento bastante aprofundado sobre suas especificidades, estruturas internas e fatores que afetam suas características físico-mecânica levando em consideração seus diferentes tipos, [2].

Por essas razões faz-se necessário cada vez mais o estudo e busca de conhecimentos sobre seus comportamentos e propriedades frente a vários aspectos, levando assim a uma maior e melhor aplicabilidade da mesma.

## **1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS**

Essa dissertação surge com o objetivo de caracterizar as principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de Abeto de Douglas amplamente utilizada no ramo da construção civil. A caracterização é realizada por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, segundo normas que regem os procedimentos experimentais possibilitando obter as propriedades desejadas, tais como: os módulos de elasticidades tanto na flexão como na compressão, assim como suas respectivas resistências, as densidades básica e aparente e teor de umidade e por último serão ensaiadas, à flexão, vigas à escala real.

Outro propósito deste trabalho objetiva-se em com base nos resultados obtidos referentes às propriedades mencionadas determinar os valores característicos, que permite relacionar a madeira à uma classe de resistência e por fim a produção de uma ficha técnica

contendo todas as informações obtidas à respeito da espécie investigada, permitindo a sua comercialização.

### **1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A tese se encontra dividida em 5 capítulos brevemente descritivos nessa seção, onde o capítulo 1 contém uma introdução sintetizada do assunto abordado e a organização da tese.

No capítulo 2 em primeira parte são expostas as particularidades da madeira dando ênfase ao seu caráter natural desde sua classificação de gêneros, bem como sua característica anisotrópica e suas macro e micro estruturas. Seguidamente são apresentados os defeitos mais comuns que afetam de forma negativa a resposta dos elementos de madeira frente a diversas solicitações. Por fim expõe-se as propriedades físicas e mecânicas de maior relevância.

No capítulo 3 dispõe-se dos métodos de ensaios utilizados durante todo o programa experimental com base nas normas vigentes. São apontados todos procedimentos, assim como os equipamentos e diferentes métodos empregues na obtenção dos parâmetros necessários para se determinar as propriedades almejadas.

No capítulo 4 é apresentada uma análise sobre o comportamento dos elementos de madeira face aos esforços sofridos pelos mesmos, também são exibidos os tratamentos dos dados obtidos, comparação com outros dados experimentais e por último o enquadramento do Abeto de Douglas em uma classe de resistência.

No capítulo 5 são expostas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido e propostas de novas linhas de investigação. Por fim, em anexo, as tabelas e gráficos dos resultados encontrados e também a ficha técnica.

## **Capítulo 2: Estado da arte**

---

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A madeira é o material mais antigos empregue na construção, devido à sua disponibilidade, abundância e suas características, como por exemplo, leveza, boa resistência mecânica e facilmente preparado e aplicável, a madeira é muito utilizada seja como elemento estrutural ou como componente decorativo. A sua utilização e criação de métodos afim de se obter melhorias no seu desempenho, como aumento de sua resistência e maior durabilidade foram-se desenvolvendo com o avanço tecnológico e industrial, [3].

Neste capítulo fundamenta-se, juntamente com trabalhos já realizados no mesmo âmbito, acerca das propriedades físicas e mecânicas, características naturais e intrínsecas da madeira e principais fatores que podem influenciar o seu comportamento.

### **2.2 CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA**

As madeiras podem ser divididas em dois grandes grupos que são: as Gimnospérmicas (denominadas de Resinosas, Coníferas ou madeiras macias) e as Angiospérmicas (designadas de Folhosas, madeiras porosas ou madeiras duras), [4].

As classe a que uma árvore pertence podem-se distinguir de acordo com alguns fatores de seus comportamentos naturais tais como: as sementes nas resinosas são expostas, ao caso contrário do que é observado nas folhosas, apesar de haver algumas exceções é possível também diferenciar as classes a partir do decaimento anual de suas folhagens, o que é observado na maioria das coníferas, [5].

As madeiras angiospérmicas podem ser divididas em dois grupos: as monocotiledóneas e as dicotiledóneas. A primeira categoria abrange aquelas que possuem características como a baixa resistência estrutural e suas estruturas são consideradas fibrosas, os exemplos deste grupo são os bambus e as palmeiras. Já a classe das dicotiledóneas inclui

tanto madeira de baixa quanto de alta qualidade e com elevada resistência estrutural, pode-se mencionar alguns tipos de árvores pertencentes à categoria das folhosas tais como, o eucalipto, o castanho, freixo, carvalho, o choupo e a noqueira, [6], [7].

O grupo das gimnospérmicas é constituído por quatro categorias, porém apenas duas possuem aspectos e características que podem ser utilizados como madeira estrutural, sendo elas a classe das coniferopsidas e as coniférais. Esses dois grupos particularizam-se por manterem suas folhas durante todo o ano, boa resistência a tração e compressão, dentre alguns exemplos que integram este gênero estão, o pinheiro, o cedro, o cipreste e o abeto, [6], [7].

### **2.3 MACROESTRUTURA DA MADEIRA**

Considerada como um material natural de estrutura complexa, devido a sua heterogeneidade e anisotropia (característica que um elemento possui em que uma certa propriedade física varia de acordo com as direções). Ao analisar um corte transversal realizado no caule de uma árvore, como representado na Figura 1 pode-se observar as importantes regiões em camadas que formam a estrutura da madeira, cada zona possui uma denominação e uma funcionalidade, [5].

1. Casca exterior ou ritidoma: constituída por tecido morto e seco e tem a finalidade de proteger a árvore do meio exterior.
2. Casca interior ou feloderme: parte macia e húmida, responsável por levar os nutrientes desde as folhas até os locais que estão em crescimento.
3. Câmbio: camada de tecido visível apenas microscopicamente, essa região é incumbida pela formação das células do lenho e cascas.
4. Lenho ativo, borne ou albarno: parte mais clara do lenho, formada por células vivas que armazenam os nutrientes e que realizam o transporte da seiva desde as raízes até as folhas.
5. Lenho inativo, cerne ou durame: zona de cor mais escura e antiga do tronco do que o borne e composta por células mortas. As modificações do borne contribuem para a formação e ampliação do cerne, essas alterações contínuas são consequências do gradativo engrossamento das paredes celulares causados por impregnação de lignina, resinas, taninos e corantes, esses elementos são responsáveis por conferir rigidez, impermeabilidade, resistência mecânica e maior durabilidade por ser constituído de

células mortas, sem amido, nem seiva e açúcares, não atraem organismos que possam causar deterioração à árvore.

6. Medula: tecido macio no centro do tronco da árvore, possui partes apodrecidas o que resultando pouca resistência e durabilidade para essa zona, [3].

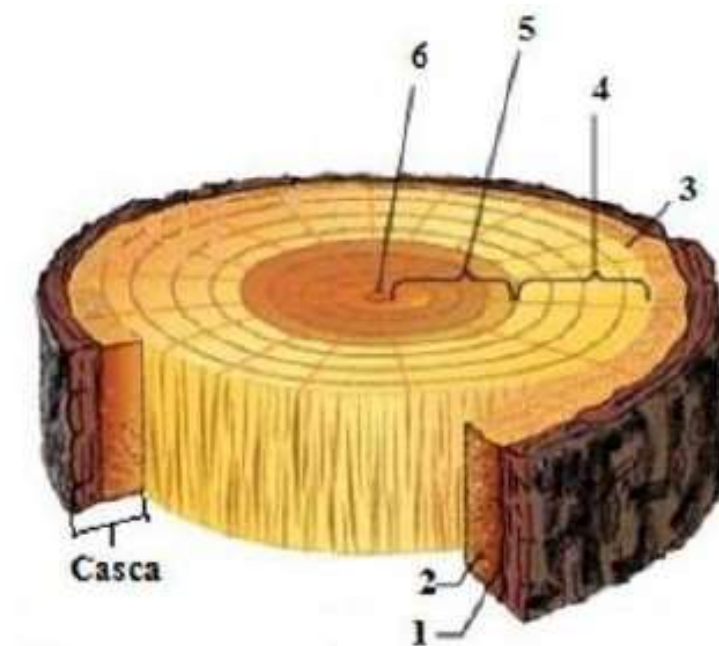


Figura 1 - Corte da seção transversal de uma árvore, [7].

A Figura 2 apresenta a distinção da macroestrutura entre as classes das coníferas e as folhosas, esta última possui porosidade nos anéis de crescimento, ao contrário do que é observado nas coníferas que exibem uma estrutura mais uniforme e sem presença de poros o que torna a madeira mais resistente, [8].

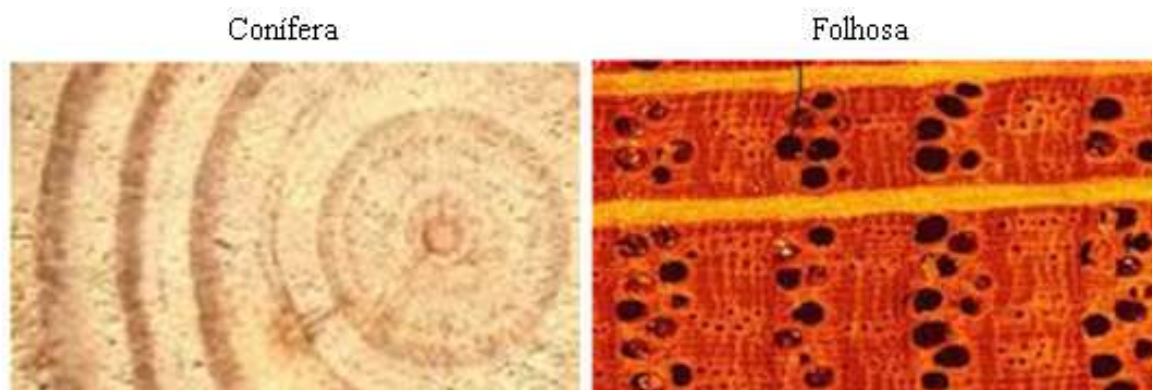


Figura 2 – Aspecto macroscópico das duas principais classes de madeira, [8].

Outros elementos celulares que se podem destacar são os anéis de crescimento anual, que são novas camadas de lenho no tronco que se desenvolvem comumente durante as estações da primavera e outono, ao longo da face transversal da árvore a formação dos anéis ocorre de forma não linear. Em cada anel tem-se dois subanéis: o lenho inicial ou lenho de primavera (LP) e o lenho tardio (LT), ou lenho de outono, Figura 3. As madeiras de lenho macio apresentam um LP de cor mais clara e tamanho das células maior, [5].

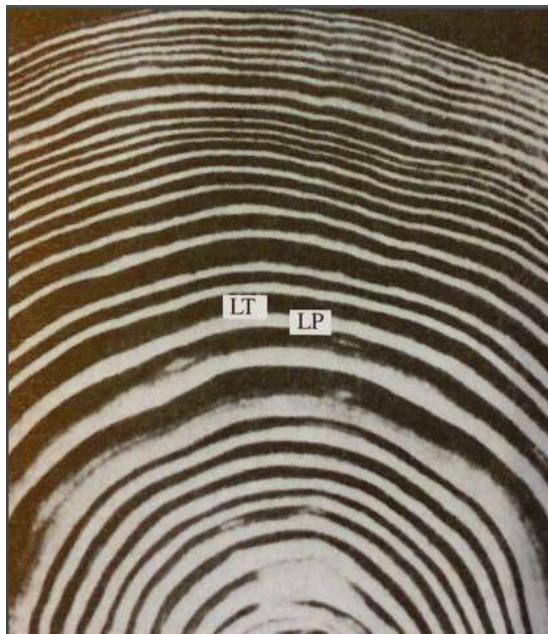


Figura 3 – Anéis de crescimento anual de madeira de lenho macio, [5].

Outra característica relacionada à macroestrutura da madeira se referente à sua anisotropia, devido às orientações de suas fibras, fato que remete a uma maior atenção no dimensionamento das estruturas de madeira, a Figura 4 apresenta as três direções ou eixos.

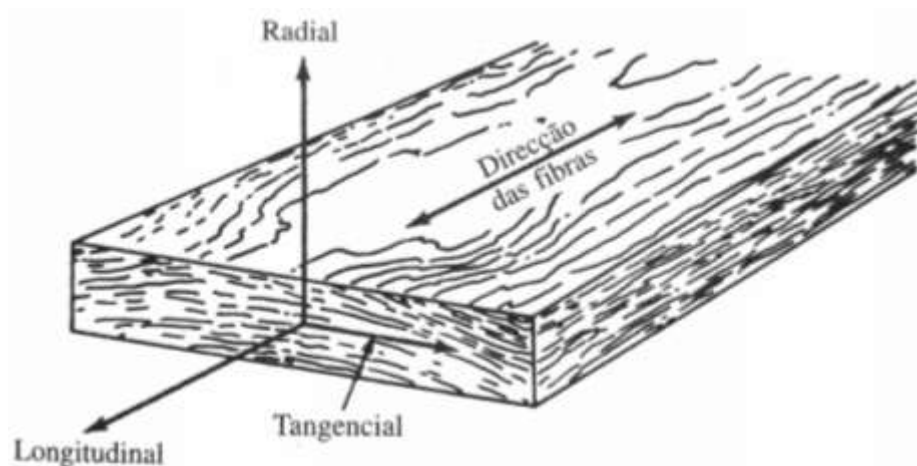


Figura 4 – Direções ou eixos principais, [5].

O eixo longitudinal dá-se na direção paralela ao tronco da árvore e às direções das fibras, o eixo radial é perpendicular aos anéis de crescimento e a direção tangencial se refere ao eixo perpendicular as fibras e tangencia os anéis de crescimento, [9].

A madeira pode apresentar maior resistência num determinado sentido ou em outro, variando o modo de como é realizado o corte, isso se dá principalmente devido as três direções demonstrarem comportamentos, características e propriedades físicas e mecânicas específicos, para fins práticos as diferenças entre as propriedades dos eixos radial e tangencial tem pouca relevância, sendo necessário distinguir apenas a propriedades na direção das fibras principais e também na direção perpendicular a estas, [9].

## **2.4 MICROESTRUTURA DA MADEIRA**

A estrutura microscópica da madeira é formada por células intituladas de fibras que possuem algumas funções tais como o armazenamento e transporte de nutrientes. De um modo geral as células que realizam o transporte estão dispostas de forma longitudinal ao tronco, possuindo cavidades internas onde ocorre a passagem de fluxo. A nível microscópico a microestrutura da madeira também se diferencia nas classes botânicas já mencionadas anteriormente, exibindo aspectos e composições distintas, [10], [9].

As funções de armazenamento, transporte, produção e transformação química de nutrientes são desempenhadas por células de parênquima, este é um tecido de células curtas dotadas de paredes relativamente pouco espessas dispostos longitudinalmente e radialmente. O parênquima é de extrema importância na sobrevivência das árvores, produzindo energia necessária que se tem acondicionada para reconstituição do aparelho fotossintetizador quando ocorre uma desfolhação, seja por processos naturais, por ações humanas, por agentes atmosféricos ou por qualquer outra causa, [3], [10].

### **2.4.1 Resinosas**

A Figura 5 apresenta a microestrutura das resinosas que se diferem em três formações básicas: traqueídeos, raios lenhosos e canais de resina.

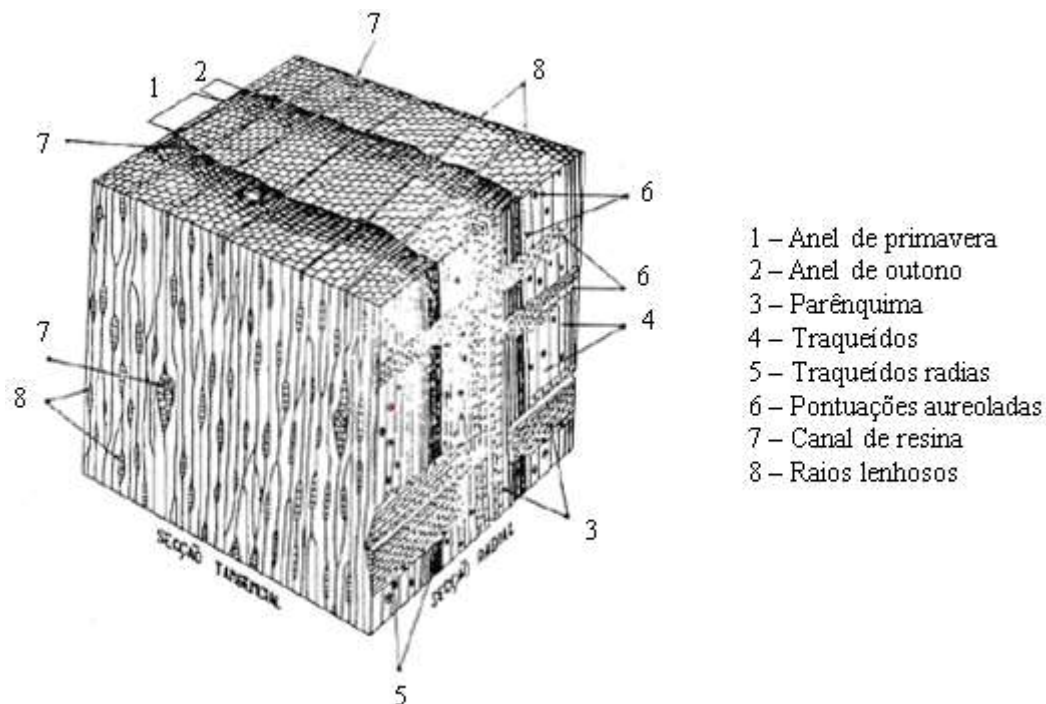


Figura 5 – Microestrutura das resinosas, [3].

A madeira das coníferas são constituídas em sua maioria por prosênquima, um tecido formado por traqueídeos que por sua vez são células finas e alongadas, com larguras de 2 a 5 mm possuindo diâmetros de 10 a 50  $\mu\text{m}$  praticamente uniformes, os traqueídeos se apresentam nas direções radiais e longitudinais e tem por finalidade o suporte mecânico e transporte de seiva que se dão por meio de aberturas denominadas pontuações, porém essas funções variam de acordo com as fases da árvore, como por exemplo no período de crescimento da madeira de primavera a função predominante é a condução, ao passo que na fase da madeira de outono prevalece a função de suporte mecânico, [3], [6], [10].

Já os raios lenhosos são diversas linhas finas e claras responsáveis pelo armazenamento e/ou condução de nutrientes no sentido radial ao tronco, a madeira que possui um grande número de raios lenhosos existentes dispõe-se de poucas retrações devido à humidade. Os raios lenhosos instituem o parênquima radial, há também o parênquima longitudinal arranjados na direção geral das fibras disperso no centro do prosênquima e atribuído essencialmente à distribuição e acúmulo das substância, como os hidratos de carbono. As resinosas ainda possuem os canais resiníferos que são limitados por células secretoras de resina, responsáveis pela produção e transporte da mesma, os canais são dotados de cavidades longitudinais cercadas de células de parênquima [3], [10].

A Figura 6 exibe uma seção transversal de um pinheiro bravo observada no microscópio, podendo notar os vários elementos da estrutura das resinosas.

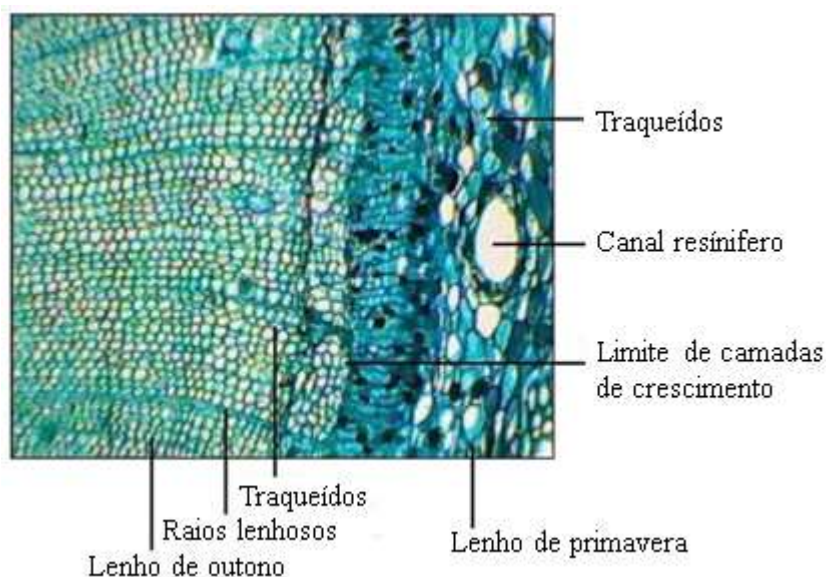


Figura 6 – Seção transversal de um pinheiro bravo visualizada no microscópio, [10].

#### 2.4.2 Folhosas

Esta classe apresenta um arranjo fibro-anatômico um pouco mais complexo quando comparadas às resinosas, a Figura 7 expõe a microestrutura referente as folhosas, no qual é constituída por quatro tipos de células: vasos, parênquima, fibras e raios lenhosos, [3].

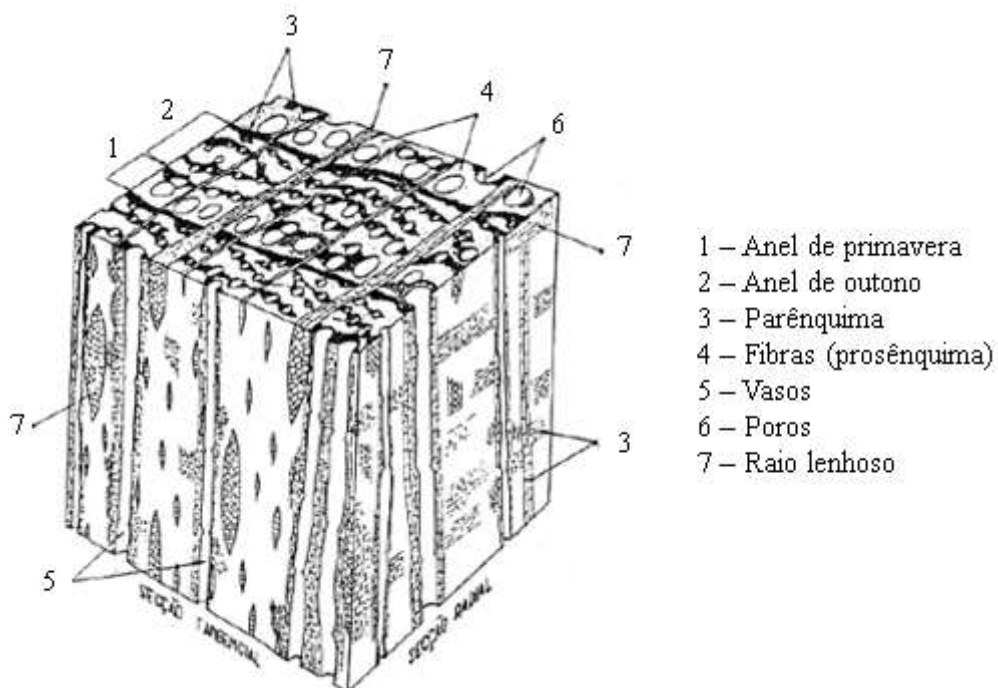


Figura 7 - Microestrutura das folhosas, [3].

As fibras são células prosênquima organizadas de forma longitudinal ao caule, contêm extremidades afiladas e apresentam variações em seus diâmetros e normalmente são inferiores a 20  $\mu\text{m}$  aproximadamente, o comprimento podem variar entre 0,7 e 3 mm. São células fortemente aglomeradas ligadas por um polímero denominado lenhina que constituem os componentes que concedem resistência e sustentação à árvore, a compactidade, a textura e a disposição do tecido fibroso estão diretamente ligadas as características mecânicas desenvolvidas na madeira, [3], [5], [11].

As fibras e os traqueídeos instituem o tecido básico das folhosas, havendo canais organizados de forma concentrada, semi-difusa e difusa denominados de vasos, estes são tubos longitudinais formados por prosênquima que constituem a maior parte do lenho nas folhosas. Cada vaso é composto por células longitudinais e tubulares sobrepostas, sendo perceptíveis a olho nu, suas extremidades são abertas permitindo o fluxo de seiva ao longo do lenho, [3], [4].

O parênquima é um outro tecido já descrito anteriormente que também faz parte da microestrutura das folhosas, tem como principal função o fornecimento e reservas de substâncias nutritivas. Outro principal componente são os raios lenhosos, faixas de células do parênquima dispostas em alinhamentos radiais, este elemento provoca uma amarração das fibras no sentido radial o que acarreta em alterações nas características nesta direção, eles são maiores nas folhosas do que nas resinosas podendo chegar a 400  $\mu\text{m}$  de largura, [3], [10].

Assim como nas coníferas também é possível descrever o lenho nas dicotiledôneas, por meio de observações visuais dos planos fundamentais da estrutura do mesmo. Como apresentado na Figura 8, no plano transversal nota-se os anéis de crescimento, os raios lenhosos, as fibras e os vasos condutores, [10].

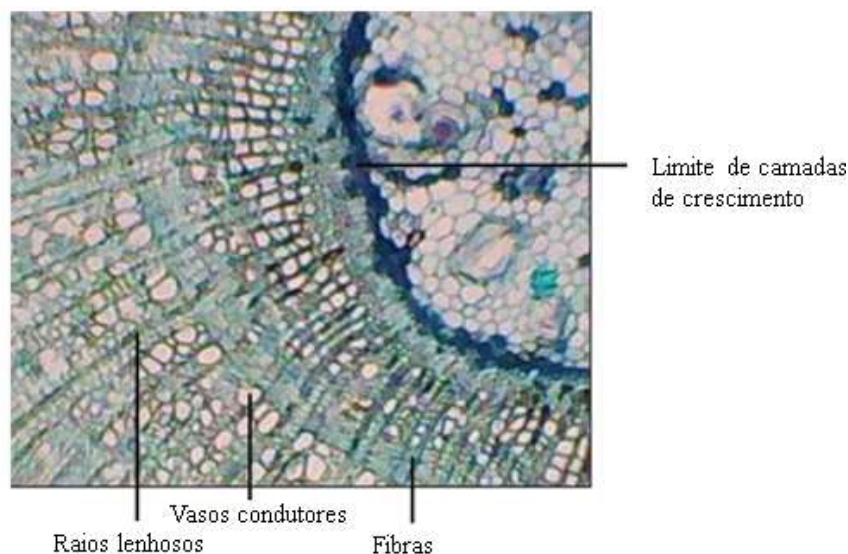


Figura 8 – Seção transversal de uma folhosa observada ao microscópio, [10].

Outro fator importante a ser discutido é a porosidade que se dá por meio da caracterização do tamanho e organização dos vasos no plano em questão, podendo se apresentar na forma difusa, semi-difusa ou em anel como mostrado na Figura 9.

A porosidade difusa compreende numa distribuição uniforme dos vasos fazendo com que os diâmetros sejam análogos, já a porosidade em anel é particularizada por uma disposição distinta entre os poros da madeira de primavera e de outono, tendo uma aglomeração dos poros no lenho inicial portando um maior volume quando comparado com o lenho tardio e a porosidade semi-difusa é definida quando ocorre uma transição gradual do volume dos vasos entre a camada de primavera e de verão, [10].

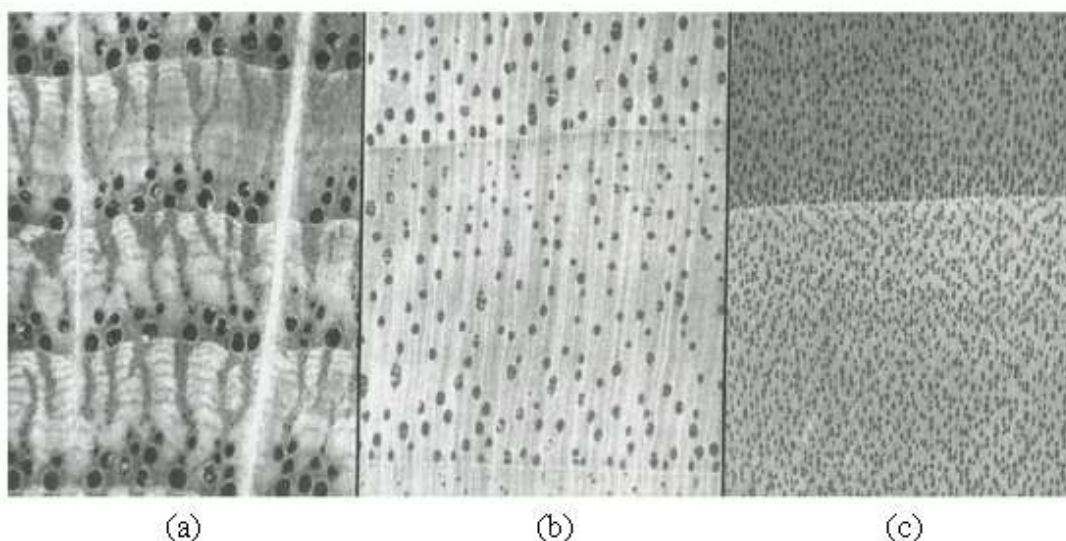


Figura 9 – Porosidade nas folhosas: a) anel; b) semi-difusa; c) difusa, [10].

## 2.5 ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA

Genericamente qualquer que seja um elemento de madeira o lenho é constituído por numerosas células, estes componentes são caracterizados por membranas formadas basicamente por três moléculas: celulose, hemicelulose e lenhina. A celulose tem como elementos básicos em suas paredes celulares as microfibrilas, estas estão fixas à hemicelulose. A forma como essas moléculas se ligam e se orientam influenciam a resistência da árvore em relação ao seu próprio peso e conforme a constituição das paredes celulares e também pode tornar a madeiras mais vulnerável ou não à ataques biológicos, [10], [12].

As paredes celulares são divididas em primárias e secundárias, Figura 10, onde se verifica a existência de uma fina camada entre as células, denominada de lamela média, a qual une as mesmas entre si, esta componente é desprovida de celulose, rica em lenhina e apresenta

uma espessura de 0,2 a 1,0  $\mu\text{m}$  sendo composta por microfibrilas. A parede primária é a proteção preliminar da célula e primeira camada depositada ao longo do desenvolvimento celular, as fibrilas de celulose nesta parede estão dispostas em níveis finos que se cruzam, a sua espessura pode variar de 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ . A parede secundária é formada por três camadas: S1 (camada de transição), S2 (camada média) e S3 (camada interna), [7], [10], [12].

Na S1 as microfibrilas estão arranjadas em espirais, sua espessura varia de 0,1 a 0,35  $\mu\text{m}$ , e é ela que garante o bom desempenho em tração transversal da madeira. A S2 é a mais espessa dentre as camadas, onde sua dimensão pode medir de 1 a 10  $\mu\text{m}$  o que corresponde a cerca de 75 a 85% da espessura total da parede e tem-se microfibrilas bem agrupadas formadas por celulose densa. A S3 possui uma espessura de 0,5 a 1,1  $\mu\text{m}$  e é a camada limitadora da cavidade celular ou lúmen, [10].

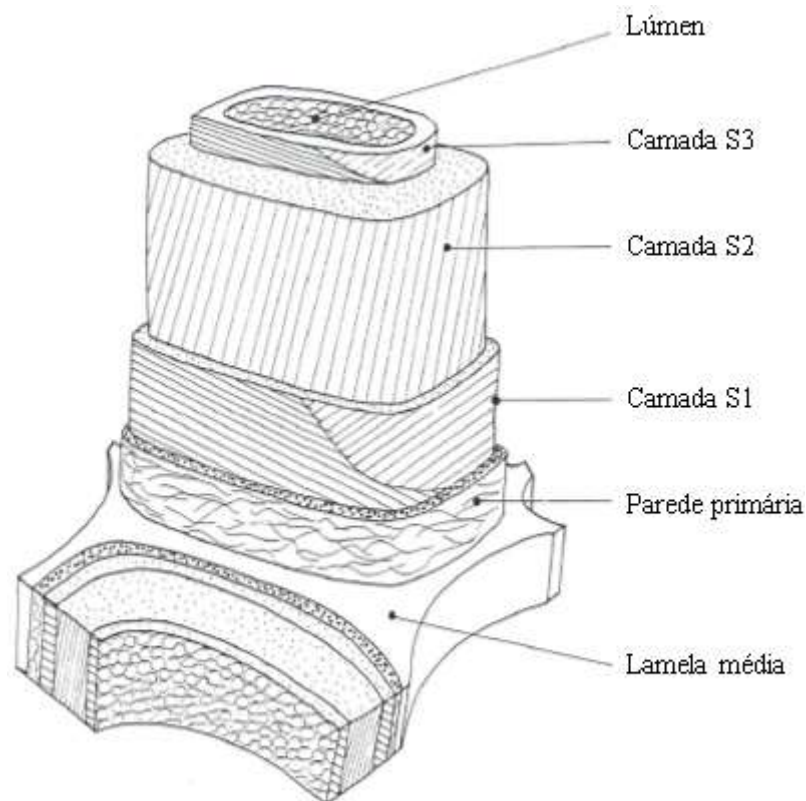


Figura 10 – Estrutura da parede celular, [10].

O arranjo das microfibrilas nas camadas da parede secundária influencia as características de expansão da madeira quando está húmida e a predominância de microfibrilas direcionadas no sentido paralelo ao eixo longitudinal da árvore, limita a expansão na mesma direção na madeira juvenil. Os estudos do comportamento reológico da madeira têm-se fundamentado no modo de como os elementos fibrilares se comportam, isso se deve ao fato de

que estes componentes se encontrarem em grande número quando comparados a outros e também devido a espessura de suas paredes, o que atribui rigidez e resistência ao material quando o mesmo está sobre aplicações de força, [12].

## 2.6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

É de conhecimento que os principais elementos e em maiores proporções que constituem a madeira são, Carbono (50%), Oxigênio (43%), Hidrogênio (6%), Azoto e alguns minerais, como o Cálcio, Potássio e Magnésio, Figura 11. Faz-se necessário também realizar uma distinção dos componentes fundamentais que constituem a parede celular que são a celulose, a hemicelulose polioses e a lignina, [4].

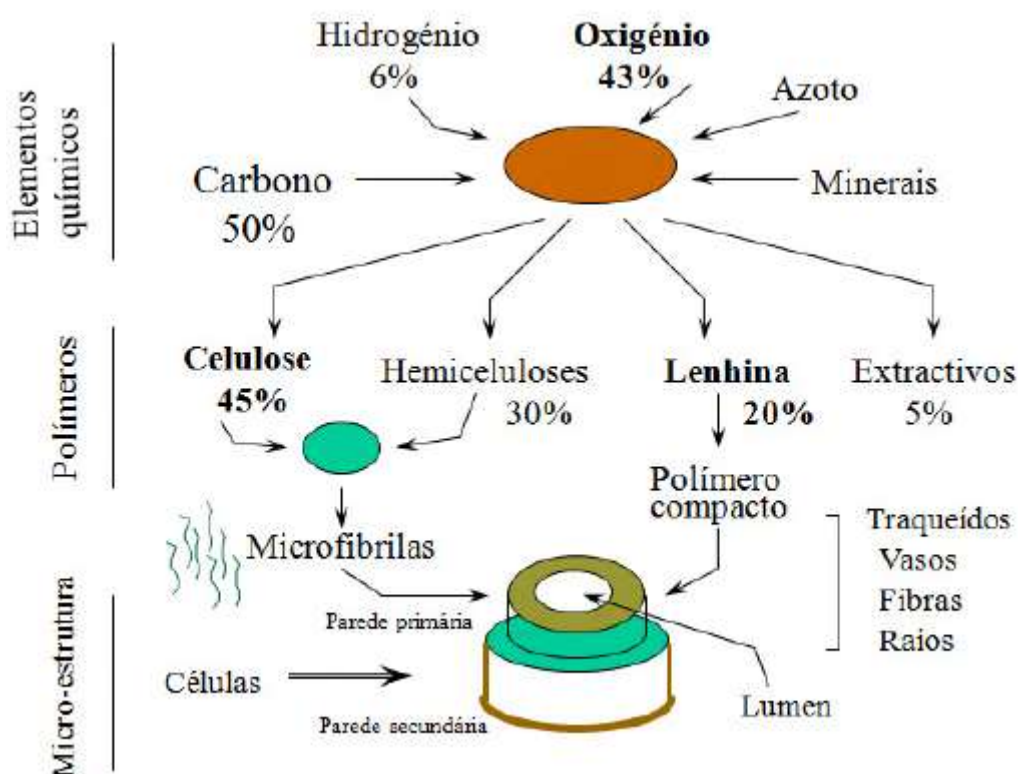


Figura 11 – Composição química da madeira, [12].

A celulose compõe em torno de 40 a 45% da composição química, é um polímero tridimensional com configurações de cadeias largas unidas por pontes de hidrogênio e outras ligações químicas, apresenta boa resistência à tração e alta resistência mecânica. A hemicelulose corresponde a cerca de 15 a 35% da composição química, polímero tridimensional

amorfo ramificado por diversos açúcares, possui dimensão variável e está presente em maior quantidade nas folhosas, [4].

Lenhina constitui de 17 a 25% da formação química, é um polímero tridimensional amorfo, assim como na hemicelulose forma-se uma matriz que une a celulose, contribuindo para a integridade estrutural das fibras e diferentemente da hemicelulose o maior teor de lenhina está presente nas resinosas e também encontram-se algumas distinções estruturais deste componente nas duas espécies. Este elemento é considerado como um “cimento biológico” e segundo alguns autores, comparam a combinação de celulose e da lenhina à do aço e do concreto armado, onde as microfibrilas de celulose desempenham a função das armaduras metálicas responsáveis pela resistência à tração, enquanto que a lenhina atua com a mesma funcionalidade do concreto, comportando os esforços de compressão, [4], [12].

As três substâncias mencionadas anteriormente corresponde em média a 95% da constituição total da madeira, o outro percentual restante refere-se as substâncias extrativas, tais como: óleos essenciais, ceras, gorduras, resinas, taninos, matérias corantes, saponinas, hidrocarbonetos solúveis, açúcares, entre outros. Podendo essas substâncias não estarem presentes em todas as espécies de madeira, sendo algumas delas específicas de determinados gêneros. Os extrativos se encontram principalmente no cerne, fator responsável pela cor mais escura e complementam a resistência dessa região à ataques biológicos, também interferem em algumas propriedades da madeira, como a dureza, a durabilidade, abrasão, cheiro, colagem e também podem influenciar na infiltração de tintas e vernizes, [10].

## **2.7 DEFEITOS DA MADEIRA**

Compreende-se por defeitos qualquer tipo de irregularidades, modificações químicas ou anomalias estruturais em sua constituição que influenciam o seu desempenho físico-mecânico, o que afeta a qualidade do material e reduz sua capacidade de resistência. Essas imperfeições podem ser derivadas do processo natural de crescimento da árvore ou de algum procedimento inapropriado durante seu abate, extração e transporte levando à depreciação das peças, madeiras que apresentam altos teores de umidade intensificam a presença de defeitos, [2], [1].

Devido à diminuição do desempenho das propriedades físicas e mecânicas é necessário elaborar métodos de classificação a partir da identificação dos defeitos, com o intuito de se ter um controle na qualidade da madeira e classificação, esta que pode ser realizada de forma visual ou mecânica, [12], [1].

A variedade de defeitos presente na madeira é muito ampla, porém os que aparecem com maior frequência são:

- Nós;
- Empenamentos;
- Descaio;
- Fendas;
- Inclinação do fio;
- Anéis de crescimento;
- Ataques de insetos e fungos (apodrecimento; bolores);
- Medula e casca inclusa;
- Lenho de reação;
- Bolsas de resina.

Os defeitos podem ser relacionados em grupos que se diferenciam uns dos outros devido à origem da sua formação e denominam-se por, [1]:

- Defeitos de crescimento;
- Defeitos de exploração;
- Defeitos de secagem;
- Defeitos de alteração.

### 2.7.1 DEFEITOS DE CRESCIMENTO

Os defeitos de crescimento são aqueles oriundos de transformações na estrutura fibrosa durante as atividades vegetativas da planta, devido a fenômenos biológicos de crescimento e ação de agentes externos. Os nós, bolsa de resina, lenho de reação, inclinação do fio, casca inclusa são exemplos dessa categoria de anomalias, [1].

#### 2.7.1.1 Nós

Os nós são provenientes da existência de antigos ramos que foram inseridos no tronco, este defeito apresenta uma coloração mais escura, maior densidade, elevada dureza, elevado teor de extrativos quando comparados com o lenho circundante, os nós são formados por fibras cuja orientação é aproximadamente perpendicular à direção geral das que o envolve, fato que altera negativamente a resistência mecânica do material, [12], [2].

Segundo [13] os nós são classificados em dois grupos, que estão apresentados na Figura 12.

- Nós interligados – é denominado interligado quando o mesmo está consideravelmente fixo à madeira que o rodeia, esses defeitos são produzidos por ramos vivos e estão cercado por anéis circulares de crescimento.
- Nós envolto ou soltos – um nó envolto é desenvolvido quando uma árvore cresce em torno de um ramo morto. É cercado por um anel escuro de casca, seu centro é frequentemente deteriorado e é denominado como um nó “solto”, pois a casca impede que o nó se prenda firmemente à madeira em torno dele, [13].

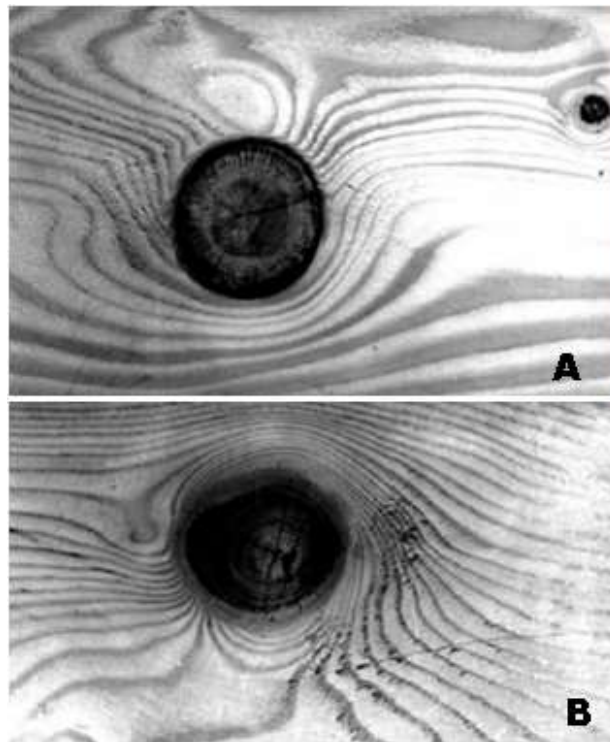


Figura 12 – Tipos de nós: (A) nó envolto ou nó solto; (B) nó interligado, [14].

#### 2.7.1.2 Bolsa de resina

Esses defeitos nada mais são do que lacunas que contem resina, podendo estar no estado líquido ou sólido, esta anomalia afeta as propriedades mecânicas da madeira como também o aspecto estético, as bolsas de resina aparecem somente nas resinosas porém nas folhosas podem ocorrer defeitos semelhantes designados por bolsa de goma, [1], [15].

O desenvolvimento de bolsas de resina ainda não é totalmente compreendida, porém a hipótese mais comum e aceita é que essa anomalia é influenciada por tensões de flexão dentro

do tronco da árvore provocadas por fortes rajadas de vento, tal ocorrência provoca cisalhamento e torção induzidas que levam a contusões subseqüente de uma ruptura tangencial do câmbio próximo aos tecidos iniciais de madeira, a cavidade em progresso é então preenchida com resina por canais adjacentes, [15].

### 2.7.1.3 Lenho de reação

Esta anomalia geralmente é desenvolvida em virtudes à alguma orientação que não seria adequada ao caule ou ramo provocada por fenômenos naturais tais como, ventos predominantes, neve, declive do terreno, cargas, procura por luz, entre outros fatores. O lenho de reação tem suas propriedades mecânicas e químicas alteradas se comparadas à um lenho que não sofreu modificações. Existem duas categorias desses defeitos: o de compressão (CW) desenvolvidos nas coníferas e o lenho de tração manifestados nas folhosas (TW), [16].

A madeira de compressão é formada no lado inferior do caule em árvores ou ramos inclinados, como apresentado na Figura 13, onde também se faz referência ao lenho oposto (OW). Sua função é corrigir o caule inclinado de volta à posição vertical, produzindo tensão de compressão, essa classe de madeira apresenta cor mais escura, maior densidade e podem ser identificadas visualmente pois, as mesmas apresentam formatos ovais na maioria dos casos, [17].

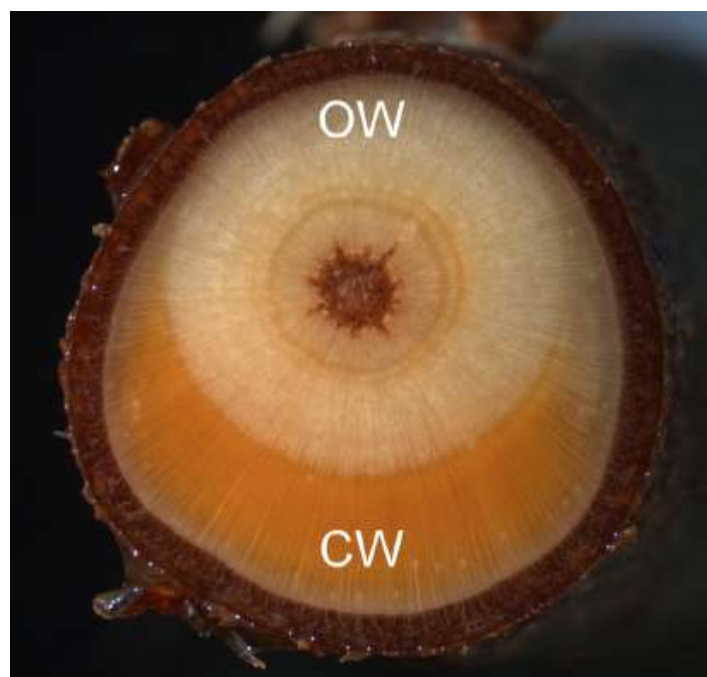


Figura 13 – Lenho de compressão (CW) e Lenho oposto (OW), [17].

O lenho de tração (TW), demonstrado na Figura 14, também é formado devido à inclinações do tronco, porém diferente do que ocorre na madeira de compressão, o lenho tracionado se desenvolve na parte superior do caule inclinado, esta singularidade atua puxando o caule para a posição vertical. A madeira de tração manifesta alta retração longitudinal devido à alta tensão residual, também apresenta um aumento em sua rigidez, [17].

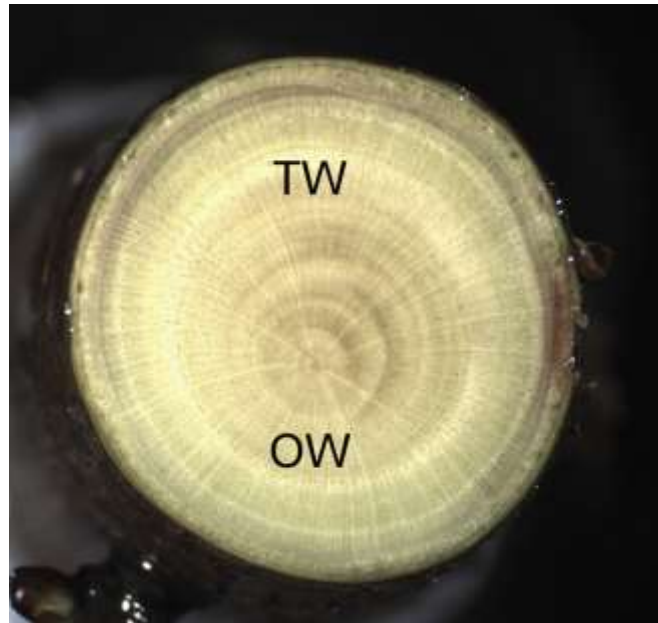


Figura 14 – Lenho de tensão (TW) e lenho oposto (OW), [17].

### 2.7.1.3 Desvio da inclinação do fio

Esta anomalia trata-se de uma inclinação das fibras relativamente acentuada em relação ao eixo longitudinal das peças, Figura 15, essa ocorrência pode ter sido causada no momento da serração ou proceder da inclinação natural das árvores devido a ventos predominantes onde as mesmas se desenvolveram, [1].

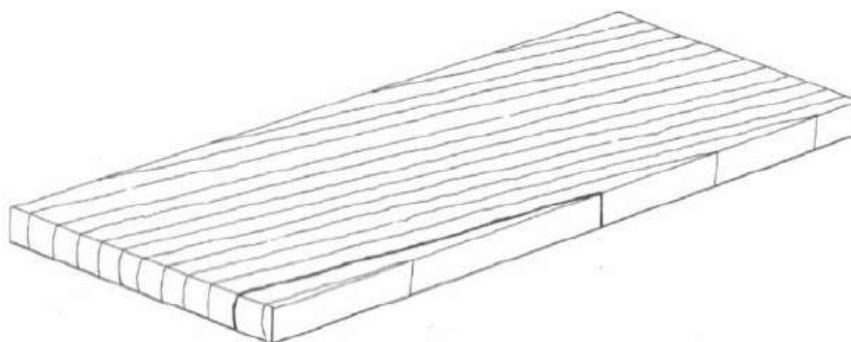


Figura 15 – Representação do desvio da inclinação do fio, [1].

O desvio da inclinação do fio tem uma importância particular pois enfatiza a anisotropia própria da madeira, fato relevante na triagem para estruturas, além de alterar as características de resistências e também pode induzir ao aparecimento de empenos e fissura, [1].

#### 2.7.1.4 Casca inclusa

A casca inclusa dá-se pela existência de um segmento de casca inserida no lenho, acontecimento que pode estar relacionado ao crescimento irregular do tronco ou por morte de zonas limitadas do câmbio ocasionadas por traumatismos, cortes, tumores, entre outros, este defeito propicia um apodrecimento mais precoce das peças de madeira, [2].

#### 2.7.1.5 Anéis de crescimento

As causas desse defeito são referentes as condições de crescimento da árvore, a excentricidade (circunstância devido ao crescimento excêntrico de maneira exagerada) e a descontinuidade da largura dos anéis, são fatores que afetam a resistência de um elemento de madeira e faz com que o mesmo apresente propriedades distintas, o que pode levar o material ao empenamento, [2].

### 2.7.2 DEFEITOS DE EXPLORAÇÃO E SECAGEM

Os defeitos de exploração são provenientes de procedimentos incorretos feitos durante as etapas de colheita, corte e transporte da madeira, são exemplos dessa categoria de anomalias: descaio, medula e fendas. Já os defeitos de secagem são implicações causadas diretamente pela retratação da madeira quando a mesma perde umidade, as fendas também podem ser defeitos oriundos da secagem, outra singularidade deste grupo é o empenamento, [1].

#### 2.7.2.1 Medula

A existência de medula em um elemento de madeira origina-se de desdobros (cortes realizados nas toras para formação de pranchões, vigas e tábuas) mal efetuado, proporcionando que peças retiradas do centro contenham tecidos pertencentes à medula, esta que possui características tais como, parede celular menos espessa e baixos valores de resistência, [2].

### 2.7.2.2 Descaio

São anomalias resultantes de cortes realizados próximos à superfície do toro, ocasionando numa seção transversal reduzida como pode ser observado na Figura 16, outro fato que pode ser observado também na figura é a presença de casca do toro que pode favorecer à ataques biológicos da peça, [2].



Figura 16 – Descaio e presença de casca do toro no elemento de madeira.

### 2.7.2.3 Fendas

Este defeito pode surgir tanto no processo de exploração quanto na secagem. Quando ocorre no primeiro caso, impactos provenientes do momento do abate faz com que as tensões sejam liberadas sobre a madeira, resultando no aparecimento de fendas, rachaduras de topo e rachaduras internas, como é mostrado na Figura 17, vale ressaltar que em algumas situações as árvores podem rachar com o impacto da queda ao solo. No contexto da secagem as fendas surgem devido as tensões oriundas da diferença entre as retrações do lenho interior frente às retrações de zonas exteriores, promovendo esforços de tração transversal capazes de abrir o lenho segundo planos radiais por consequência reduzindo a fração resistente, [1], [18].



Figura 17 – Peça de madeira com fendas com grande profundidade, [2].

#### 2.7.2.4 Empenamento

Os empenamentos dão-se na madeira no decorrer na secagem e desdobro, os empenos na secagem ocorrem devido às diferentes retrações em várias porções da estrutura do elemento em diversas direções, gerando formas inesperadas na peça, a Figura 18. No caso em que os empenamentos derivam do processo de desdobro, acontece o encurvamento em virtude das tensões durante o corte, com isso há uma tendência das peças de se curvarem de modo que as extremidades se distanciam do centro do toro, [1], [19].

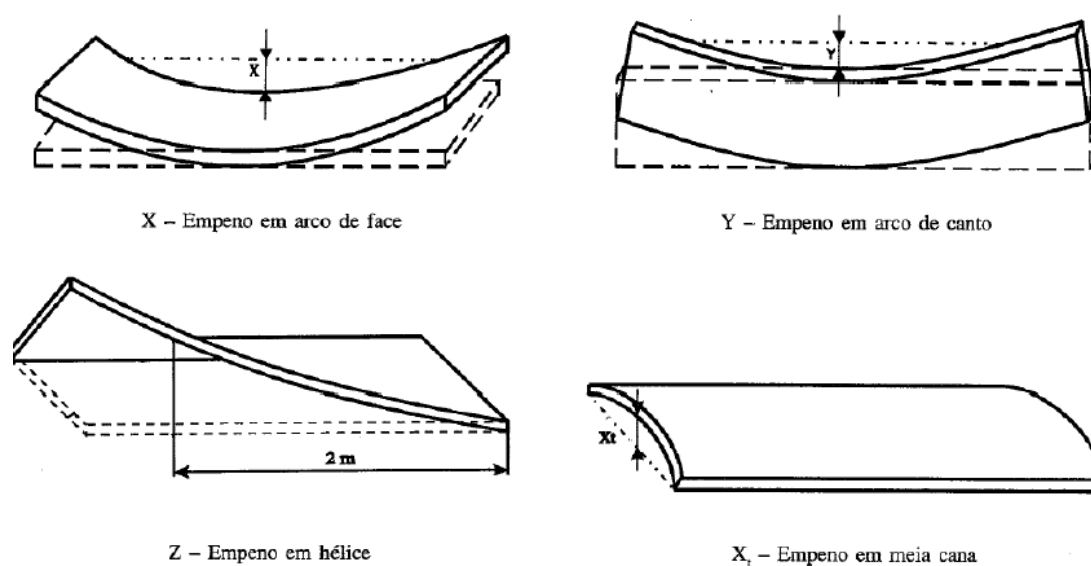


Figura 18 – Diferentes tipos de empenos, [2].

### 2.7.3 DEFEITOS DE ALTERAÇÃO

Estas anomalias são causadas por ataques de agentes bióticos, tais como fungos e insetos. A madeira é um material muito propício à ocorrência desses ataques, que são capazes de causar danos consideráveis na sua resistência, podendo também intensificar e ampliar defeitos já existentes no elemento. Das patologias causadas por agentes na madeira, evidenciam-se, [1]:

- Podridão – Provocada pelos fungos xilófagos, sendo capazes de causar avarias graves, como perdas de densidade, resistência estática e dinâmica;
- Azulado – O ataque dos fungos xilófagos às células superficiais, acarreta em um aumento da permeabilidade da madeira e alteração da sua coloração;
- Ataques de Caruncho e Traça – Ocasionalmente elevam a degradação mecânica na madeira, provocando galerias no interior do borne, região que geralmente sofre esse ataque;
- Ataques de Térmitas – Assim como os insetos anteriores, também são responsáveis pelo surgimento de galerias na madeira, porém são mais internas não sendo detectadas a olho nu, [2].

## 2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Tomando em conta a perspectiva da estabilidade estrutural e da durabilidade, as propriedades mecânicas são de grande importância para a classificação e caracterização da madeira, possibilitando selecionar a espécie mais adequada para a função que se deseja utilizar o elemento. A madeira pode ser caracterizada como um material ortotrópico, ou seja, apresenta propriedades únicas e independentes na direção dos três eixos perpendiculares entre si, como já apresentados na Figura 4 descrita neste capítulo. É de conhecimento que há fatores que afetam suas propriedades, aspectos que são específicos e também os ligados ao ambiente onde a árvore se desenvolve, [14], [20].

Dentre os fatores que influenciam nas propriedades encontram-se: o percentual de madeira juvenil que se encontra no elemento, largura dos anéis de crescimento, densidade, inclinação da grão, quantidade de extrativos, teor de humidade, intensidade ao ataque de insetos, tipo, localização e quantidade de defeitos existentes, [21].

Destaca-se também que além de outros fatores que interferem nas propriedades o quesito idade que se apresenta como um dos mais importantes pois com o aumento da mesma

verifica-se a presença de fibras mais longas, formação de madeira mais estável, aumento da densidade e resistência mecânica. Ao longo desse tópico serão apontados as principais propriedades mecânicas e sua importância para com o material, [22], [23].

### 2.8.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é a máxima tensão que um material suporta sem que ocorram deformações permanentes, quando os esforços são retirados o mesmo tende a voltar ao seu estado natural. Quando esse limite é ultrapassado para níveis mais altos de tensão, ocorre as deformações plástica ou permanentes podendo levar à ruptura. Os três módulos de elasticidade, que são retratados por  $E_L$ ,  $E_R$  e  $E_T$ , são respectivamente os módulos ao longo dos eixos longitudinal, radial e tangencial da madeira obtidos através de testes de compressão, essas propriedades elásticas variam dentro de cada espécie e também de acordo com o teor de humidade e densidade. A Tabela 1 apresenta o módulo de algumas espécies de madeiras duras e macias considerando um teor de humidade de 12%, onde é possível observar uma variabilidade entre essa propriedade nas diferentes gêneros. [14].

Tabela 1 – Módulo de elasticidade de algumas espécies de madeira, [14].

<b>Espécies</b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	12000
Álamo tremedor	8100
Álamo amarelo	10900
Vidoeiro amarelo	13900
Cerejeira preta	10300
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	4300
Cedro vermelho	8200
Abeto de Douglas	10300
Pinho vermelho	11200
<i>Hemlock</i>	11300
Larício	12900

Sabe-se que quanto maior o módulo de elasticidade maior é a resistência do material às deformações. A madeira possui menor módulo de elasticidades quando comparada com o aço, por exemplo, [10], [14].

## 2.8.2 COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente de Poisson é uma constante elástica mensurada a partir da razão entre a deformação perpendicular a uma aplicação de carga e a deformação paralela à mesma. No caso de materiais ortotrópicos como a madeira o coeficiente de Poisson se torna um fator complicado de se determinar, uma vez que o mesmo depende da direções das fibras em que o material está sofrendo esforço. Essa propriedade segundo as suas direções longitudinal, tangencial e radial são indicadas por  $\nu_{LT}$ ,  $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RL}$ ,  $\nu_{TR}$ ,  $\nu_{RT}$ , onde a primeira letra do subscrito é referente à direção da tensão aplicada e a segunda letra à direção da deformação lateral, por exemplo,  $\nu_{LR}$  é a razão entre a deformação ao longo do eixo radial causada por tensão ao longo da direção longitudinal, [14], [24]. Na são apresentados alguns valores do coeficiente de Poisson nas diferentes direções em espécies distintas de madeiras duras e macias, onde se nota também uma alternância dos valores dessa constante.

Tabela 2 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras duras e macias,

<b>Madeiras duras</b>						
<b>Espécies</b>	<b><math>\nu_{LR}</math></b>	<b><math>\nu_{LT}</math></b>	<b><math>\nu_{RT}</math></b>	<b><math>\nu_{TR}</math></b>	<b><math>\nu_{RL}</math></b>	<b><math>\nu_{TL}</math></b>
Freixo branco	0,371	0,440	0,684	0,360	0,059	0,051
Álamo tremedor	0,489	0,374	-	0,496	0,054	0,022
Álamo amarelo	0,318	0,392	0,703	0,329	0,030	0,019
Vidoeiro amarelo	0,426	0,451	0,697	0,426	0,043	0,024
Cerejeira preta	0,392	0,428	0,695	0,282	0,086	0,048
<b>Madeiras macias</b>						
Cedro branco	0,337	0,326	0,411	0,356	-	-
Cedro vermelho	0,337	0,340	0,458	0,345	-	-
Abeto de Douglas	0,292	0,449	0,390	0,374	0,036	0,029
Pinho vermelho	0,347	0,315	0,408	0,308	-	-
<i>Hemlock</i>	0,485	0,423	0,442	0,382	-	-
Larício	0,355	0,276	0,389	0,352	-	-

### 2.8.3 DUREZA

Trata-se de uma propriedade mecânica que o material possui referente a sua capacidade de resistir ao desgaste, penetração e ranhuras. Tal parâmetro tem grande relevância na classificação e na seleção de espécie de madeiras mais adequadas em função da sua utilização segundo seu grau de dureza, como é o caso de peças empregues em pavimentos. As madeiras são normalmente denominadas, em termos de dureza, como brandas, medianamente duras e duras, [6].

Na Figura 19 está exposta dados de dureza de três espécies distintas, onde se tem 9 amostras de cada uma delas. O ensaio dureza Janka é um procedimento que permite obter a força necessária para que meia esfera com 1 cm de diâmetro penetre na superfície da madeira, [25].

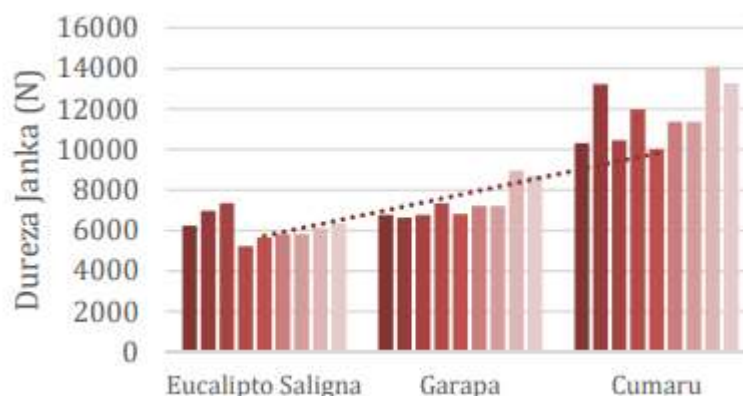


Figura 19 – Dureza Janka na direção paralela as fibras, [25].

### 2.8.3 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

São as propriedades mais comumente mensuradas, que descrevem a última tensão do material sobre aplicação de carga. Na madeira esses aspectos variam muito de acordo com alguns fatores já citados no presente tópico e também da condição e duração do carregamento pelo qual o material está sendo solicitado. Dentre essas propriedades estão, as relacionadas com a compressão, cisalhamento, tração, flexão, torção e resistência ao choque, [13].

#### 2.8.3.1 Compressão paralela às fibras

É um carregamento realizado paralelamente às fibras, sabe-se que a madeira alcança valores elevados de resistência à compressão nessa direção das fibras como é observado na

Tabela 3, que aponta valores de compressão paralela às fibras de algumas espécies de madeiras duras e macias em um teor de humidade de 12%. Essa propriedade torna-se de grande relevância quando os elementos possuem a funcionalidade de pilares. Esse tipo de solicitação acarreta em uma separação das fibras longitudinais, provocando uma diminuição da sua resistência global, os valores obtidos nesse processo estão intimamente ligados ao teor de água contido na madeira, a massa volumétrica e a presença de defeitos, [6], [10].

Tabela 3 – Compressão paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14].

<b>Espécies</b>	<b>Compressão paralela às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	51100
Álamo tremedor	29300
Álamo amarelo	38200
Vidoeiro amarelo	56300
Cerejeira preta	49000
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	24800
Cedro vermelho	31400
Abeto de Douglas	26700
Pinho vermelho	41900
<i>Hemlock</i>	49000
Larício	52500

#### 2.8.3.2 Compressão perpendicular às fibras

Representa a resistência a uma carga aplicada na direção perpendicular às fibras, pode ser também retratada pela sua resistência ao seu esmagamento. Os valores dessa propriedade são baixos quando comparados com a compressão paralela às fibras, devido a menores quantidades de fibras que se encontram nessa orientação, como é notado na Tabela 4 ( o teor de humidade é de 12% para os valores expostos) e também pelo fator das árvores não estarem sujeitas à esses esforços em seu crescimento, fazendo com que a sua formação esteja de acordo com as solicitações a que estão sujeitas, [10].

Tabela 4 - Compressão paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14].

<b>Espécies</b>	<b>Compressão perpendicular às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	8000
Álamo tremedor	5900
Álamo amarelo	3400
Vidoeiro amarelo	6700
Cerejeira preta	4800
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	2700
Cedro vermelho	3400
Abeto de Douglas	5100
Pinho vermelho	4100
<i>Hemlock</i>	3800
Larício	6400

### 2.8.3.3 Tração paralela às fibras

De acordo com a estrutura fibro-anatômica da madeira, a mesma apresenta números elevados de resistência à tração paralela nessa direção, razão pela qual essa solicitação acarreta em uma aproximação das fibras colaborando para uma maior aderência e coesão no elemento o que leva a aplicações de maiores carregamentos. Os valores de resistência à tração axial são geralmente três vezes superiores às cargas na compressão axial, [6], [1].

### 2.8.3.4 Tração perpendicular às fibras

Como a presença de fibras na direção transversal ao tronco é escassa, fato que torna baixa a resistência do elemento estrutural nesta direção, em consequência da falta de ligação entre as fibras longitudinais e a fragilidade das ligações intercelulares transversais. Há casos em que uma mesma espécie de madeira os valores de resistência à tração perpendicular às fibras são cinquenta vezes menores que à tração paralela, como é o caso do pinho bravo, [6].

### 2.8.3.5 Resistência à Flexão estática

A madeira possui uma elevada resistência a essa categoria de aplicação de carga, atingindo valores próximos aos obtidos na tração axial. Quando a madeira está sob carregamento de flexão, um lado do eixo neutro sofre tração paralela ao grão, enquanto o outro lado é forçado em compressão paralela, também produz cisalhamento entre os planos horizontais da madeira e compressão perpendicular ao grão nos suportes, Figura 20. Caso o limite de resistência à compressão seja ultrapassado na zona sujeita a um carregamento, ocorre uma pré-ruptura localizada, porém a peça se rompe na área onde está sendo tracionada, [1], [26].

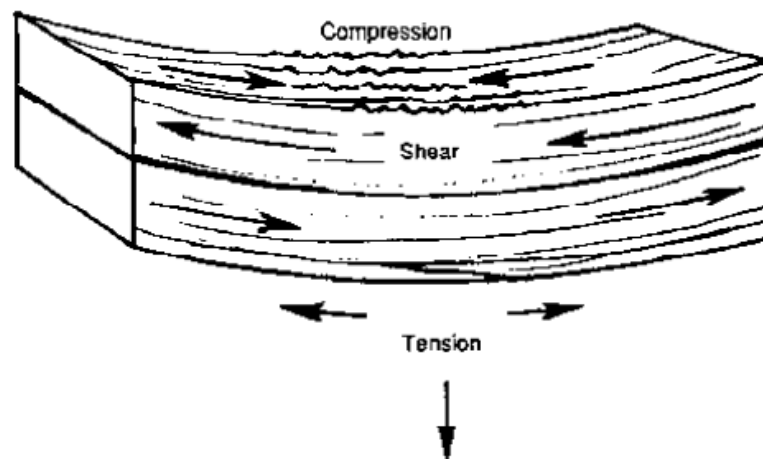


Figura 20- Flexão em um elemento de madeira, [26].

### 2.8.3.6 Resistência ao corte

Um elemento está sujeito ao corte quando o mesmo está sob a atuação de duas forças em sentido contrário, que visam separar a peça em duas partes. A resistência ao corte pode ser quantificada pela ação de três tipos de tensões: paralelas, normais e oblíquas às fibras. O caso mais comum de escorregamento que ocorre na prática é segundo a orientação paralela às fibras, sendo assim os ensaios para determinar tal característica são realizados nessa direção, a Tabela 5 são apresentados alguns valores de resistência ao corte segundo essa direção para determinadas espécies de madeira em um teor de humidade de 12% [1].

Tabela 5 – Resistência ao corte paralela às fibras de madeiras duras e macias, [14]

<b>Espécies</b>	<b>Resistência ao corte paralela às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	13200
Álamo tremedor	5900
Álamo amarelo	8200
Vidoeiro amarelo	13000
Cerejeira preta	11700
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	6900
Cedro vermelho	5600
Abeto de Douglas	10400
Pinho vermelho	8400
<i>Hemlock</i>	8600
Larício	9400

## 2.9 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

As propriedades físicas são as características quantitativas da madeira e seu comportamento a influências externas que não estejam ligadas à forças aplicadas. Tais particularidades serão discutidas ao longo deste tópico, como: teor de humidade, estabilidade dimensional, propriedades térmicas, densidade, condutividade elétrica, resistência química e durabilidade, [13].

### 2.9.1 TEOR DE HUMIDADE

Como a madeira é um material hidrocópico, a mesma troca humidade com o ar em função da temperatura ambiente, humidade relativa do ar e a quantidade de água contida na própria madeira. A mudança no teor de água alteram as propriedades não só físicas, mas também as mecânicas, podendo também haver alterações nas dimensões do material lenhoso quando as células absorvem ou dispersam água, ocasionando no inchaço ou retração do elemento. O tratamento dessa característica deve se levar em consideração os estados em que a água se encontra na madeira: água de constituição, água de impregnação e água livre, [11].

A água de constituição é aquela que faz parte da composição da madeira, a água de impregnação é a presente no interior das paredes celulares e no lúmen da célula, como apresentado na Figura 21, esta água é responsável por modificações nas propriedades físico-mecânicas do material. Tendo as paredes celulares saturadas a água começa a circular nas cavidades das células, esta é a denominada água livre, [10].

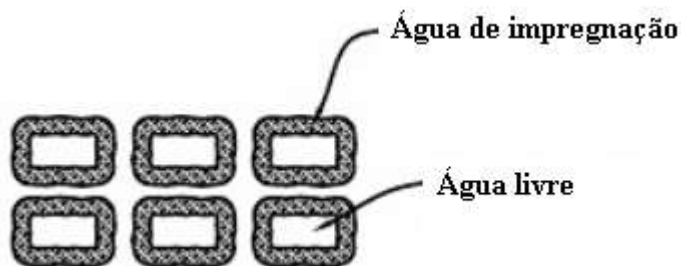


Figura 21 – Esquema da estrutura celular da madeira, [27].

### 2.9.2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

Devido a madeira sofrer alterações no seu teor de água isso acarreta modificações em sua dimensão, ocasionando fenômenos de retração e expansão, o conhecimento propriedade se torna importante para a sua correta utilização nos vários ramos de suas funcionalidades, [9].

A expansão nada mais é que o aumento no volume da peça em consequência da inclusão de partículas de água nos espaços formados entre as moléculas de celulose, que fazem com que as mesmas se distanciem levando à alterações nas dimensões da madeira. Assim também a retração se dá pela diminuição no volume do material em função da dispersão de água que se encontra nas zonas entre as moléculas de celulose, ocasionando na aproximação desses elementos, [28].

### 2.9.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Como a maioria dos materiais sólidos, a madeira também sofre dilatação quando exposta a condições de temperaturas mais elevadas e quando é arrefecida se contrai. O aumento por unidade de comprimento por grau de temperatura é definido pelo coeficiente de dilatação térmica linear  $\alpha_l$ , vale ressaltar que a madeira exibe maiores valores de  $\alpha_l$ , na direção perpendicular às fibras, [29].

Também apresenta uma boa condutividade térmica, devido à acomodação estrutural do tecido que retém pequenos volumes de ar em seu interior a madeira dificulta a propagação de ondas de calor e frio, [9], [30].

#### 2.9.4 DENSIDADE

A densidade constitui uma das propriedades físicas mais importantes, em virtude da influência que esta tem sobre as outras propriedades. Para um material higroscópico, como madeira, a densidade depende dos dois fatores a seguir: peso da substância básica e peso da humidade presente. De um modo geral madeiras mais pesadas apresentam maior resistência, maior dureza e elasticidade do que as leves, porém em contra partida exibe maiores variabilidade e mais fáceis de serem trabalhados. Tem-se o conhecimento de duas densidades, a aparente e a básica, [28]. A densidade aparente é estipulada em um dado teor de humidade padrão de referência de 12% de teor de água (H=12%), para cada classe de resistência, essa propriedade física está apresentada na

Tabela 6 – Densidade aparente de espécies de madeiras duras e macias, [14].

<b>Espécies</b>	<b>Densidade aparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	600
Álamo tremedor	380
Álamo amarelo	420
Vidoeiro amarelo	620
Cerejeira preta	500
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	320
Cedro vermelho	470
Abeto de Douglas	460
Pinho vermelho	460
<i>Hemlock</i>	450
Larício	520

Um dos modos mais práticos de indicar a densidade, vem a ser a básica que é a relação entre o peso absoluto seco da madeira, expressa em gramas ou quilogramas, por seu volume respectivamente em centímetros ou metros cúbicos, quando em estado de completa saturação de água, [9], [31], [32].

### 2.9.5 RESISTÊNCIA QUÍMICA

A madeira é muito resistente a diversos produtos químicos, o que lhe concede uma vantagem significativa sobre muitos materiais de construção alternativos, sendo muitas vezes considerada superior à esses materiais, como é o caso do aço e do concreto, em parte devido à sua resistência a ácidos suaves (pH superior a 2,0), soluções ácidas salinas e agentes corrosivos.

Geralmente, o ferro mantém-se melhor quando exposto em solução alcalina, em comparação com a madeira, porém existem muitos tratamentos que podem ser implementados a fim de aumentar significativamente o seu desempenho neste aspecto. O cerne é muito mais durável em comparação com o alburno ao ataque químico, motivo pelo qual o cerne é mais resistente à penetração de líquidos. Soluções químicas podem induzir dois tipos de ação, o inchaço reversível causado por um líquido, este processo pode ser resolvido realizando a remoção do líquido fazendo com que a madeira retorne à sua condição original e a degradação química líquida e irreversível, neste caso ocorre mudanças permanentes dentro da estrutura da madeira por oxidação, hidrólise, ou deslignificação, [13].

### 2.9.6 DURABILIDADE

Por ser um material orgânico a madeira está susceptível à ataques de organismos biológicos, porém para que ocorra uma deterioração por esses agentes, os mesmo necessitam de condições propícias de oxigênio, temperatura adequada e humidade, se o elemento é mantido seco (teor de humidade inferior a 20%), ele não se deteriorará com facilidade. A fim de evitar problemas com a deterioração, onde a humidade não pode ser controlada, pode-se utilizar espécies naturalmente duráveis ou madeira tratada. A durabilidade natural para os mecanismos e processos de deterioração está relacionada com as características anatômicas e com cada espécie.

Normalmente, o alburno não confere muita resistência à deterioração e falha rapidamente em condições adversas, no caso do cerne a durabilidade natural depende do gênero,

o cedro vermelho ocidental e o pau-brasil são exemplos de árvores que produzem cernes duráveis, no entanto pode haver variação das propriedades dentro de uma mesma espécie, [\[13\]](#).

## **Capítulo 3: Desenvolvimento experimental**

---

### **3.1 INTRODUÇÃO**

O presente capítulo descreve o trabalho experimental executado de acordo com normas e procedimentos já estabelecidos pelas mesmas, afim de caracterizar as propriedades da espécie de abeto de Douglas, Figura 22, fornecido pela empresa IS-madeiras. Os experimentos consistiram em ensaios destrutivos de provetes de madeira solicitados sob esforços de compressão e flexão afim de se obter as propriedades mecânicas do material e ensaios não destrutivos para determinar as propriedades físicas como as densidades aparente e básica e o teor de humidade.



Figura 22 – Madeira disponibilizada pela empresa.

Todos os critérios e aspectos propensos que pudessem influenciar as características e comportamento da madeira foram levados em consideração, tendo em conta tanto os fatores naturais da própria espécie, quanto fatores técnicos envolvendo a execução dos ensaios e preparação dos corpos de prova.

O desenvolvimento experimental foi dividido em fases de acondicionamento dos corpos de provas realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), ensaios destrutivos

efetuados no Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais (LERM) e ensaios não destrutivos feitos no Laboratório de Processos Químicos (LPQ).

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 3.2.1 CONDICIONAMENTO DOS PROVETES DE FLEXÃO À ESCALA REDUZIDAS E A COMPRESSÃO

A metodologia experimental foi realizada com base na *EN 408*, [33] onde a mesma menciona que as amostras devem ser primeiramente condicionadas em ambiente padrão de  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e  $(65 \pm 5) \%$  de humidade relativa. Os ensaios só foram realizados quando os corpos de prova atingiram massa constante, isso é quando os resultados de duas pesagens consecutivas realizadas em um intervalo de 6 horas, não variaram mais de 0,1% da massa dos provetes.

Para cumprimento desses requisitos, as amostras foram inseridas em uma estufa elétrica onde era possível apenas controlar a temperatura. Afim de se ter a humidade relativa como exigida pela norma foi colocado no interior da estufa juntamente com os corpos de prova, recipientes com água e com o auxílio de um registrador de temperatura e humidade, Figura 23, fez-se leituras das mesmas no ambiente interno, ressalta-se que as quantidades de recipientes com água que foram colocados variaram até que se obtivesse a faixa de humidade almejada.



Figura 23 – Registrador de temperatura e humidade (modelo: EL-USB-2-LCD+), [34].

As leituras feita pelo dispositivo foram descarregadas em um computador e através do *software EasyLog USB* disponibilizado no site do fabricante [34], foi possível gerar um gráfico como o demonstrado na Figura 24, contendo os dados registrados pelo equipamento.

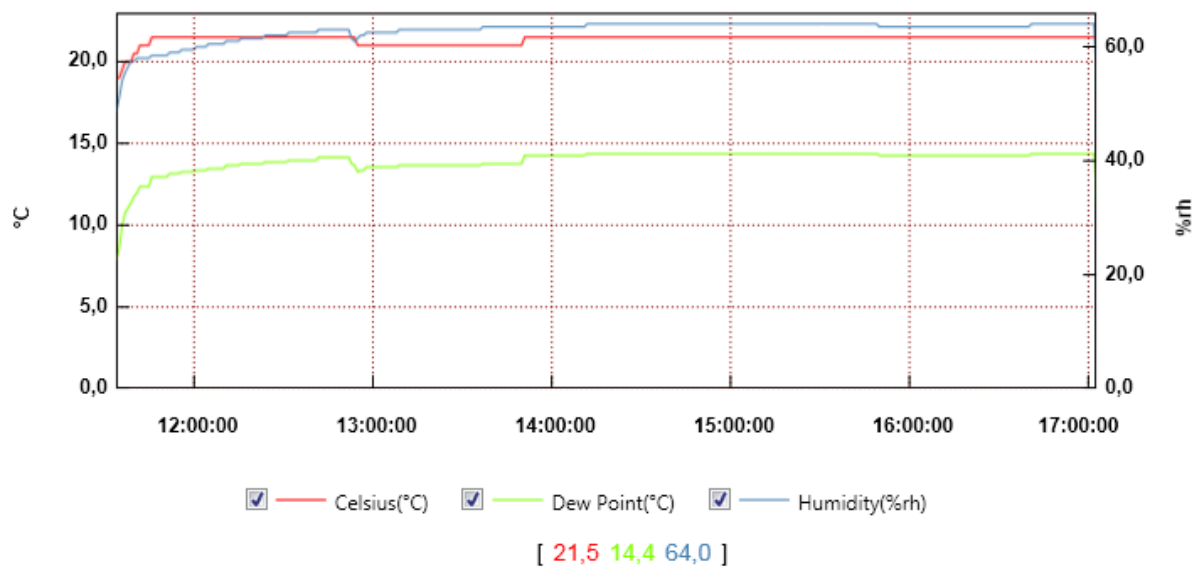


Figura 24 - Temperatura, ponto de orvalho e umidade relativa no interior da estufa.

É notório que as médias de temperatura e umidade que foram encontradas dentro da estufa variaram em torno de 21,5° C e 64% respectivamente, dados que estão dentro do padrão exigidos pela norma.

### 3.2.1.1 Preparação das amostras de flexão à escala reduzida

Para os provetes de flexão, a *EN 408* [33], menciona que o comprimento total deve ser 19 vezes o  $h$ , tanto para determinar o módulo de elasticidade quanto para a resistência à flexão, Figura 25, os barretes que foram utilizados para os ensaios possuíam um perfil retangular de 70x65 mm em média, o  $h$  empregue foi 70 mm logo as amostras tinham como comprimento total 1330 mm para assim satisfazer a norma.

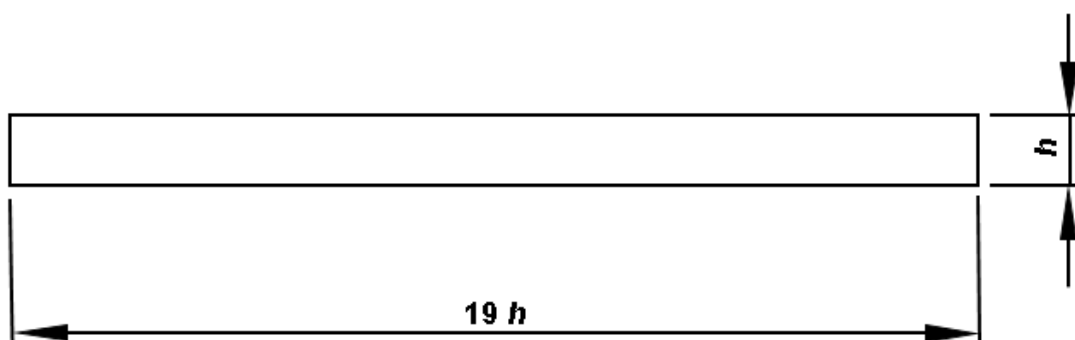


Figura 25 – Esquema da dimensão total das amostras.  
Fonte: Autoria própria

A norma não reporta a quantidade de corpos de prova que devem ser utilizados para se fazer a caracterização das propriedades mecânicas, no entanto em consulta com alguns trabalhos já realizados no mesmo âmbito que também usaram a referida norma como base para efetuar os ensaios tais como, [1], [35] e [36] foi constatado que a maioria deles utilizaram pelo menos 20 amostras na realização dos testes.

A madeira disponibilizada pela empresa se encontrava com uma grande quantidade de defeitos, como por exemplo, descaio, nós, porosidade, fendas e bolsas de resina sendo assim foi necessário realizar uma seleção das peças que apresentavam melhores condições para efetuar os ensaios, logo foram obtidos um total de 21 corpos de prova para os testes de flexão, no qual foram todos identificadas com as siglas PD-F (onde as duas primeiras letras são referentes à espécie, no caso Pinho Douglas e a segunda letra é inerente ao ensaio de Flexão para as amostras de escalas reduzidas) e introduzidos na estufa até que se atingissem massa constante conforme exigido pela norma, as pesagens foram feitas na balança mostrada na Figura 26. O tempo de estabilização de todas as amostras girou em torno de 15 dias.



Figura 26 – Balança utilizada para pesagem das amostras.

### 3.2.1.2 Preparação das amostras de compressão paralela as fibras

A EN 408 [33], exige que os corpos de prova devam ter seção transversal completa e um comprimento de seis vezes a menor dimensão da mesma. As superfícies das extremidades foram preparadas com precisão para garantir que fossem planas e paralelas entre si e

perpendiculares ao eixo do provete, para cumprir esses requisitos foi utilizado a serra de bancada, Figura 27, para garantir que as faces das amostras fossem planas e paralelas entre si.



Figura 27 – Serra de bancada.

Dois conjuntos de amostras foram selecionados variando o comprimento e espessura como apresentado na Figura 28 (a) e (b). Após essa etapa todas as amostras foram etiquetadas, inseridas na estufa e realizada pesagens seguindo os critérios da *EN 408* [33], até que se atingissem massa constante, a aferição das medidas foram realizada na balança da Figura 26.

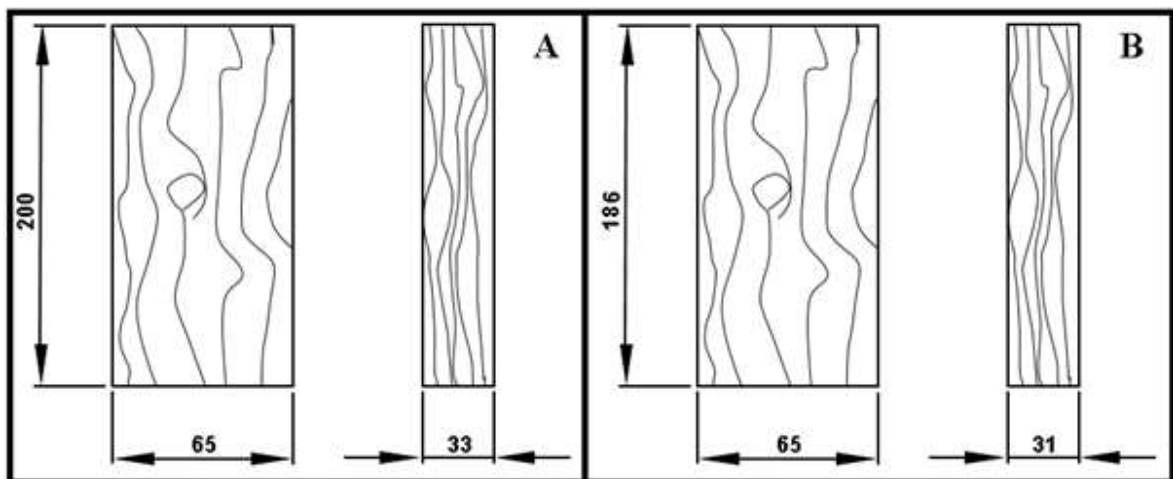


Figura 28 – Dimensões das amostras de compressão (mm).

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS DE DENSIDADE E TEOR HUMIDADE

Os provetes utilizados para determinação da densidade e teor de humidade foram condicionados com base na *ISO 3129* [37], onde a mesma cita que as amostras devem ser

mantidas também em ambiente padrão de  $(20 \pm 2)$  °C e  $(65 \pm 5)$  % de umidade relativa até que a madeira mantenha um peso constante. Sendo assim os corpos de prova foram armazenados na mesma estufa usada para estabilizar as amostras de flexão e compressão, verificou-se ainda que a *ISO 3129* não menciona um método para que se considere um peso constante, porém para o caso em estudo utilizou-se como exemplo o procedimento da norma *EN 408* [33], de duas pesagens consecutivas num intervalo de 6 horas até que sua massa não tivesse variação maior que 0,1%.

#### 3.2.2.1 Preparação das amostras de densidade e teor umidade

Os provetes devem ser sãos e isentos de nós, bolsas de resina ou qualquer outro defeito e possuir de preferência uma forma prismática com 20 mm com os três eixos segundo as direções longitudinal, radial e tangencial, podendo variar sua dimensão ao longo do grão até 60 mm, [38], [39].

Foram obtidas 40 amostras livres de qualquer defeito e todas em forma prismática de 20 mm, os provetes foram confeccionadas por empresa especializada em cortes de madeira devido às proporções muito reduzidas de tamanho como exigido pela norma. Convém mencionar que a quantidade de amostras foram estabelecidas de acordo com alguns trabalhos acadêmicos e artigos científicos realizados no mesmo âmbito, posteriormente os provetes foram armazenados em estufa com temperatura e umidade relativa controladas até que atingissem peso, o procedimento de pesagem foi realizado em uma balança analítica KERN ACS 220 – 4, [40], [41], [42].

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE FLEXÃO À ESCALA REDUZIDA

Para a execução dos testes à flexão seguiu-se como base os critérios impostos pela *EN 408* especificamente nos itens 10 e 13, onde se utiliza o mesmo esquema de ensaio para a determinação da resistência à flexão e o módulo de elasticidade.

A Figura 29 apresenta um layout genérico para os ensaios, onde os corpos de prova devem ser simetricamente carregado em um vão com  $18 \times h$ , em que os dois pontos de aplicação de carga devem ser espaçados entre si com  $6 \times h$ , o deslocamento é medido na parte central. Se o provete e equipamentos não permitem que essas condições sejam alcançadas a distância entre os pontos de aplicação da carga e os suportes podem ser alterados por uma defasagem não superior a 1,5 vezes a profundidade da peça ( $4,5h$ ), e o vão e o comprimento do provete podem

ser alterados por um valor não superior a três vezes a profundidade da peça ( $15h$ ), mantendo a simetria do teste, [33].

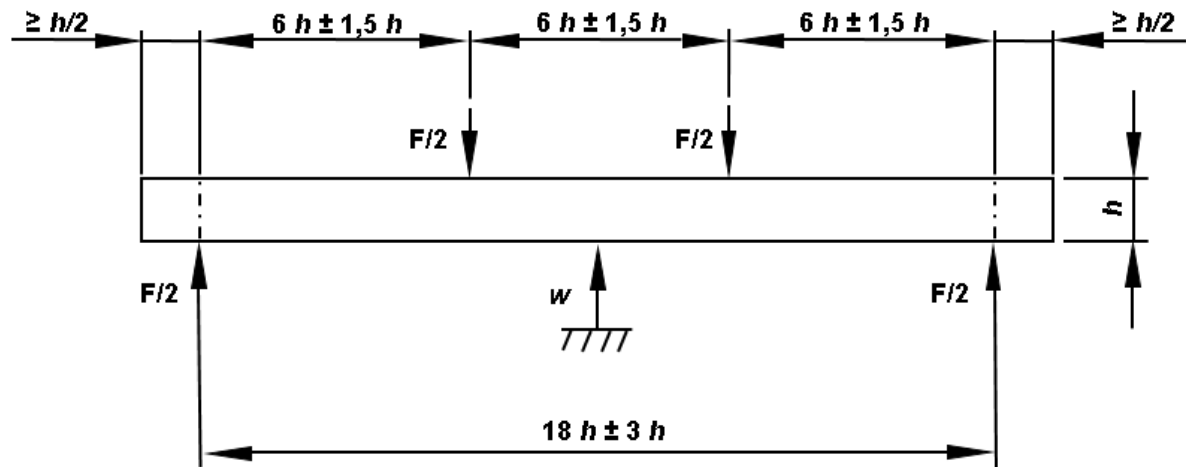


Figura 29 - Esquema para ensaio de flexão à escala reduzida, [33].

Para se obter o módulo de elasticidade global seguindo recomendações da norma [33] a carga deve ser aplicada a uma taxa constante e o movimento da transmissão da força não deve ser maior que  $0,003 \times h$  mm/s, no caso em estudo como  $h=70$  mm, logo a velocidade não poderia exceder os 0,21 mm/s. O equipamento de carga utilizado deve poder medir a carga com uma precisão de 1% da aplicada ao provete ou, para cargas inferiores a 10% da carga máxima aplicada, com uma precisão de 0,1% da carga máxima aplicada. As deformações devem ser determinadas com precisão de 1% ou, para deformações inferiores a 2 mm, com precisão de 0,02 mm.

A determinação da resistência à flexão à carga máxima ( $F_{máx}$ ) suportada pelo corpo de prova deve ser alcançada dentro de um intervalo de  $(300 \pm 120)$  s. Recomenda-se restrição lateral conforme necessário para evitar a flambagem. É necessário que esta restrição permita que ocorra deflexão do corpo de prova sem um atrito significativo. O equipamento de carregamento usado deve ser capaz de medir a carga com uma precisão de 1% da carga aplicada ao provete.

### 3.3.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Seguindo tais recomendações os testes foram realizados na máquina de ensaios INSTRON 4485, Figura 30, constituída por uma célula de carga com capacidade de 200 KN.



Figura 30 – Máquina de ensaio Instron 4485.

As dimensões da montagem do setup estão dispostas na Figura 31, para o caso em estudo. O deslocamento foi medido a meio vão como recomendado pela norma, onde foi utilizado um LVDT, (*Linear Variable Differential Transformer*) um transdutor para medição de deslocamento linear.

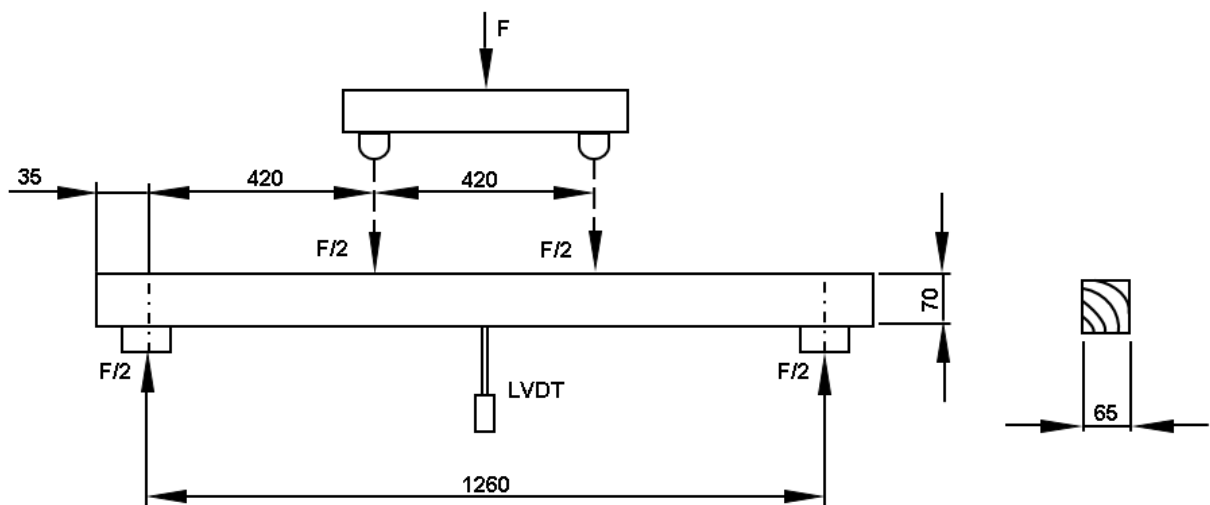


Figura 31 – Dimensões dos provetes de escala reduzida sujeitos à flexão (mm).  
Fonte: Autoria própria.

Após a etapa de preparação e montagem do setup iniciou-se os testes preliminares para a obtenção da taxa de aplicação de carga (não superior à 0,21 mm/s para o caso) e o tempo para alcançar a  $F_{máx}$  (afim de se obter também a tensão de resistência no mesmo ensaio) como exigido pela *EN 408*, que menciona que tal parâmetro deve ser obtido a partir de pelo menos 10 provetes de tamanhos apropriados ou com base em dados existentes.

Como já referido anteriormente com o estado e a quantidade das peças fornecidas pela IS-madeiras não foi possível a realização de 10 testes preliminares, porém com informações

presentes na ficha técnica disponibilizada pela empresa como a tensão resistente a flexão e compressão, pôde-se determinar o  $F_{máx}$  e o tempo até atingir a carga máxima com a aplicação de carga não ultrapassasse o limite estipulado, logo reduziu-se assim para 4 o número de ensaios preliminares e com a execução dos mesmos como apresentado na Figura 32, constatou-se que com uma aplicação de carga de 2 KN/s a velocidade da célula de atingiu uma média de 0,15 mm/s e o  $F_{máx}$  era atingido em um intervalo de tempo de 250 segundos em média.



Figura 32 – Realização dos testes.

Após essa etapa inicial deu-se início a realização dos testes de onde se pretendeu obter as propriedades desejadas.

### 3.3.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Expressão empregue para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_{m,g}$ ):

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^4 \right] \quad (1)$$

onde,

$F_2-F_1$  é um incremento de carga na parte reta da curva de deformação da carga, em newtons (Figura 33);

$w_1-w_2$  é o incremento do deslocamento correspondente a  $F_2-F_1$ , em milímetros (Figura 33).

Os demais parâmetros estão dispostos na lista de símbolos.

Destaca-se que os fatores  $b$  e  $h$  foram obtidos a partir de uma média de três medições realizadas em três regiões diferentes de cada amostra como é sugerido pela *EN 408* caso o provete apresente dimensões variadas ao longo de sua estrutura, as medições foram efetuadas por meio de um paquímetro universal com precisão de 0,05 mm.

Para a análise dos dados e obtenção do  $E_{m,g}$  utilizou-se a seção do gráfico entre  $0,1 F_{máx}$  e  $0,4 F_{máx}$ , critério imposto pela norma vigente.

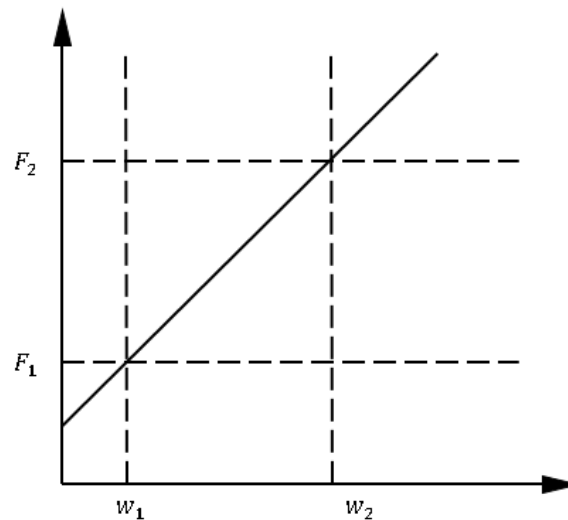


Figura 33 - Gráfico de carga-deformação dentro da faixa de deformação elástica, [33].

Os valores de deslocamento foram registrados pelo LDVT ligado a um sistema de aquisição de dados diferente do usado para o registo dos valores de força. Para a construção do gráfico Força  $\times$  Deslocamento, foi necessário a realização de uma interpolação através de um código gerado no *software* Matlab utilizando o tempo (dado em comum entre o LDVT e a máquina de ensaio).

### 3.3.3 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O cálculo da tensão de resistência ( $f_m$ ) possuiu uma maior facilidade quando comparado com o  $E_{m,g}$ , uma vez que os parâmetros são obtidos sem muita complexidade.

Expressão utilizada para determinar a  $f_m$ , [33]:

$$f_m = \frac{aF_{máx}}{(2W)} \quad (2)$$

onde,

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (3)$$

$W$  é o módulo de seção em milímetros cúbicos, dado pela equação (3).

Os demais fatores estão descritos na lista de símbolo.

### 3.4 PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Após os procedimentos de obtenção e condicionamento das amostras como descrito no item 3.2.1 e 3.2.1.2, foi iniciado a fase de montagem e preparação do layout do aparato experimental para realização dos ensaios. A *EN 408* [33], exige que os corpos de prova devem ser carregados concentricamente por dispositivos que permitam a aplicação de uma carga compressiva sem induzir flexão e o equipamento usado deve medir a carga com uma precisão de 1% da força aplicada ao provete, ainda para se obter o módulo de elasticidade é necessário que o carregamento seja feito de maneira constante e que a taxa de movimento da carga não seja superior a  $0,00005 \times l$  mm/s.

Como haviam dois conjuntos de amostras com dois comprimentos distintos como apresentado na Figura 28, para satisfazer o limite de taxa de aplicação da carga de tal parâmetro, o mesmo foi mensurado considerando o conjunto de provetes com o menor comprimento, pois levando em conta sua dimensão a velocidade de carregamento não poderia exceder os 0,0093 mm/s logo respeitando esse fator consequentemente respeitaria a limitação da taxa de aplicação de carga referente ao provete de 200 mm de comprimento que seria de 0,01 mm/s.

As deformações devem ser medidas dentro de um comprimento central de 4 vezes a menor dimensão da seção transversal do provete através de dois extensômetros afim de minimizar os efeitos de distorção.

A resistência à compressão foi determinada tendo em conta o critério de que a carga máxima fosse atingida em num intervalo de  $(300 \pm 120)$  s, de acordo com a *EN 408* [33], considerando também os demais fatores já mencionados.

#### 3.4.1 EXECUÇÃO DOS ENSAIO

Para satisfazer tais condições foi utilizado novamente a máquina INSTRONS 4485, onde na Figura 34 é apresentado o esquema de ensaio disposto no equipamento, no qual a aplicação da força é realizada pela parte superior do aparato mecânico.



Figura 34 - Layout dos ensaios de compressão axial.

Foram realizados 10 testes preliminares com a finalidade de se determinar a velocidade de transmissão de força bem como o tempo para atingir a carga máxima, assim com a execução desses testes definindo uma taxa de 13 KN/s. A velocidade de movimento da célula de carga foi em torno de 0,0081 mm/s e o tempo médio até se alcançar a força máxima foi de 260 s, fatores que estão dentro dos limites impostos pela norma.

Tendo conhecimento desses parâmetros foi dado prosseguimento aos experimentos, as aferições de força foram registrados pelo sistema de aquisição do equipamento. A medição da deformação na região central da amostra foi realizada utilizando dois métodos: o primeiro de Correlação Digital de Imagem (CDI), por ser uma técnica sem contato, possui grande flexibilidade e de fácil integração com a máquina de ensaios mecânicos e ainda é uma técnica adequada às dimensões da região de interesse neste trabalho, onde foi realizado 10 ensaios de cada conjunto de provetes com as dimensões apresentadas na Figura 28, os provetes foram denominados de PD-CI-186 e PD-CI-200, onde as duas primeiras letras são referentes à Pinho Douglas, CI relativo ao método de Correlação de Cimagem e 186 e 200 são relacionados aos seus respectivos comprimentos. O segundo método de medição da deformação foi efetuado através de um extensômetro eletromecânico, neste caso foi utilizado 10 amostras de dimensões exibidas na Figura 28 (b) designadas de PD-EM-200, no qual PD é inerente à Pinho Douglas, EM ao método da utilização do Extensômetro Mecânico e 200 é pertinente ao comprimento do provete.

### 3.4.1.1 Técnica de correlação digital de imagem

Este método implica na análise por comparação de imagens subsequentes obtidas antes e depois da deformação no objeto em estudo através de um algoritmo de correlação. A imagem inicial é dividida em várias secções designadas de blocos ou *subsets* e esses blocos são buscados na imagem seguinte. Cada *subset* é um grupo de pixels e o objetivo do algoritmo é determinar a sua nova posição, analisando os valores de intensidades desses pixels. O movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, Figura 35, é mensurado pelo algoritmo dentro de uma área denominada região de interesse, obtendo assim os deslocamentos e através destes calcula-se posteriormente as deformações, [43].

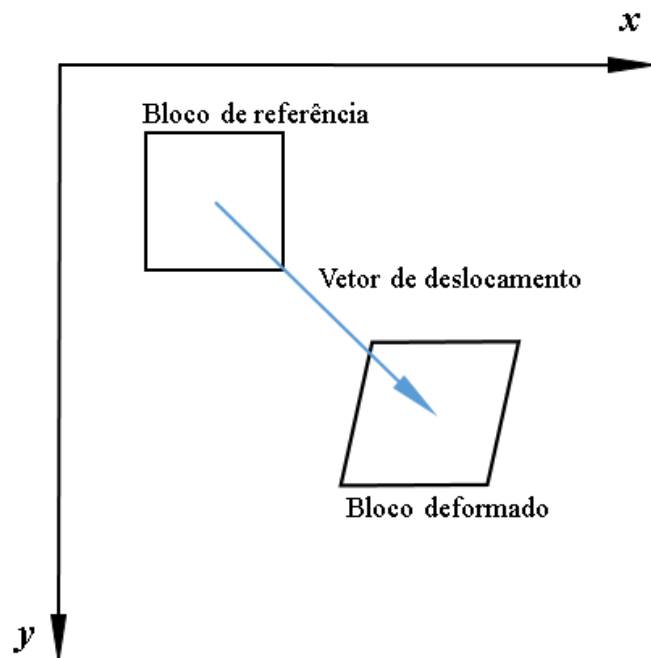


Figura 35 – Variação do estado de referência para o estado deformado, [43] .

Para que não haja mais de uma correlação de um bloco para outro, a superfície do objeto que será analisada é preparada ao empregar sobre ela um padrão o mais aleatório possível. A Figura 36 aponta três exemplos de padrões, que podem ser simplesmente aplicados com tinta na superfície do material, [43].

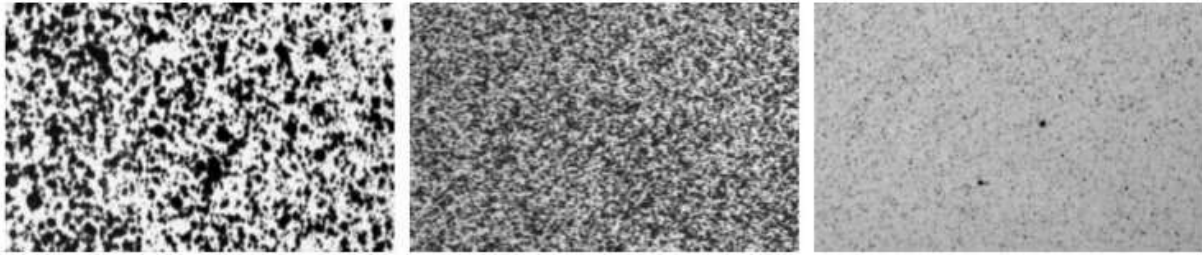


Figura 36 – Modelos de padrões, [43].

A aquisição de imagem pode ser realizada através de uma câmera digital que possua uma boa resolução de captura, também é recomendado que se utilize iluminação na amostra durante a aquisição para obter uma melhor exatidão.

#### 3.4.1.2 Procedimento experimental por meio da CDI

A análise de CDI foi feita através do *software* GOM Correlate versão 2018 *Hotfix* 6 e para a aquisição das imagens utilizou-se uma câmera *Nikon Coolpix* com resolução de 16 *Megapixels*. Primeiramente foi realizada a preparação dos provetes criando sobre as superfícies os padrões aleatórios usando sprays de tinta branco e preto, foram analisados dois modelos de padrões, o primeiro com um fundo branco aspergindo sobre o mesmo tinta preta e o segundo foi aplicado tinta branco sobre um fundo preto.

Os dois padrões foram analisados no GOM onde existe a possibilidade de averiguar a qualidade da imagem e verificou-se que o segundo padrão se apresentou melhor, logo adotou-se o mesmo como sendo o método mais adequado para a realização dos ensaios.

Inicialmente a superfície de análise dos corpos de prova foram polidos com uma lixa de madeira grão 320, afim de se ter uma região mais limpa e lisa, em seguida com um spray foi aplicado sobre a superfície de interesse um fundo preto obtendo-se uma base totalmente opaca e por fim com spray foi pulverizado uma tinta branca aleatoriamente sobre a base ressaltando que para cada amostra havia um padrão totalmente distinto dos demais.

Após esse procedimento os provetes foram posicionados na máquina de ensaios e frente a eles foi posto a câmera como exibido na Figura 37, de forma a captar as imagens de deformação dos provetes durante a execução dos testes, também foi utilizado uma iluminação para melhoria da resolução e posteriormente uma maior precisão nos resultados.

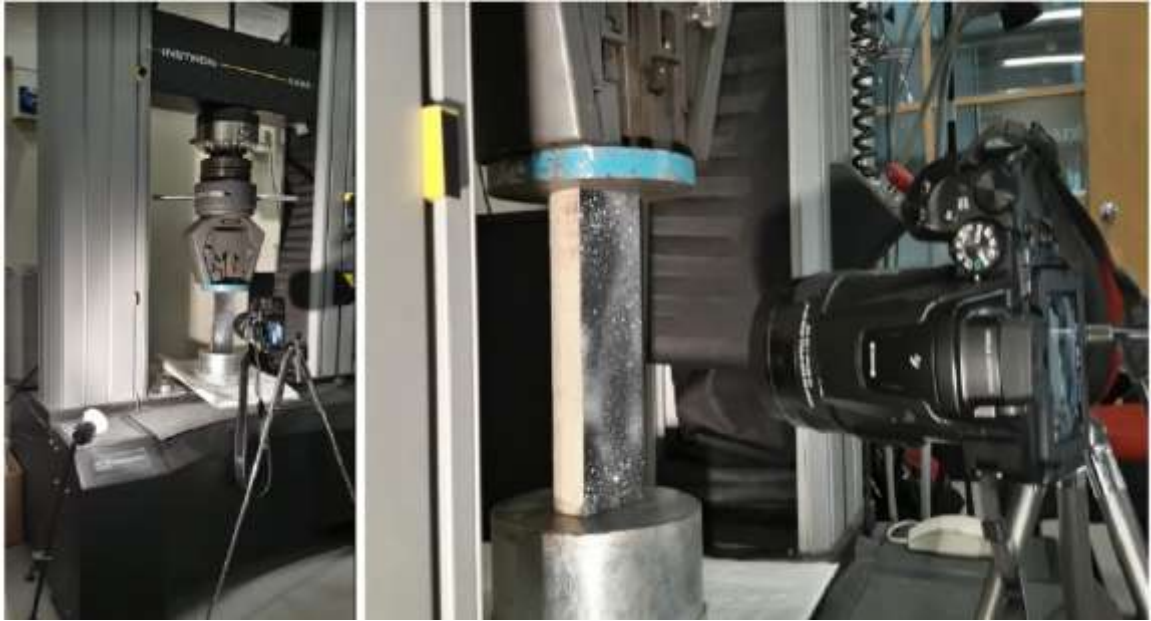


Figura 37 – Ensaio de compressão utilizando CDI.

Os provetes foram ensaiados para além da sua carga máxima, a Figura 38 mostra um dos conjuntos de provetes após a execução dos testes. As medições de força foram registradas pelo sistema de aquisição da máquina de ensaio e as imagens captadas pela câmera foram descarregadas em um computador e seguidamente tratadas no *software* GOM.



Figura 38 – Amostras sujeitas à compressão.

Convém mencionar que o *software* GOM possibilita processar tanto imagens quanto vídeos, porém este último torna o tratamento de dados muito longo devido à grande quantidade

de informações que o mesmo possui, por conta de tal fato optou-se por utilizar imagens sequenciais dos ensaios, no entanto a câmera não possuía configurações para que fosse tiradas fotos consecutivas espaçadas entre si por um mesmo intervalo de tempo. Sendo assim realizou-se a filmagem do ensaios e após esse procedimento através de um código feito no *software* Matlab capaz de capturar os *frames* do vídeo, esses *frames* nada mais são do que cada imagem fixa de um produto audiovisual. Levando em conta que a máquina fotográfica registrava 25 frames por segundo e que os experimentos se tratavam de ensaios quase estáticos optou-se por utilizar um *frame* a cada segundo para serem processados no GOM.

#### 3.4.1.3 Tratamento das imagens e obtenção dos deslocamentos

O primeiro procedimento realizado foi definir a escala, inserindo uma medida de referência ao programa para que este faça a correlação entre pixels e milímetros, para o caso foi padronizado para todos os ensaios a largura (65 mm) do provete como sendo essa medida de referência, em seguida foi selecionado a área de interesse denominado de componente de superfície 1 e posicionou-se dois extensômetros de 60 mm na parte central da amostra, como observado na Figura 39 afim de se ter o deslocamento na região central como exigido pela norma.

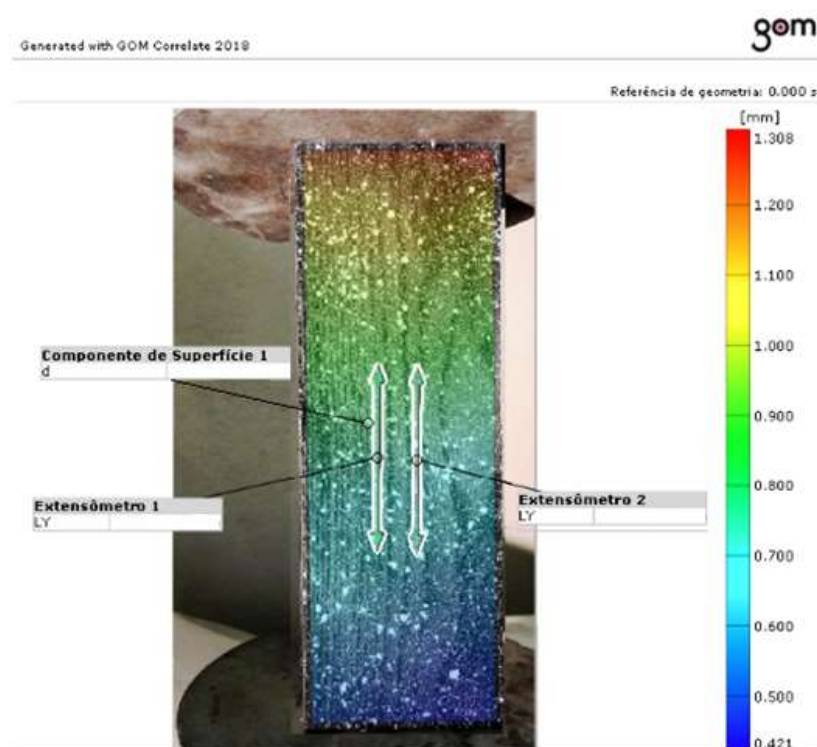


Figura 39 - Processamento de imagens e obtenção dos deslocamentos.

#### 3.4.1.4 Procedimento experimental por meio do extensômetro eletromecânico

O equipamento utilizado foi um extensômetro *INSTRON* modelo 2630-100, onde o mesmo é atrelado ao sistema de aquisição da máquina de ensaio. Foi elaborado um mecanismo capaz de medir o deslocamento na região central, esse que foi afixado no provete com parafusos de pequenas dimensões para que não houvesse interferência na resistência do material causada pela perfuração no mesmo, a colocação desse mecanismo tomava certo tempo pois era necessário garantir o nivelamento e paralelismo na parte onde se prendia o extensômetro. Vale destacar que foi considerado um comprimento 132 mm como sendo o comprimento do extensômetro para aferição dos deslocamentos. Posteriormente os provetes foram posicionados na máquina juntamente com o dispositivo já fixado, como mostrado na Figura 40, os corpos de prova foram ensaiados para além de sua carga máxima e todos os dados foram registrados diretamente pelo sistema do equipamento experimental. Destaca-se que foram utilizados os mesmos procedimentos de ensaios empregues no método de correlação de imagem, referente à taxa de aplicação de carga e ao intervalo de tempo para alcance da carga máxima, assim como especificado pela norma EN 408, [33].



Figura 40 – Amostras ensaiadas com o extensômetro eletromecânico.

#### 3.4.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO PARALELA AO GRÃO

O módulo de elasticidade na compressão foi obtido através da equação:

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (4)$$

onde,

$F_2 - F_1$  é um incremento de carga na parte reta da curva de deformação da carga, em newtons (Figura 33);

$w_1 - w_2$  é o incremento do deslocamento correspondente a  $F_2 - F_1$ , em milímetros (Figura 33).

$l_1$  é o comprimento do dispositivo empregue para medir o deslocamento, em milímetros.

$A$  é a área da seção transversal do provete em milímetros quadrados, onde os parâmetros para o cálculo desse fator foi obtido através da média de três de medições das dimensões da seção transversal em três regiões diferentes ao longo do provete, realizadas com um paquímetro universal com precisão de 0,05 mm.

Para a construção do gráfico ilustrativo representado na Figura 33, foi realizado o mesmo procedimento de interpolação através do *software* Matlab já descrito no anteriormente item 3.3.2 deste capítulo, onde o deslocamento utilizado foi uma média das leituras realizadas pelos dois extensômetros da CDI e os dados de força computados pela máquina de ensaio.

### 3.4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para realizado do cálculo da resistência à compressão paralela ao grão utilizou-se a equação (5):

$$f_{c,0} = \frac{F_{máx}}{A} \quad (5)$$

onde,

$F_{máx}$  é a carga máxima suportada pelo corpo de prova em Newtons;

$A$  é a área da seção transversal do provete em milímetros quadrados.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente de Poisson foi mensurado utilizando CDI a partir das deformações longitudinais e tangenciais dos profetes de compressão axial de 200 mm de comprimento, conjunto que possuía tais direções ao longo de sua constituição como é observado à direita da Figura 41, assim o coeficiente de Poisson determinado foi o  $\nu_{LT}$ , ou seja, a razão entre a deformação ao longo do eixo tangencial causada por uma tensão ao longo da direção longitudinal.

Destaca-se que não foram executados mais testes, somente se utilizou os mesmos registros de dados de força e imagens empregues na determinação do  $E_{c,0}$  a partir dos ensaios realizados com os corpos de prova referidos acima. Como nenhuma das normas mencionadas anteriormente citam algum procedimento de realização de ensaios para determinar o coeficiente de Poisson foi adotado alguns métodos da *EN 408* para determinar esse parâmetro.

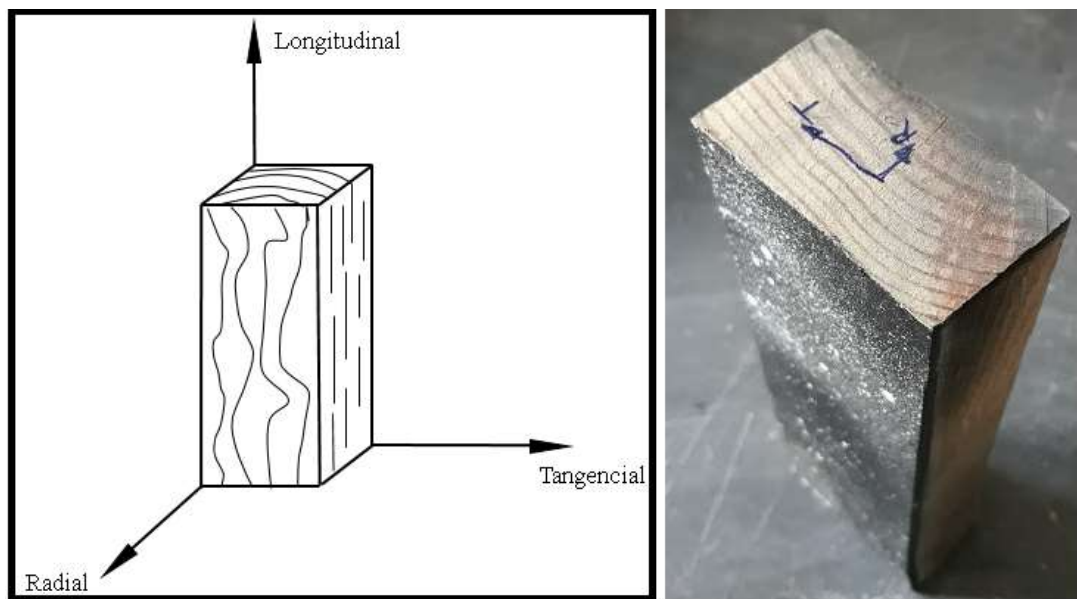


Figura 41 – Direção das fibras dos provetes.

Foram posicionados dois extensômetros em cada direção dos provetes, Figura 42, para se obter as deformações na região central de 4 vezes a menor dimensão da seção transversal do corpo de prova.

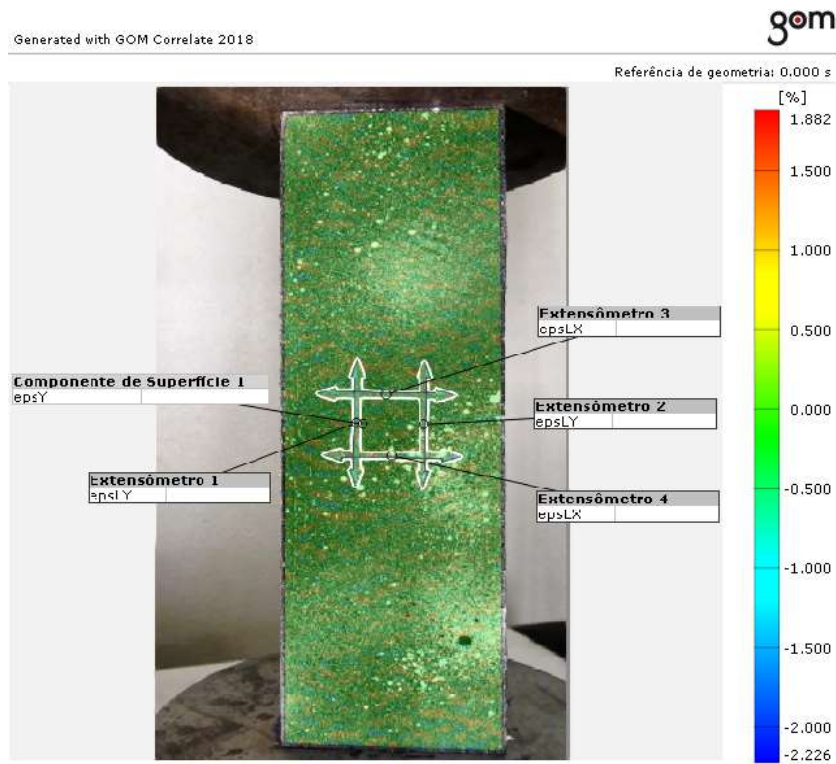


Figura 42 – Posicionamento dos extensômetros.

Expressão para o cálculo do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ):

$$\nu_{LT} = - \frac{\mathcal{E}_T}{\mathcal{E}_L} \quad (6)$$

onde,

$\mathcal{E}_L$  é a média das deformações medidas pelos dois extensômetros posicionados ao longo do eixo longitudinal

$\mathcal{E}_T$  é a média das deformações medidas pelos dois extensômetros posicionados ao longo do eixo tangencial em (%)

Ressalta-se que fins práticos as deformações utilizadas para o cálculo foram as que estavam dentro do intervalo de força de 10% à 40% da carga máxima, afim de se obter o coeficiente de Poisson na mesma região elástica que o  $E_{c,0}$  e também para evitar os ruídos e distorções feitos pelo *software* GOM principalmente nos regimes próximo e após a fratura do material.

### 3.6 PROCEDIMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE E TEOR DE HUMIDADE

Os métodos experimentais foram efetuados de acordo com a *ISO 13061* parte 1 [38] e parte 2 [39], referentes o teor de humidade e densidade respectivamente, esta última propriedade se dividiu em básica e aparente.

#### 3.6.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE E BÁSICA

##### 3.6.1.1 Densidade aparente

Como já referenciado a densidade aparente é determinada em uma humidade de referência de 12% de teor água, este que é alcançado quando a madeira está inserida no ambiente padrão de  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e  $(65 \pm 5) \%$  de humidade relativa. Após o armazenamento das amostras em tal meio durante aproximadamente 6 semanas (tempo em que atingiram peso constante, ou seja a variação da sua massa não foi superior a 0,1%), fez-se a medição de todas as direções axial, radial e tangencial, com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm, Figura 43.



Figura 43 – Medição das amostras.

A densidade aparente foi calculada de acordo com a equação da *ISO 13061-2*:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \times b_w \times l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (7)$$

onde,

$w$  é referente ao teor de água de 12%;

$m_w$  é o peso da amostra em quilogramas;

$a_w$ ,  $b_w$  e  $l_w$  são as dimensões da amostra em metros e  $V_w$  é o volume em metros cúbicos.

Destaca-se que o peso da amostra utilizado para o cálculo da densidade é referente ao valor da última pesagem registrada, sendo este considerado como sendo o peso constante, já que foram realizadas várias aferições desse parâmetro num intervalo de 6 horas entre as pesagens.

### 3.6.1.2 Densidade Básica

A densidade básica definida como sendo a massa específica convencional é obtida através da relação entre o peso seco em estufa (*oven-dry*) e o volume saturado, onde se utilizou os mesmo provetes usados para determinar a densidade aparente. Para se obter o volume saturado os corpos de prova foram imersos em água, Figura 44, em ambiente climatizado até alcançarem peso constante (até que suas fibras ficassem completamente saturadas), fato verificado através de pesagens consecutivas em um período de 6 horas até que a variação da sua massa fosse menor ou igual à 0,1%, processo que levou em torno 4 dias para se alcançar os valores desejáveis, após essa etapa fez-se a aferição de todas as dimensões dos provetes.



Figura 44 – Amostras imersos em água.

A obtenção da massa completamente seca pelo processo de *oven-dry* realizado de acordo com *ISO 13061-1* [38], colocando as amostras em estufa, Figura 45, a uma temperatura de  $103 \pm 2$  ° C até que se atingissem massa constante.



Figura 45 – Estufa utilizada na secagem da madeira.

Considerou-se massa constante quando a perda entre duas pesagem sucessivas, realizadas num intervalo de 6 horas, foram iguais ou inferiores a 0,5% da massa da amostra a secagem dos provetes durou cerca de 48 horas. A medição da massa foi realizada após o arrefecimento das amostras até a temperatura ambiente em um dessecador com sílica mostrado na Figura 46, os provetes foram pesados rapidamente o suficiente afim de evitar um aumento no teor de humidade de mais de 0,1%, [38].



Figura 46 – Dessecador e balança utilizada para a pesagem.

Expressão para determinar a densidade básica:

$$\rho_w = \frac{m_0}{a_{sat} \times b_{sat} \times l_{sat}} = \frac{m_0}{V_{sat}} \quad (8)$$

onde,

$m_0$  é o peso da amostra seca em quilogramas;

$a_{sat}$ ,  $b_{sat}$  e  $l_{sat}$  são as dimensões da amostra saturada em metros e  $V_{sat}$  é o volume saturado em metros cúbicos.

### 3.6.2 TEOR DE HUMIDADE

O teor de humidade foi determinado de acordo com a *ISO 13061-1* [38], utilizando os dados de processos já realizados de acordo com a equação (9):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad (9)$$

onde,

$m_w$  é o peso da amostra no teor de água de 12% em quilogramas, mesmo parâmetro usado para determinar a densidade aparente;

$m_0$  é o peso da amostra seca em quilogramas, mesmo dado utilizado na obtenção da densidade básica.

## 3.7 ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS EM ESCALA REAL À FLEXÃO

Afim de analisar a viabilidade das vigas em casos reais, foram realizados testes de flexão em elementos de grande escala utilizados na construção, para este caso foram ensaiados 5 elementos com as seguintes dimensões 2100×214×74 mm<sup>3</sup> em média como apresentado na Figura 47, as amostras foram denominadas de PD-F-R (onde PD são referentes à espécie, no caso Pinho Douglas F é inerente ao ensaio de Flexão e R indica as amostras de escala Real). Os

valores de resistência e módulo de elasticidade obtidos nessa etapa foram comparados com os valores determinados dos ensaios de flexão em provetes à escala reduzida.

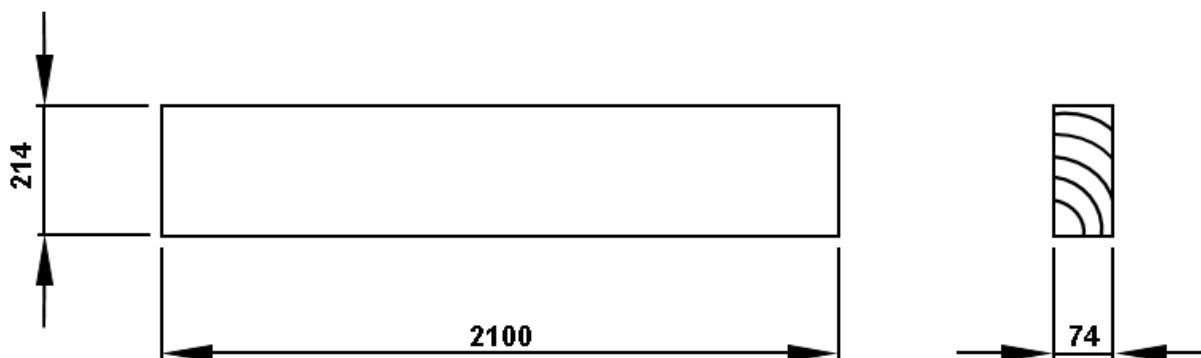


Figura 47 – Dimensões da viga (mm).

Para a execução dos ensaios não foi possível seguir alguns critérios exigidos pela *EN 408*, como por exemplo o condicionamento das amostras e o esquema representado na Figura 29 por consequência das dimensões que as mesmas possuíam, assim foi estabelecida uma relação de simetria entre os pontos de apoios e os de aplicação de carga para que o teste fosse realizado. A Figura 48 mostra o layout com as dimensões e os equipamentos de medição de deslocamento, onde utilizou-se sensores de posição de extensão de cabo *POSIWIRE* modelo WS10-1250-420A-L10-SB0-D8 que registra a posição linear de forma absoluta ou incremental usando um cabo feito de aço inoxidável.

O sensor D1 foi colocado para medir o deslocamento a meio vão do corpo de prova, com a finalidade de se obter o  $E_{m,g}$ , enquanto que os sensores denominados de D2, D3, D4 e D5 posicionados nas extremidades das vigas e foram empregues afim de medir o deslocamento pretendendo aferir a rotação das mesmas.

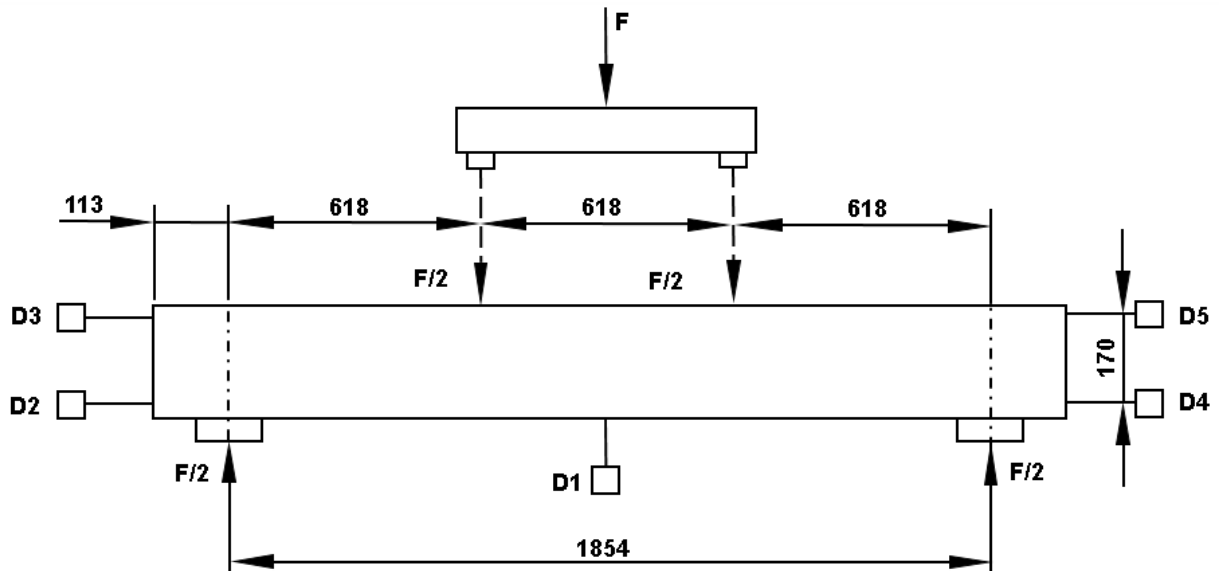


Figura 48 – Esquema e dimensões (mm) para flexão em escala real.  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 49 apresenta a montagem do esquema apresentado anteriormente onde foi utilizado uma célula de carga com capacidade de 100 kN acionada por um atuador hidráulico atrelado a um sistema de controle conectado ao computador onde se realizava a aplicação de forma gradativa da força  $F$ .



Figura 49 – Montagem do esquema para execução do ensaio.

De acordo com a *EN 408* a taxa de aplicação da carga não poderia ser superior a  $0,003 \times h$  mm/s como  $h=214$  mm, logo a velocidade não deveria exceder os 0,642 mm/s, critério este estabelecido para obtenção do  $E_{m,g}$ . Para determinação da  $f_m$  também foi respeitado o intervalo de tempo de  $(300 \pm 120)$ s apesar da aplicação da carga ter sido feita de forma gradativa o que tornava o ensaio mais moroso. Os corpos de prova foram até sua ruptura, como observado na Figura 50.



Figura 50 - Amostras sujeitas ao ensaio de flexão.

Para a realização do cálculo do módulo de elasticidade e tensão de resistência à flexão seguiu-se os mesmos procedimentos descritos nos subitens 3.3.2 e 3.3.3 e as respectivas equações (1) e (2) e (3), posteriormente a obtenção dessas características e utilizando a equação (10), obteve-se o valor do erro relativo afim de ter uma comparação entre as propriedades determinadas nos dois conjuntos de ensaios de flexão.

$$E_r = \frac{|x_i - x_v|}{x_v} \times 100 \quad (10)$$

onde,

$E_r$  é o erro relativo em porcentagem;

$x_i$  é o valor que se deseja comparar ao valor verdadeiro ou aproximado ( $x_v$ );

Convém mencionar que o valor verdadeiro ou aproximado adotado para o cálculo desse fator foi o valor médio obtido a partir dos ensaios de menores dimensões, já que estes cumpriram todos os requisitos da *EN 408* para execução dos testes.

## Capítulo 4: Resultados e Discussões

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão dispostos os tratamentos dos dados e uma análise dos resultados encontrados em todos os segmentos que constituíram o desenvolvimento experimental realizado. Os resultados apresentados neste capítulo tiveram um tratamento estatístico com o intuito de se tirarem conclusões em relação aos valores obtidos e conseqüentemente também determinar valores característicos do módulo de elasticidade, a resistência em flexão e compressão paralela ao fio segundo a *EN 384* [44], importantes para validação da proposta de classificação de peças de madeira de acordo com a *EN 338* [45]. Os restantes resultados são apresentados em anexo.

### 4.2 ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PROVETES À ESCALA REDUZIDA PD-F

Para além dos resultados encontrados nos testes buscou-se definir um comportamento de ruptura, o que se tornou complexo estabelecer um mecanismo de fratura constante tratando-se da madeira por ser um material heterogêneo mesmo quando este está sujeito ao mesmo tipo de carregamento.

No entanto foi possível determinar um comportamento caracterizado pelo rompimento das fibras acarretando fissuras nas zonas opostas à aplicação da carga (região onde se encontrava esforços de tração) ao longo de seu comprimento acompanhando a linha neutra, como é observado na Figura 51, nota-se também a presença de defeitos como nós, dentro da região de aplicação de carga onde se evidenciava a fratura do material e o desenvolvimento e propagação de trincas com maior facilidade, comportamento já esperado devido à baixa resistência que a madeira apresenta quando há a existências dessas imperfeições.



Figura 51 – Ruptura ao longo do comprimento e rompimento por tração.

Em alguns casos foi presenciada a ruptura muito frágil e repentina da amostra sem qualquer tipo de aviso prévio, como por exemplo algum ruído, fato que era observado em alguns testes onde não havia esse tipo de ruptura. Destaca-se também que o rompimento acontecia com certa violência, pressupõe-se que este fato esteja ligado à uma maior secagem nessas amostras que exibiram esse tipo de comportamento. Essas rupturas podem ser caracterizadas por um corte ríspido na região central do provete onde se encontra maiores concentrações de tensões como se observa na Figura 52.



Figura 52 – Ruptura brusca por corte.

Através dos ensaios realizados foi possível obter a força máxima ( $F_{máx}$ ) suportada por cada amostra, o deslocamento a meio vão ( $w$ ) e o tempo até se atingir a carga máxima, conforme mostrado de forma mais detalhada na Tabela 19 diposta no anexo I, onde nota-se uma discrepância nos valores obtidos, apesar das amostras serem da mesma espécie, possuírem praticamente as mesmas dimensões e terem sido submetidas ao mesmo procedimento.

Ressalta-se que os provetes destacados na Tabela 19 não cumpriram o tempo mínimo de ensaio correspondente a 180 s de acordo com *EN 408*, verifica-se também que os mesmos apresentaram os menores valores de carga máxima onde em nenhum dos casos foram superiores à 6 kN, com uma análise visual simples nessas amostras foi constatado uma maior quantidade de defeitos como nós e bolsas de resina, como é notório na Figura 53 principalmente na zona central de sua estrutura onde o material era mais solicitado, fato que justificou esse comportamento.



Figura 53 – Amostras que apresentaram valores baixos de carga máxima.

O restante dos provetes que suportaram maiores quantidades de carga também exibiam esses tipos de defeitos porém com menores dimensões e suas localizações eram mais afastadas das zonas de carregamento, verificando assim pouca influência no comportamento mecânico nos elementos de madeira. A interferência das fendas presentes nas amostras foram desprezadas já que as mesmas não possuíam uma quantidade significativa dessas anomalias e se encontravam afastadas da região central, porém é expectável que, caso as fendas estejam mais ou menos longes do eixo neutro ou em locais onde as fibras estejam distorcidas, poderá haver intervenção na resistência dos provetes.

4.2.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL,  $E_{m,g}$ 

A Figura 54 apresenta o gráfico (fator necessário para o cálculo do  $E_{m,g}$ ) de todo o conjunto amostral, onde não é possível diferenciar detalhadamente o desempenho de cada provete, porém é pretendido observar a discrepância dos comportamentos de um modo geral, (os gráficos de cada corpo de prova estão dispostos de forma individual exibidos no anexo IX).

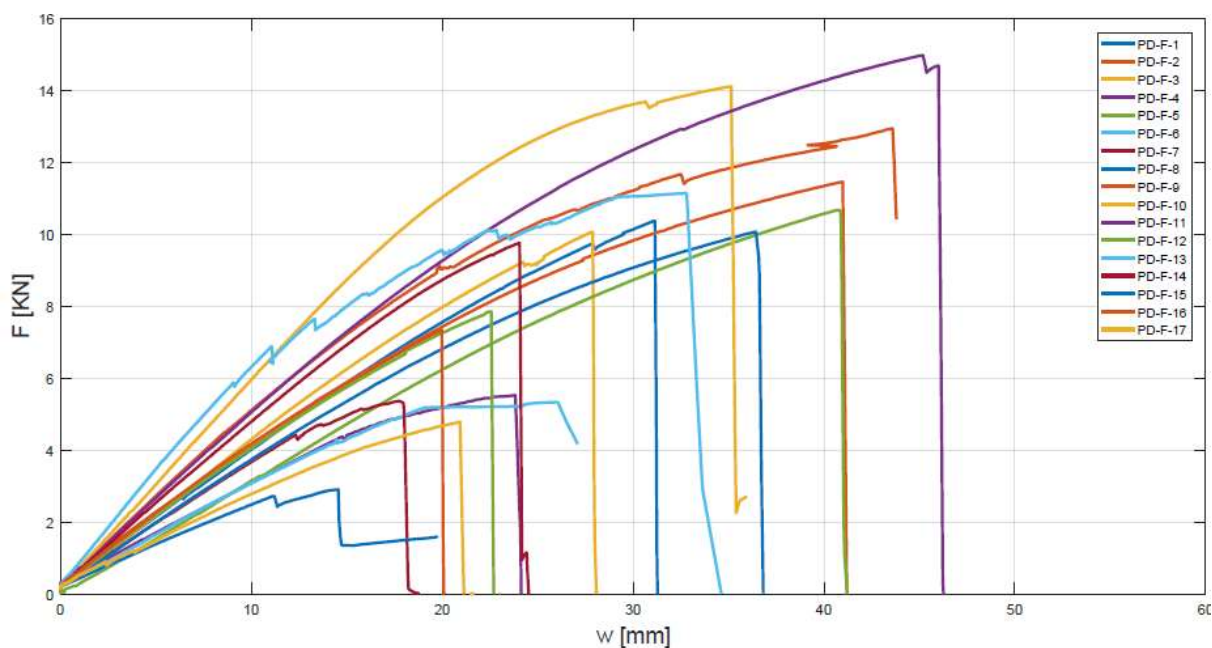


Figura 54 - Gráfico de Força  $\times$  Deslocamento das amostras PD-F.

O  $E_{m,g}$  foi obtido a partir do incremento de força e deslocamento de cada amostra presente no gráfico da Figura 54 e da equação (1) de acordo a metodologia especificada no subtítulo 3.3.2, os valores alcançados estão expostos de forma resumida na Tabela 7 e de forma detalhada em anexo na Tabela 20, onde é notório a diferente dos  $E_{m,g}$  entre as amostras, onde as que apresentaram módulo de elasticidade mais baixos foram, em sua maioria as mesmas que exibiram menores valores de carga máxima, sendo assim constatado que os defeitos também influenciam nessa propriedade do material.

Analisando todo o conjunto de resultados obtidos nos experimentos, pode-se relatar que a madeira se trata de um material pouco rígido devido aos valores reduzidos do  $E_{m,g}$  apresentados, pois quanto maior o módulo de elasticidade maior será sua rigidez. Outra interpretação averiguada quanto ao comportamento das amostras apresentado no gráfico da Figura 54, pode-se considerar a madeira como um material frágil em consequência da ruptura dos provetes logo após os mesmos atingirem sua carga máxima sem indicações de pouca ou nenhuma deformação, ocorrência observada na maior parte dos casos em questão, [46].

Com o tratamento dos valores obtidos, determinou-se a média, os desvio padrão e o coeficiente de variação, valores dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores estatísticos derivados do  $E_{m,g}$ .

<b>Média [MPa]</b>	<b>Desvio padrão <math>\sigma</math></b>	<b>Coeficiente de variação (CV) %</b>
7915,03	2469,73	31,21

A grande variabilidade dos dados é observada analisando o coeficiente de variação superior a 30% e desvio padrão, já que se teve uma variação de um valor mínimo de 3949,77 MPa a um valor máximo de 14619,07 MPa representando uma discrepância de 10,67 o que é considerado um valor significativo de acordo com [1]. Porém os resultados obtidos foram vistos como satisfatórios já que se verifica que a média apontada na Tabela 7 está próxima à valores encontrados em [14] e [47].

#### 4.2.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ( $f_m$ )

A determinação da resistência à flexão foi um processo mais simples quando comparado ao módulo de elasticidade, já que o mesmo depende de parâmetros adquiridos com maior facilidade. Tendo em conhecimento tais fatores e a partir das equações (2) e (3) presentes no subitem 3.3.3 onde está empregue o método para cálculo da  $f_m$ , determinou-se os seu respectivos valores exibidos minuciosamente na Tabela 20 no anexo II.

Mais uma vez nota-se os menores valores entre as amostras dispostas na Figura 53 que apresentaram grande quantidade de nós e bolsas de resina, com exceção dos provetes denominados de S-PD-F-12 e S-PD-F-16 que também exibiram valores baixos de resistência porém sem muita quantidade de defeitos presentes em sua estrutura, este fato pode estar ligado ao mecanismo de ruptura, onde se verificou um corte brusco dos mesmos.

Para uma melhor análise e organização dos dados também foi realizado um tratamento estatísticos, Tabela 8 pertinente à tensão de flexão.

Tabela 8 – Resultados estatísticos referente à  $f_m$ .

<b>Média [MPa]</b>	<b>Desvio padrão <math>\sigma</math></b>	<b>Coeficiente de variação (CV) %</b>
36,95	14,12	38,20

Destaca-se um coeficiente de variação considerado alto segundo [1], levando a uma corroboração da não homogeneidade nos resultados cálculos, onde novamente se tem uma grande divergência entre os valores máximos e mínimos, correspondente a 32,34 MPa. Apesar disso a média entre os resultados encontrados foram considerados satisfatórios, já os mesmos atingiram valores próximos daqueles presentes na literatura.

### 4.3 RESULTADOS E ANALISE DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS

Nesta secção faz-se uma análise referente ao comportamento de ruptura da madeira, quando está sendo solicitada à compressão axial. Novamente vale lembrar que se torna difícil definir um padrão de ruptura constante para a madeira devido a sua anisotropia, contudo nos ensaios foi verificado que a fratura ocorreu em maior frequência, por um enrugamento das fibras sobre si mesmas em um plano moderadamente inclinado em relação as extremidades onde as aplicações de carga eram efetuadas, como observado na Figura 55 (a), onde se tem (a) um provete ensaiado utilizando a CDI e a Figura 55 (b) é uma amostra que foi usado o extensômetro eletromecânico para medição das deformações.

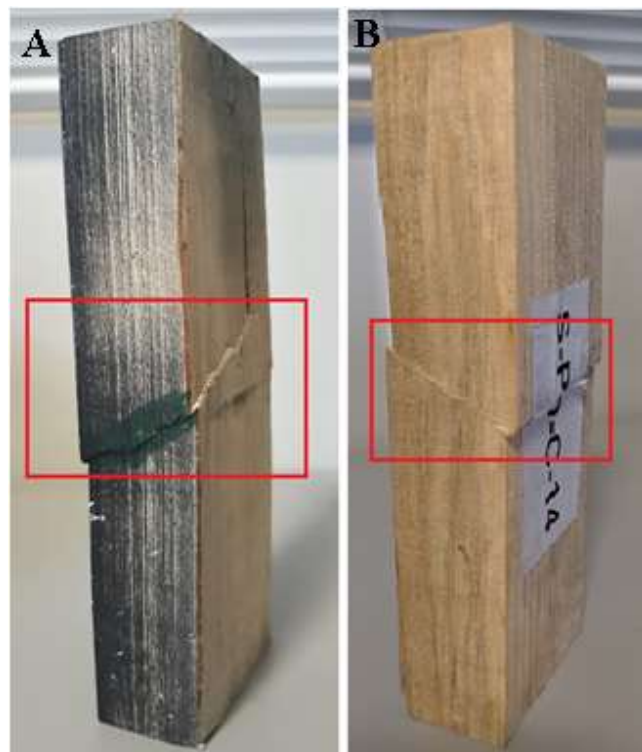


Figura 55 – Ruptura por compressão paralela às fibras: (a) provete ensaiado utilizando CDI e (b) amostra onde foi empregue o extensômetro mecânico.

As fraturas acompanham a orientação das linhas do fio da madeira e se propagam e se desenvolvem com maior facilidade nas regiões onde se encontram defeitos como nós, Figura 56, nota-se também ocorrência de encurvadura ocasionada pelo deslizamento entre os planos tangenciais, este fenômeno foi perceptível em grande parte dos provetes porém a forma e a intensidade com que se manifestaram foi muito variável.



Figura 56 – Ruptura próximas aos nós.

Com tudo foi evidenciado por uma ruptura frágil que acarretava em praticamente nenhuma deformação, em alguns casos se tinha o aparecimento de encurvadura as vezes com pouca ou como moderada intensidade e em outros casos somente o esmagamento das fibras. Aos provetes que foram tratados com CDI através do *software* GOM foi possível verificar também as regiões onde se encontravam maiores deformações, como é observado na Figura 57 as zonas próximas à aplicação da carga possuíam tal particularidade.

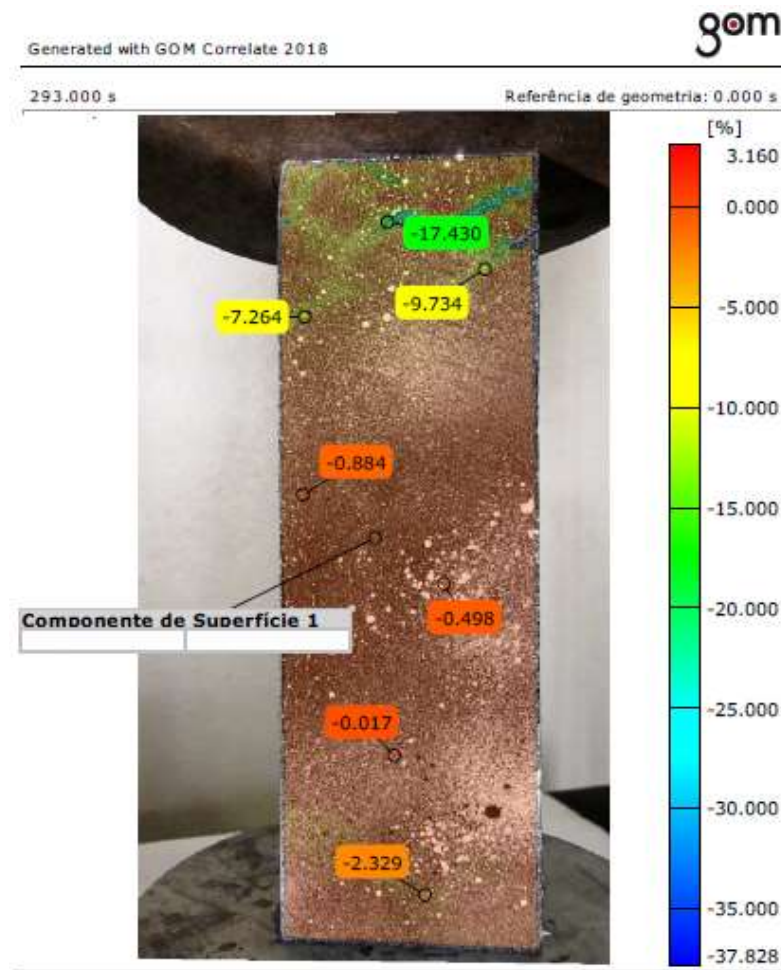


Figura 57 - Áreas com maiores deformações.

Os resultados de tempo de ensaio e carga máxima suportada pelos dois conjuntos de amostras de correlação digital de imagem e o grupo amostral utilizando método de extensômetro eletromecânico estão dispostos em anexo nas Tabelas 21, 22 e 23 respectivamente, onde se observa valores próximos de força máxima já que todos os provetes foram submetidos aos mesmos procedimentos de compressão axial diferenciando se apenas nos métodos empregues na medição da deformação na região central, também é notório que todos os corpos de prova sofreram ruptura dentro do intervalo de  $(300 \pm 120)$ s segundo a *EN 408*.

#### 4.3.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO AXIAL UTILIZANDO A CDI

O módulo de elasticidade na compressão axial foi determinado seguindo os métodos presentes nos subtítulos 3.4.1.2, onde foi descrito o procedimento de correlação de imagem para medição do deslocamento como é exigido pela *EN 408* e no subtítulo 3.4.2, no qual foi retratado os parâmetros necessários para o cálculo do  $E_{c,0}$  a partir da equação (4). Convém mencionar

que os incrementos de força e deslocamento necessários para o cálculo, foram retirados de forma individual dos gráficos dispostos nos em anexo.

A Figura 58 apresenta o gráfico de um dos conjuntos amostral, onde nota-se a discordância entre as curvas de cada provete e uma ruptura frágil em praticamente todos os casos, caracterizada por não se ter quase nenhuma deformação logo após se atingir a carga máxima.

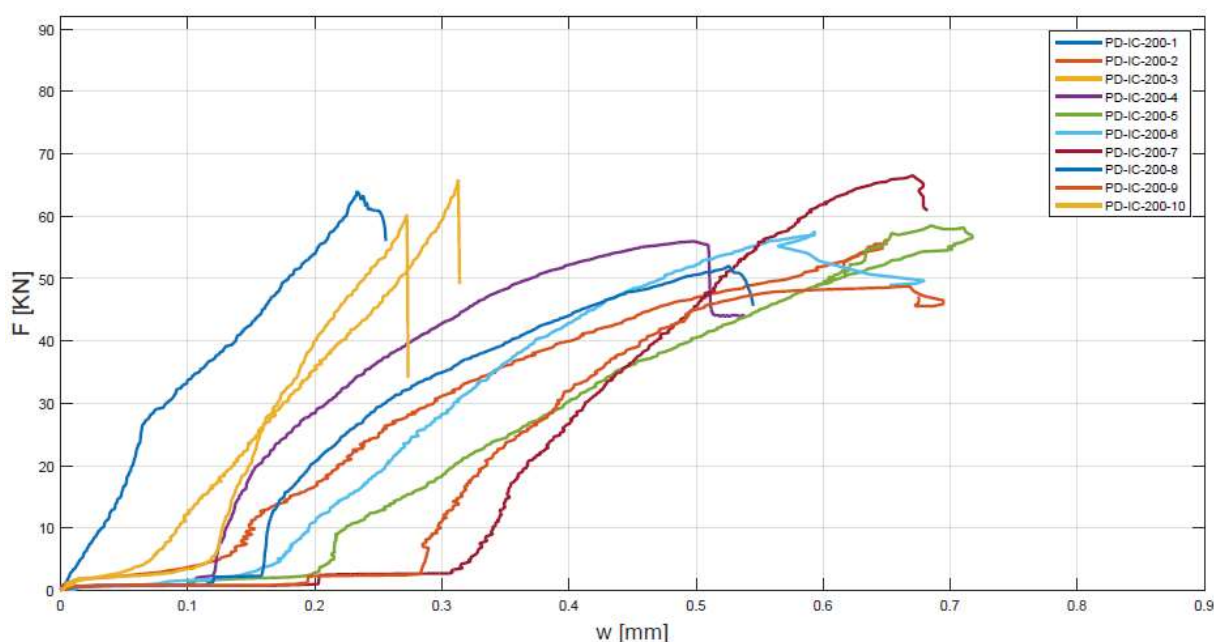


Figura 58 – Gráfico de Força × Deslocamento referente as amostras PD-IC-200.

Outro aspecto observado é uma quantidade de ruídos presente em algumas curvas, provavelmente oriundos dos deslocamentos obtidos a partir da CDI, porém é suposto que tais ocorrências não tenham interferências nos resultados que estão expostos mais detalhadamente nas Tabelas 24 e 25 em anexo, referentes aos provetes PD-CI-186 e PD-CI-200 respectivamente. Para se ter um maior conhecimento relacionado aos conjuntos de resultados obtidos, foi realizado um tratamento estatístico, podendo assim serem feitas algumas constatações sobre os mesmos.

Tabela 9 - Valores estatísticos do  $E_{c,0}$  referente aos provetes PD-CI-186 e PD-CI-200.

Amostras	Média [MPa]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
PD-CI-186	10785,07	4115,84	38,17
PD-CI-200	8971,91	3359,94	37,45

Na Tabela 9 nota-se um desvio padrão e um coeficiente de variação maiores para as amostras PD-CI-186 do que os apresentados nos provetes PD-CI-200, verificando uma maior variabilidade nos dados obtidos dos corpos de prova PD-CI-186, esse fato pode estar relacionado a erros sistemáticos oriundos dos deslocamentos obtidos pela correlação de imagem, tais como o padrão criado nas superfícies de cada provete, ou o posicionamento de cada extensômetro nas amostras. Também é observado que a média do  $E_{m,g}$  de 7915,03 MPa encontrado nos ensaios de flexão, está mais próximo da média do  $E_{c,0}$  das amostras PD-CI-200, sendo assim foi averiguado melhores resultados para essas amostras. Porém em ambos os casos levando em consideração as médias dos dois conjuntos amostral, foi verificado valores satisfatórios e próximos aos apresentados em [47].

#### 4.3.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS ONDE FOI EMPREGUE A CDI

A obtenção da  $f_{c,0}$  foi realizada de acordo com a metodologia empregue no subtítulo 3.4.3 e da equação (5), os resultados acerca da tensão de compressão estão dispostas de forma mais detalhada nas Tabelas 24 e 25 no anexo IV respectivamente aos provetes PD-CI-186 e PD-CI-200, onde se nota um valor mais baixo da  $f_{c,0}$  encontrada no elemento PD-CI-186-5, esta ocorrência pode ser justificada devido à presença de um nó em uma de suas extremidades e rachaduras próximas ao defeito pertinente a solicitação sofrida pelo elemento, como se pode observar na Figura 59, esse fato provavelmente contribuiu para uma menor carga suportada e conseqüentemente levando a uma resistência de compressão inferior às demais obtidas nos outros corpos de prova.



Figura 59 – Ruptura do provete PD-IC-186-5.

A partir dos dados da  $f_{c,0}$  contidos nas tabelas referenciadas acima, fez-se uma análise em relação aos resultados estatísticos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do estatísticos do  $f_{c,0}$  inerentes aos provetes PD-IC-186 e PD-IC-200.

Amostras	Média [MPa]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
PD-CI-186	30,32	8,25	27,21
PD-CI-200	28,20	2,72	9,62

Explicitamente se verifica uma diferença considerável entre os coeficiente de variação, comprovando que as amostras PD-CI-186 apresentaram maiores divergências entre os valores de  $f_{c,0}$  obtidos, o que pode estar ligado à uma quantidade maior de defeitos presentes nas amostras, ou devido a maior diversificação das direções das fibras encontradas nessas amostras que variaram entre longitudinal/tangencial e longitudinal/radial.

#### 4.3.3 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO AXIAL UTILIZANDO EXTENSÔMETRO ELETROMECAÂNICO.

O  $E_{c,0}$  foi obtido seguindo os procedimentos descritos no subtítulo 3.4.1.4 a partir das deformações medidas pelo extensômetro eletromecânico, o cálculo foi realizado de acordo com a metodologia mencionada na seção 3.4.2 e a equação (4), ressalta-se que os incrementos de força e deslocamento foram obtidos dos gráficos de cada provete dispostos no anexo XIII.

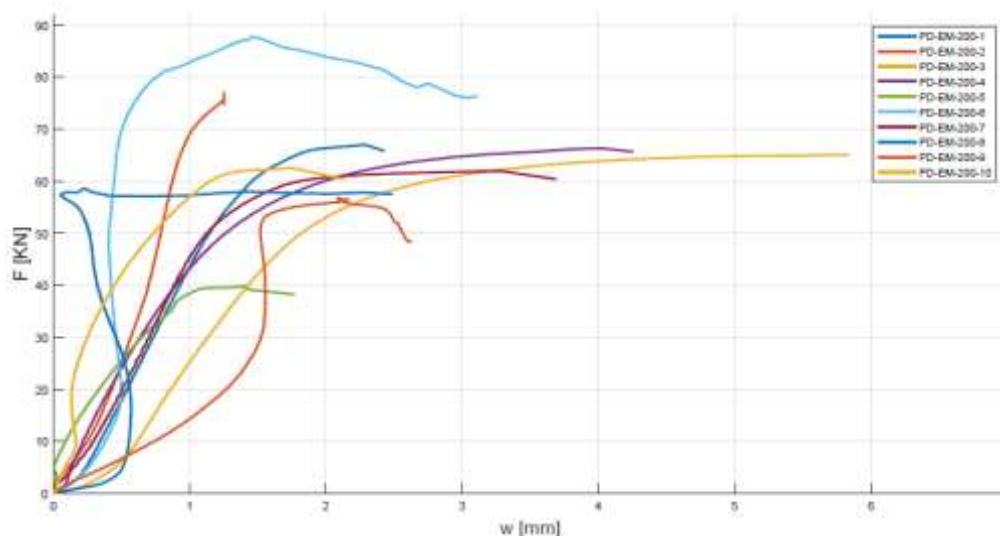


Figura 60 - Gráfico de Força × Deslocamento referente as amostras PD-EM-200.

A Figura 60 apresenta o gráfico do conjunto amostral, onde se verifica uma discordância dos valores de deslocamentos entre as amostras, provenientes das leituras equivocadas feitas devido ao mecanismo fixado aos provetes e ao extensômetro, como é possível observar na Figura 61, uma distorção e não alinhamento das partes do dispositivo presas ao extensômetro, o que acarretou más leituras feitas pelo equipamento.



Figura 61 – Distorção no dispositivo fixado ao provete e atrelado ao extensômetro.

A Tabela 26 disposta no anexo IV apresenta os resultados encontrados do  $E_{c,0}$  de cada provete, a Tabela 11 exibe os dados estatísticos do módulo de elasticidade desse conjunto amostral, no qual se observa dados elevados de CV e desvio padrão devido a discrepância entre os  $E_{c,0}$  obtidos, já que a diferença entre o valor máximo e mínimo transitou em torno de 58000 MPa, este sendo considerado como um valor muito discordante.

Tabela 11 – Resultados estatísticos do  $E_{c,0}$  referentes aos provetes PD-EM-200.

Média [MPa]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV)%
11466,04	17108,59	149,21

Outro fato que se deve levar em consideração também foi o uso de apenas um extensômetro para aferição dos deslocamentos o que vai de encontro a *EN 408* que exige a utilização de dois dispositivos para medição de tal parâmetro, o que pode ter acarretado em

resultados errôneos como os apresentados nessa seção, constatando que a utilização desse método não foi compatível para obter do módulo de elasticidade.

#### 4.3.4 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS PD-EM-200.

Para determinação da  $f_{c,0}$  seguiu-se a metodologia empregue na seção 3.4.3 e utilização da equação (5), os resultados obtidos a respeito dessa propriedade estão expostos na Tabela 26 em anexo de forma mais detalhada, onde se verifica um valor mais baixo de resistência à flexão na amostra PD-EM-200-5, com uma inspeção visual no elemento pôde-se observar uma quantidade considerável de porosidade, como exibido na Figura 62, fato que pode ter resultado em uma baixa tensão de compressão.



Figura 62 – Porosidade contida na amostra PD-EM-200-5.

A Tabela 12 apresenta os dados estatísticos inerentes ao grupo de provetes aqui analisados, onde se verifica um desvio padrão e CV relativamente baixos constatando em maior homogeneidade nos resultados.

Tabela 12 - Resultados do estatísticos da  $f_{c,0}$  referentes as amostras PD-EM-200.

<b>Média [MPa]</b>	<b>Desvio padrão <math>\sigma</math></b>	<b>Coefficiente de variação (CV) %</b>
30,31	5,6	18,47

Convém mencionar que a  $f_{c,0}$  não depende de parâmetros procedentes das medições feitas pelo extensômetro o que acarretou em melhores resultados quando comparados ao  $E_{c,0}$ , este que por sua vez está atrelado aos deslocamentos mensurados pelo disposto em questão.

Destaca-se que os valores encontrados nos dois métodos empregues na compressão axial, tanto de correlação digital de imagem quanto o do extensômetros mecânicos apresentaram resultados de resistência à compressão coerentes entre si, o que se remete a constatação de bons resultados obtidos, levando em consideração a proximidade entre os valores apresentados nesse trabalho e os encontrados em [47].

#### 4.4 RESULTADOS DO COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente de Poisson na direção longitudinal e tangencial ( $\nu_{LT}$ ) foi obtido utilizando a metodologia empregue na seção 3.5 e a equação (6), os resultados encontrados estão indicados na Tabela 27.

Vale ressaltar que algumas literaturas mencionam que o  $\nu$  não pode ser superior à 0,5, porém na tabela referenciada anteriormente nota-se que para alguns casos valores maiores que este. Contudo verifica-se que este fato não se aplica a madeira, pois como apresentado na Figura 63 que faz referências à dados do coeficiente de Poisson encontrado em algumas espécies, destaca-se valores de  $\nu_{RT}$  acima de 0,5 nas madeiras duras.

Species	$\mu_{LR}$	$\mu_{LT}$	$\mu_{RT}$	$\mu_{TR}$	$\mu_{RL}$	$\mu_{TL}$
<b>Hardwoods</b>						
Ash, white	0.371	0.440	0.684	0.360	0.059	0.051
Aspen, quaking	0.489	0.374	—	0.496	0.054	0.022
Balsa	0.229	0.488	0.665	0.231	0.018	0.009
Basswood	0.364	0.406	0.912	0.346	0.034	0.022
Birch, yellow	0.426	0.451	0.697	0.426	0.043	0.024
Cherry, black	0.392	0.428	0.695	0.282	0.086	0.048
Cottonwood, eastern	0.344	0.420	0.875	0.292	0.043	0.018
<b>Softwoods</b>						
Baldcypress	0.338	0.326	0.411	0.356	—	—
Cedar, northern white	0.337	0.340	0.458	0.345	—	—
Cedar, western red	0.378	0.296	0.484	0.403	—	—
Douglas-fir	0.292	0.449	0.390	0.374	0.036	0.029
Fir, subalpine	0.341	0.332	0.437	0.336	—	—
Hemlock, western	0.485	0.423	0.442	0.382	—	—

Figura 63 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies, [14].

Evidencia-se também a madeira em estudo no presente trabalho e o seu respectivo  $v_{LT}$  investigado nesta seção, o valor exposto na Figura 63 é próximo ao valor apontado na Tabela 13 obtido com base nas médias dos resultados exibidos na Tabela 27 presente no anexo V.

Tabela 13 – Resultados estatísticos do  $v_{LT}$ .

Média	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
0,475	0,16	33,68

O erro relativo entre esses dois valores, calculado a partir da equação (10) é de 5,79 %, que é um valor relativamente baixo, o que se remete à resultados considerados aceitáveis, levando-se em consideração o método empregue na obtenção do coeficiente de Poisson e a complexidade de obtenção dessa constante elástica para o caso das madeira como já mencionado.

## 4.5 RESULTADOS DO TEOR DE HUMIDADE, DENSIDADE BÁSICA E APARENTE

### 4.5.1 DENSIDADES APARENTE E BÁSICA

A obtenção dessas propriedades foram relativamente mais simples quando comparadas com as demais exibidas anteriormente, já que os procedimentos não possuíam muita complexidade. A metodologia empregue para a determinação das densidades está exposta na seção 3.6.1 onde se tem as equações (7) e (8) utilizadas para cálculo da densidade aparente e básica respectivamente.

Os resultados estão apresentados em anexo na Tabela 28, no qual se verifica uma alteração ainda que pequena tanto na densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) quanto na densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) que pode ser justificada pela variabilidade presente no lenho dentro da mesma espécie, uma vez que os provetes foram retirados de diferentes regiões e de diferentes barrotes, porém nota-se uma regularidade nos valores devido à boa precisão das amostras bem como os equipamentos utilizados para mensurar os parâmetros necessários para o cálculo.

A Tabela 14 aponta os resultados estatísticos obtidos com base nos dados das densidades mencionadas anteriormente, onde se observa nas duas propriedades valores de CV abaixo de 5%, constatando em uma homogeneidade do conjunto amostral.

Tabela 14 – Resultados estatísticos referente as densidades.

Densidades	Média [kg/m <sup>3</sup> ]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
Aparente	488,86	20,18	4,13
Básica	407,49	14,39	3,54

O valor médio da densidade aparente se aproxima do mesmo valor encontrado por [48] que foi de 474 kg/m<sup>3</sup> o que representa um erro relativo de 3,13%, demonstrando a veracidade nos dados obtidos. A densidade básica não pôde ser comparada com outro valor de alguma referência, pois não se encontrou trabalhos realizados no mesmo âmbito na determinação dessa propriedade.

#### 4.5.2 TEOR DE HUMIDADE

O teor de humidade foi determinado de acordo com os métodos empregues no subtítulo 3.6.1 e a equação (9). A obtenção dessa propriedade também não possuiu muita complexidade, já que os parâmetros necessários para o cálculo já haviam sido encontrados nos ensaios de determinação das densidades descritas anteriormente os resultados obtidos se encontram dispostos na Tabela 28 também em anexo, onde se percebe valores próximos sem muita discordância entre os mesmos, este fato é comprovado ao se observar os dados apontados na Tabela 15 relacionado ao tratamento estatístico dos resultados.

Tabela 15 - Resultados estatísticos referente ao teor de humidade.

Média [%]	Desvio padrão [%]	Coefficiente de variação (CV) %
11,17	0,35	3,14

Evidencia-se um CV menor que 4% retratando pouca variabilidade nos valores encontrados e um desvio expressando um grau de dispersão dos dados muito baixo o que remete a dados próximos da média, ou seja, mais homogêneos.

#### 4.6 ANALISE E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM ESCALA REAL

Assim como nos resultados exibidos na etapa anterior, primeiramente fez-se uma análise referente ao mecanismo de ruptura apresentado pelas amostras ensaiadas. Foi verificado que as mesmas apresentaram um comportamento semelhante aos provetes em menores escalas

descritos anteriormente, onde foi observado rachaduras prolongadas ao longo de seu comprimento nas regiões opostas à aplicação da carga com maior desenvolvimento em zonas com defeitos, como mostrado na Figura 64.



Figura 64 – Ruptura das amostras em escala real.

Também foi constatado um corte brusco de modo inesperado na amostra designada de PD-F-R-2, localizado especificamente em um dos pontos de aplicação de força, como apresentado na Figura 65. Verificando assim que independente da dimensão do corpo de prova o mecanismo de ruptura se torna semelhante para todos os casos em geral.



Figura 65 – Corte brusco ocorrido em uma das amostras.

A partir dos ensaios realizados e equipamentos utilizados pôde-se obter alguns parâmetros sobre os testes apresentados minuciosamente na Tabela 29 em anexo, onde se pode averiguar algumas constatações.

Explicitamente todos os ensaios atingiram suas cargas máximas dentro do intervalo estipulado pela norma vigente, a amostra que suportou a menor carregamento foi a mesma que exibiu um corte brusco e inesperado, esse fato pode estar possivelmente ligado aos nós que estavam presentes na região do rompimento acarretando ao seu desenvolvimento com maior facilidade, como observado na Figura 66, onde se nota a propagação da trinca circundando os nós.



Figura 66 – Rompimento da amostra PD-F-R-5.

#### 4.6.1 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL NAS AMOSTRAS DE ESCALA REAL ( $E_{m,g,r}$ )

O Módulo de elasticidade global foi obtido empregando o mesmo método utilizado anteriormente nos ensaios de flexão com as vigas de menores dimensões, a Figura 67 apresenta o gráfico do conjunto amostral de onde se recolheu os incrementos de força e deslocamento de acordo com a metodologia do subtítulo 3.3.2 para cálculo do  $E_{m,g,r}$  foi empregue a equação (1).

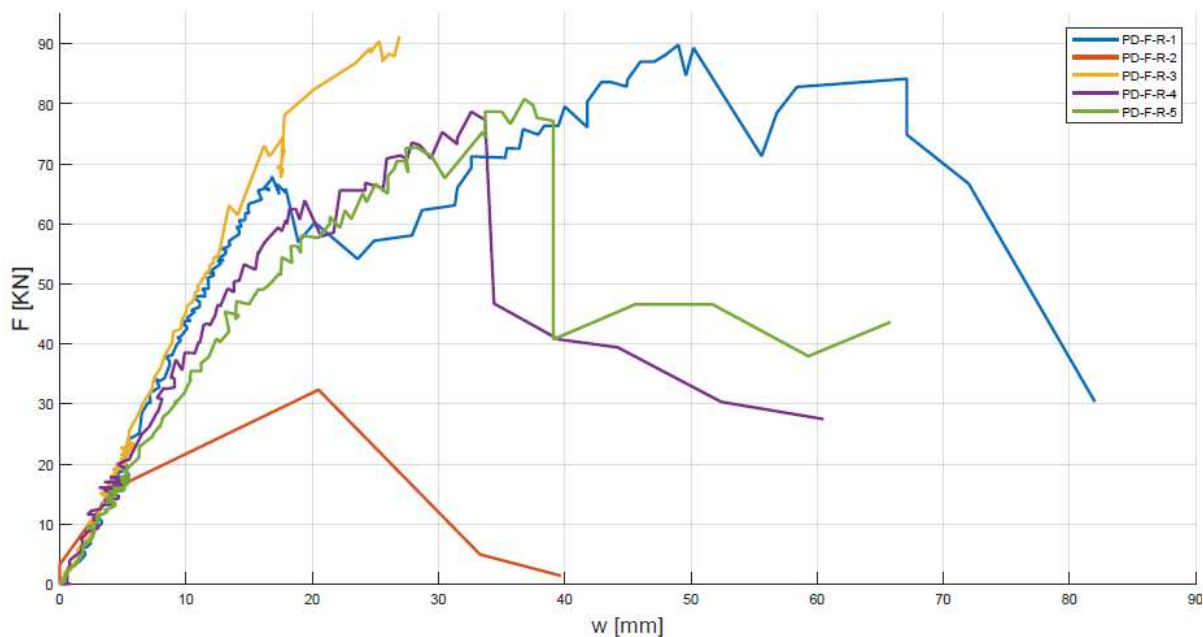


Figura 67 – Gráfico de Força × Deslocamento dos ensaios em escala real.

Percebe-se uma variação no comportamento dos provetes e na maioria dos casos uma característica de ruptura frágil por não haver uma deformação considerável ao se atingir a carga máxima. Nota-se também uma grande quantidade de ruídos nos gráficos, provavelmente devido ao tipo de sensor utilizado e de como o mesmo realizava as leituras de deslocamentos, porém considera-se que este fato não tenha interferido nos resultados obtidos exibidos de forma detalhada na Tabela 30 em anexo.

Verifica-se uma discrepância não muito grande entre os valores encontrados, também foi averiguado o menor valor de  $E_{m,g,r}$  para a amostra PD-F-R-2, fato provavelmente justificado pela ocorrência da ruptura de maneira inesperada e o corte brusco.

A Tabela 16 apresenta uma comparação entre os valores estatísticos dos resultados obtidos nos ensaios a escala reduzida e a escala real, onde foi observado um coeficiente de variação menor do que o apresentado para o primeiro caso de ensaio de flexão, o que leva a uma maior homogeneidade dos valores, porém deve-se levar em consideração a quantidade de provetes utilizados em cada um dos testes o que pode ter influenciado nos valores estatísticos.

Tabela 16 – Comparação dos resultados estatísticos dos módulos de elasticidade global entre os ensaios de flexão em escala real e escala reduzida.

Amostras	Média [MPa]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
Escala real	6938,98	1179,36	16,99
Escala reduzida	7915,03	2469,73	31,21

A partir da equação (10) foi calculado o erro relativo  $E_r$  entre as duas médias dos testes de flexão efetuados, onde foi obtido um  $E_r = 12,33\%$ , valor considerado aceitável levando em consideração os procedimentos no qual os testes foram realizados, já que os mesmos não foram efetuados em comum acordo com os ensaios de flexão que se realizou a comparação.

#### 4.6.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM ESCALA REAL ( $f_{m,r}$ ).

O cálculo da tensão à flexão foi realizada seguindo o método descrito no subtítulo 3.3.3 de acordo com as equações (2) e (3), os resultados obtidos estão dispostos detalhadamente na Tabela 30 em anexo.

Considerando as dimensões dos provetes, um fator que pode ter influenciado nos resultados é a distância entre os apoios e o ponto de aplicação de carga ( $a$ ), uma vez que este não respeitou os critérios da norma [33], pois ao se levar em consideração o  $h$  que no caso foi em média de 215 mm o  $a$  que deveria ser empregue seria de 1260 mm enquanto que o utilizado nos ensaios foi de 618 mm, ou seja, menos da metade do valor exigido, esta divergência acarretou em uma maior aplicação de carga até a ruptura do corpo de prova e conseqüentemente uma maior resistência à flexão, ocasionando em uma distorção dos resultados.

A Tabela 17 apresenta os valores estatísticos dos ensaios de flexão em escala reduzida e em escala real afim de se ter uma comparação entre os mesmos. Verifica-se um coeficiente de variação maior que o encontrado no módulo de elasticidade global no caso em análise o que leva a constatar uma maior variabilidade nos resultados obtidos.

Tabela 17 - Resultados estatísticos da resistência à flexão entre os ensaios de flexão em escala real e escala reduzida.

Amostras	Média [MPa]	Desvio padrão $\sigma$	Coefficiente de variação (CV) %
Escala real	81,67	23,48	28,75
Escala reduzida	36,95	14,12	38,20

A partir das médias referentes as amostras de escala reduzida e em escala real respectivamente obteve-se um erro relativo de 121,02%, comprovando mais uma vez a discrepância que se tem dessa propriedade entre os dois grupos de provetes utilizados, sendo assim demonstrando uma irregularidade referente à execução dos ensaios como já mencionado anteriormente.

#### 4.6.3 RESULTADOS DA ROTAÇÃO NAS EXTREMIDADES

A rotação dos provetes foi medida a partir dos sensores posicionados em suas extremidades como exibido na Figura 48, porém não foi levado em consideração os 3 graus de liberdade (horizontal, vertical e a rotação) que as vigas possuíam ao sofrerem a flexão, como é observado na Figura 68 que representa a movimentação das amostras em uma de suas extremidades com a execução do testes.

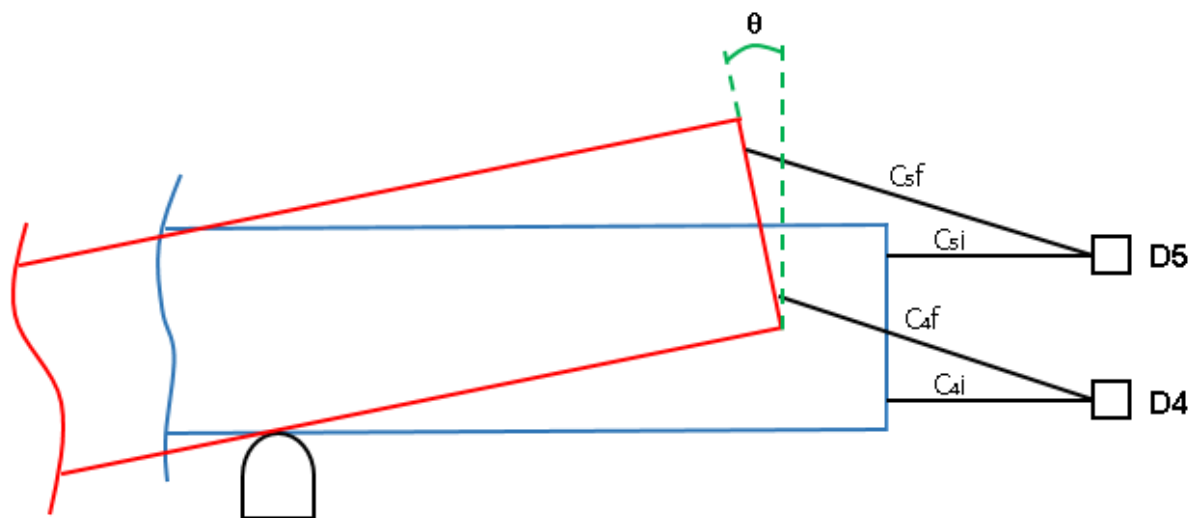


Figura 68 – Movimento da viga ao ser submetida ao ensaio de flexão.

As linhas em azuis são referentes a posição inicial da viga, enquanto que as linhas em vermelho retrata a posição final, os  $C_{4f}$  (comprimento final do fio do sensor D4) e o  $C_{5f}$  (comprimento final do fio do sensor D5) foram os deslocamentos medidos pelos sensores e o ângulo  $\Theta$  seria a rotação sofrida pela viga que se pretendia mensurar. Em decorrência da não medição dos deslocamentos verticais e horizontais de forma individual, não foi possível estabelecer uma relação geométrica ou vetorial que fosse possível calcular o  $\Theta$ .

A Figura 69 exibe o gráfico dos deslocamentos  $C_{4f}$  e o  $C_{5f}$  medidos pelos sensores D4 e D5 respectivamente, da amostra PD-F-R-3.

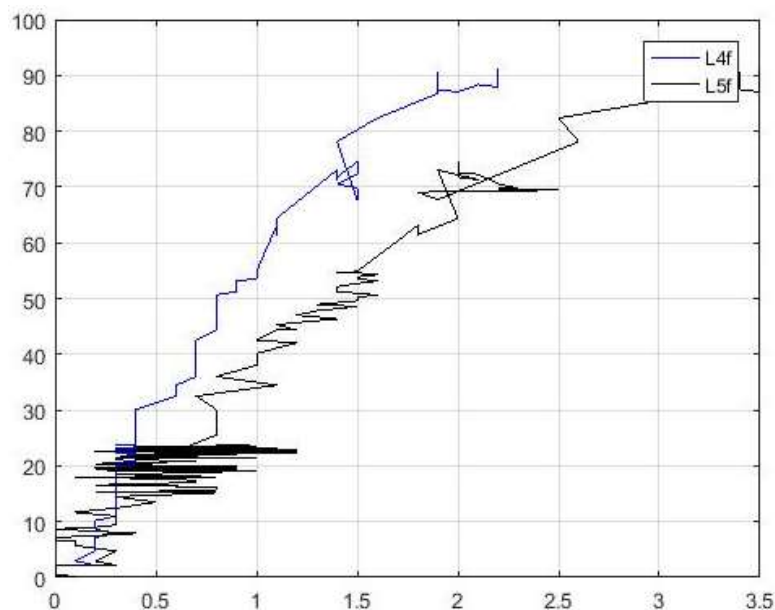


Figura 69 – Gráfico Força × deslocamentos nas extremidades.

Pressupõe-se que a rotação esteja atrelada aos dois deslocamentos expostos, porém é notável uma grande quantidade de ruídos das leituras feitas pelos sensores, o que dificultaria na obtenção de resultados satisfatórios, constatando que o método utilizado não se adequa ao objetivo de mensurar tal parâmetro de rotação.

#### 4.7 CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA

Esta seção é direcionada à classificação de resistência do abeto de Douglas, para tal foram utilizadas as normas [44] e [45], esta última menciona que uma população de madeira pode ser atribuída a uma classe de resistência se seus valores característicos de densidade ( $\rho_k$ ) e resistência à flexão ( $f_{m,k}$ ) é igual ou superior aos valores para essa classe exibidos tabela 1 da norma EN 338, e seu módulo médio característico de elasticidade na flexão ( $E_{0,mean}$ ) for igual ou superior a 95% do valor para essa classe de resistência, [45].

Esses três valores característicos foram determinados com base nos métodos e equações dispostos na norma EN 384, para o qual o  $E_{0,mean}$  e o  $f_{m,k}$  foram obtidos somente a partir dos resultados dos ensaios de flexão apontados no subtítulo 4.2 que cumpriram o tempo mínimo de ensaio, totalizando 12 testes. Ressalta-se que a norma em questão especifica um número mínimo de 40 amostras para testes afim de se classificar a madeira, porém esse requisito não foi cumprida devido ao número de material que se tinha disponível por motivos já descritos, contudo foi considerado como aceitável uma quantidade de 12 amostras, já que as mesmas

foram ensaiadas em total concordância com a EN 408 que rege a EN 384 referente aos procedimentos de realização de testes, [44].

#### 4.7.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO MÉDIO CARACTERÍSTICO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO

Primeiramente para obtenção do  $E_{0,mean}$ , faz-se necessário calcular o  $\bar{E}$  de acordo com a expressão abaixo, que inclui um ajuste para o módulo de elasticidade de flexão pura:

$$\bar{E} = \left[ \frac{\sum E_i}{n} \right] 1,3-2690 \quad (11)$$

onde,

$E_i$  é o  $i$ -ésimo do valor do módulo de elasticidade no intervalo de 1 até  $n$ , ou seja, foi realizado uma somatória dos módulos de elasticidades obtidos e dividiu-se pelo número de amostras ensaiadas, no caso  $n=12$ .

Após o cálculo do  $\bar{E}$  foi determinado o  $E_{0,mean}$  com base na equação (12):

$$E_{0,mean} = \left[ \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j} \right] \quad (12)$$

onde,

$n_j$  é o número de espécies na amostra;

$\bar{E}_j$  é o valor médio do módulo de elasticidade para a amostra expresso em N/mm<sup>2</sup>, calculado a partir da equação (11).

#### 4.7.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR CARACTERÍSTICO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Expressão para o valor característico de resistência à flexão:

$$f_{m,k} = \bar{f}_{05} k_s k_v \quad (13)$$

onde,

$f_{0,5}$  é o valor obtido pela classificação de todos os valores de teste para uma amostra em ordem crescente. O valor do quinto percentil é o valor do teste para os quais 5% dos valores são inferiores ou iguais para o caso em questão, isto é, 5% de 12 amostras testadas é 0,6 o que não

se contabilizar nenhuma amostra, sendo assim tomou-se o primeiro menor valor de acordo com a ordem estabelecida, onde o  $f_{0,5}$  encontrado foi de 28,42 MPa.

$k_s$  é um fator de ajuste para o número de amostras e seu tamanho e foi obtido a partir da Figura 70, no qual o A é o número de amostras, logo A=1 e B é o número de elementos na amostra que no caso B=12, porém como é notório a curva A é limitada somente ao limite de 40 amostras, sendo assim optou-se por seleccionar o  $k_s$  considerando um total de 40 provetes, por tanto o  $k_s$  encontrado foi próximo de 0,77.

$k_v$  é fator de ajuste para classificação da máquina que de acordo com o item 5.4 da norma EN 384 é igual a 1.

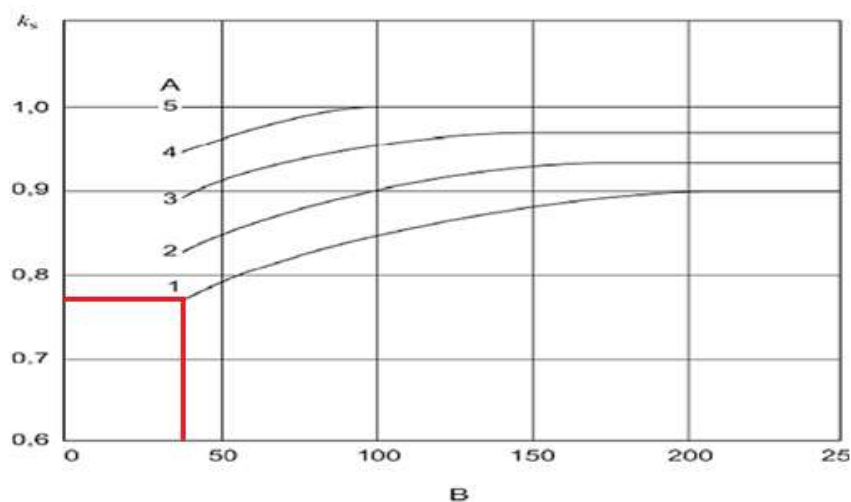


Figura 70 – O efeito do número de amostras e seu tamanho no fator  $k_s$

#### 4.7.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR CARACTERÍSTICO DA DENSIDADE

O valor característico da densidade ( $\rho_k$ ) foi obtido com base nos resultados da densidade aparente, já que esta foi encontrada de acordo com os padrões de referências do teor de humidade de 12%. O  $\rho_k$  depende do quinto percentil de densidade ( $\rho_{05}$ ) determinado a partir da expressão:

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1,65s) \quad (14)$$

onde,

$\bar{\rho}$  e  $s$  são a média e o desvio padrão respectivamente em  $\text{kg/m}^3$  (estes dados estão apontados na Tabela 14).

Com isso foi possível determinar o  $\rho_k$  de acordo com a equação expressa abaixo:

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} \cdot n_j}{\sum n_j} \quad (15)$$

onde,

$n_j$  é o número de espécies na amostra;

#### 4.7.1 CLASSES DE RESISTÊNCIAS

Fundamentado nos métodos descritos anteriormente foram obtidos os valores característicos apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados dos valores característicos.

$E_{0,mean}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m,k}$ [(N/mm <sup>2</sup> )]	$\rho_k$ [(kg/m <sup>3</sup> )]
8,96	21,88	455,57

Os requisitos para classes europeias de resistência C segundo a EN 338 estão resumidas na Figura 71, para as coníferas que é o caso do Abeto de Douglas, nota-se que os valores são divergentes para diferentes classes, ou seja, cada valor se enquadra em uma categoria distinta.

	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C45	C50
$f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14	16	18	22	24	27	30	35	45	50
$E_{m,mean}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	7	8	9	10	11	12	12	13	15	16
$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	290	310	320	340	350	370	380	400	440	460

Figura 71 – Valores característicos para espécie de coníferas.

Como critério para classificação adotou-se o valor pertencente a menor classe, este mesmo fundamento também foi empregue por [47], o que remete-se à proporcionar assim uma segurança adicional para fins estruturais, logo o Abeto de Douglas em estudo pôde ser classificado como C18, os valores característicos para a referida classe estão expostos na Tabela 31 no anexo XIV. Destaca-se que as outras propriedades de resistência, bem como os valores médios de densidade, são determinados de acordo com o anexo A disposto na norma EN 338.

## Capítulo 5: Conclusões e trabalhos futuros

---

### 5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa consistiu na obtenção das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira Abeto de Douglas por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. Apresentam-se no presente capítulo os principais resultados e conclusões que se teve com base nos dados expostos nos capítulos anteriores, assim como possíveis desenvolvimentos de pesquisas futuras derivadas das análises acerca da investigação realizada neste trabalho.

Devido à grande diversificação das características da madeira foi imprescindível o emprego de normas e regulamentos que regem os procedimentos de ensaios e a determinação das propriedades da madeira.

Em relação aos ensaios de flexão, os mesmos foram efetuados em um conjunto de amostras que cumpriram todos os requisitos impostos pela norma *EN 408* desde a sua preparação até o uso de dispositivos e execução dos testes afim de se determinar as propriedades desejadas e apesar de se ter uma quantidade de amostras relativamente pequena foi possível obter bons resultados acerca do módulo de elasticidade global e a resistência à flexão.

Também foi realizado testes de flexão em 5 amostras que possuíam dimensões assim por se dizer em escala real, com isso pôde-se realizar uma comparação dos valores determinados para o caso, com os resultados obtidos nos ensaios de flexão mencionados anteriormente e verificar a aplicabilidade das vigas nas estruturas onde são empregue. Além disso pretendeu-se mensurar a rotação nas extremidades dessas vigas de escala real, porém o método e os equipamentos utilizados não foram suficientes para medição de tal parâmetro.

Em respeito aos ensaio de compressão axial paralela ao grão, também foram realizados em comum acordo com a *EN 408* para se determinar a resistência a compressão e o módulo de elasticidade, onde para obtenção destes último, utilizou-se dois procedimentos distintos para medição do deslocamento como estabelecido pela, o primeiro foi a CDI que permitiu obter informações como deslocamentos, deformações e tensão através da correlação de imagens onde

foram analisados dois conjuntos de amostras e o segundo método foi a aplicação de um extensômetro mecânico.

Devido ao uso do aparato atrelado ao pelo extensômetro mecânico e ao corpo de prova, verificou-se uma distorção nos resultados encontrados, sendo assim este método não foi o mais apropriado para se determinar o módulo de elasticidade na compressão. Em contra partida o procedimento de CDI obteve-se resultados consideráveis apesar das divergências que se teve em alguns casos, porém este foi considerado um método aceitável e apropriado, uma vez que os valores médios encontrados se aproximaram daqueles encontrados para o primeiro caso dos ensaios de flexão.

Ainda utilizando a CDI com os dados de compressão buscou-se determinar o coeficiente de Poisson nas direções longitudinal e tangencial, apesar da dificuldade em se mensurar essa constante elástica, em consequência da precisão do *software* de correlação de imagem em captar a deformação na direção tangencial que era muito pequena e até mesmo da característica ortotrópica da madeira, foi factível determinar uma boa média nos resultados encontrados, já que estes se assemelharam com valores vistos na literatura.

A última etapa experimental foi a determinação do teor de humidade e as densidades básica e aparente, os procedimentos para os ensaios foram efetuados segundo as normas ISO 13061-1 e ISO 13061-2, no qual pôde-se obter bons resultados acerca dessas duas propriedades físicas.

Com relação ao mecanismo de ruptura da madeira foi necessário uma análise diferente em relação aos outros materiais, em que consequência da variabilidade e características ortotrópicas da madeira. Os defeitos e anomalias até mesmos aqueles mais difíceis de detectar, como pequenos nós e desvio da direção do fio, influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, bem como o comportamento de fratura da madeira.

A partir das normas *EN 384* e *EN 338* foram determinados os valores característicos, estes que por sua vez concedem o dimensionamento de estruturas e elementos de madeira, com valores abaixo dos valores médios das suas propriedades visando estabelecer um coeficiente de segurança aos projetos e também permite a relacionar a madeira à uma classe de resistência, que para o caso da madeira Abeto de Douglas foi classificada como C18, também foi elaborada uma ficha técnica contendo todas as informações obtidas à respeito da espécie investigada.

## **5.2 LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO**

O trabalho desenvolvido tornou-se de uma certa abrangência considerável, frente à todas características determinadas e analisadas no presente trabalho. Porém se tem a convicção que ainda no âmbito dessa dissertação surgem algumas propostas para linhas de trabalhos futuros.

Estudos à serem empregues mesma espécie investigada, visando avaliar e classificar a durabilidade natural da madeira segundo as normas vigentes. Aplicação de ciclos de envelhecimento, bem como averiguar a sua influência sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Realização de experimentos afim de se analisar o comportamento da estabilidade dimensional da madeira.

Investigar a variabilidade das características físicas e mecânicas entre amostras retiradas do cerne e do borne, assim como de diferentes direções visando uma comparação e análise sobre a influência, acerca das propriedades do material.

Continuidade do trabalho desenvolvido a outras espécies de madeira, especificamente a outros gêneros comuns na Europa como o pinho larício e pinho marítimo, objetivando em determinar as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e resistência à flexão, tração e à compressão, bem como efetuar ciclos de envelhecimentos e comparar as propriedades das amostras envelhecidas com as não envelhecidas.

Propõem-se que a realização de testes em uma maior quantidade de vigas em escala real na espécie estudada neste trabalho ou em outras se for o caso, e que estas sigam com rigor os requisitos da norma EN 408 referente à esquematização de ensaio, para que se tenha um estudo mais padronizado e aprofundado. Ainda no mesmo contexto, busca e utilização de métodos que sejam capazes de mensurar as rotações nas suas extremidades, como por exemplo, uso de inclinômetros e/ou sensores que meçam os deslocamentos verticais e horizontais de forma individual nas extremidades da viga.

Realizar estudos sobre o comportamento da madeira a temperaturas elevadas, tratando de questões referentes à taxa de carbonização, à degradação térmica e à influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira.

---

## Referências

---

- [1] Pereira, S.S.C., *Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2009, Faculdade de Engenharia Universidade de Porto.
- [2] Franco, S.I.S., *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ, in situ*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
- [3] Coutinho, J.d.S., *Materiais de Construção I: Madeira*. 1999.
- [4] Borges, P.C.B., *Caraterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de carvalho e de castanho do nordeste transmontano* in *Escola Superior de Tecnologia e Gestão*. 2013, Instituto Politécnico de Bragança: Bragança, Portugal.
- [5] Smith, W.F., *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 3ª ed. 1998, Estados Unidos da América: McGRAW-HILL.
- [6] Júnior, J.A.B., *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [7] Pinto, C.D.P., *Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinho bravo e de freixo do nordeste transmontano* in *Escola Superior de Tecnologia e Gestão* 2014, Instituto Politécnico de Bragança: Bragança, Portugal.
- [8] Klock, U., et al., *Química da madeira*. Curitiba: UFPR, 2005. **3**.
- [9] Sousa, R.M.L.d., *Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho Bravo e Madeira Tratada Termicamente*, in *Escola de Engenharia* 2012, Universidade do Minho.
- [10] Martins, S.F.M.F., *Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo*, in *Escola de Engenharia*. 2009, Universidade do Minho: Portugal.
- [11] Almeida, F.A.L.d., *A madeira como material estrutural – projeto da estrutura da cobertura de um edifício*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto: Porto, Portugal.

- [12] Santos, J.A.d., *Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira*, in *Departamento de Engenharia Mecânica 2007*, Universidade do Minho: Guimarães, Portugal.
- [13] Bajpai, P., *Chapter 7 - Properties of Wood*, in *Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition)*, P. Bajpai, Editor. 2018, Elsevier. p. 215-232.
- [14] Robert H. Falk, et al., *Wood handbook : wood as an engineering material*. 100 ed. 2010, Estados Unidos Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
- [15] Seifert, T., et al., *Resin pocket occurrence in Norway spruce depending on tree and climate variables*. *Forest Ecology and Management*, 2010. **260**(3): p. 302-312.
- [16] Du, S. and F. Yamamoto, *An Overview of the Biology of Reaction Wood Formation*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007. **49**: p. 131-143.
- [17] Donaldson, L.A. and A.P. Singh, *Chapter 6 - Reaction Wood*, in *Secondary Xylem Biology*, Y.S. Kim, R. Funada, and A.P. Singh, Editors. 2016, Academic Press: Boston. p. 93-110.
- [18] Latorraca, J.V.d.F. and C.E.C.D. albuquerque., *Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira*. *Floresta e Ambiente*, 2000. **7**: p. 279-291.
- [19] Ponce, R.H., *Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas*. Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995: p. 50-58.
- [20] Lobão Silveira, M., et al., *Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades*. *Revista Árvore*, 2004. **28**(6).
- [21] Evans, J.W., J.F. Senft, and D.W. Green, *Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones*. *Forest products journal*. Vol. 50, nos. 7/8 (July/Aug. 2000): p. 75-87: ill., 2000.
- [22] Kollmann, F.F.P. and W.A. Côté, *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Vol. 1. 1968, Berlin: Springer Science & Business Media. 592.
- [23] Cardoso, A.A., et al., *Deformação residual longitudinal em diferentes espaçamentos e idades em clone de híbrido de Eucalyptus*. *Sistema de Información Científica Redalyc Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 2005. **11**: p. 218-224.
- [24] JUNIOR, J.R.D.A., *Classificação estrutural de peças de madeira de Pinus elliottii utilizando o módulo de elasticidade obtido pelo método de ondas longitudinais de tensão*, in *Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos*. 2016, Universidade de São Paulo: São Paulo.
- [25] Soriano, J., et al., *Propriedade de dureza da madeira*. *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP*, 2018(26).

- [26] Ritter, M.A., *Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance*. 1990, Washington: Department of Agriculture Forest Service.
- [27] Agahayere, A. and J. Vigil, *Structural Wood Design: A Practice-Oriented Approach*. 2007, New Jersey: Wiley, ISBN.
- [28] Moreschi, J.C., *Propriedades da madeira*. 2005.
- [29] Machado, N.C.d.C.M., *Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico*, in *Engenharia civil*. 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto: Porto.
- [30] COSTA, A., *Coletâneas de anatomia da madeira*. Joinville: UDESC, 2001.
- [31] Foelkel, C.E.B., M.A.M. Brasil, and L.E.G. Barrichelo, *Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas*. IPEF, Piracicaba, 1971. **2**(3): p. 65-74.
- [32] Logsdon, N.B., *Estabilidade dimensional: estimativas a partir da densidade básica*. Madeira: arquitetura e engenharia, 2013. **4**(12).
- [33] *EN 408, Timber structures—Structural timber and glued laminated timber—Determination of some physical and mechanical properties*. 2004: European Committee for Standardization.
- [34] Electronics, L. *EasyLog USB*. Available Disponível: <https://www.lascarelectronics.com/software/easylog-software/easylog-usb/>. Acesso em: 2 abr. 2019.
- [35] Branco, J.M. and P.J. Cruz, *Caracterização mecânica de toros de madeira lamelada colada*. Mecânica Experimental, 2009.
- [36] d’Alva, M.d.B.C., *studo Experimental de Nós de Pórticos de Madeira em Betão Armado Sujeitos à Flexão Simples*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2016, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra: Coimbra, Portugal.
- [37] *ISO 3129, Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. 2012.
- [38] *ISO 13061-1, Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. 2014: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [39] *ISO 13061-2, Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. 2014: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [40] Castellanos, J.R.S., *Dynamic characteristics of 22 woods determined by the tranverse vibration method*. Revista mexicana de ciencias forestales, 2018. **9**: p. 48.

- 
- [41] Castellanos, J.R.S. and J.M.V. Aguilar, *Propiedades acústicas de madera de Fraxinus americana y Fraxinus uhdei*. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 2016. **7**(3).
- [42] Barčík, Š., M. Gašparík, and E.Y. Razumov, *Effect of temperature on the color changes of wood during thermal modification*. Cellulose chemistry and technology, 2015. **49**(9-10): p. 789-798.
- [43] Beleza, S.C.A., *Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem*. 2017.
- [44] *En 384, Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. 2004: European Committee for Standardization.
- [45] *EN 338, Structural timber—Strength classes*. 2009: European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [46] Hibbeler, R.C., *Resistência dos materiais*. 7ª edição ed. 2010, São Paulo, Brasil: Pearson Education.
- [47] Ranta-Maunus, A., *Round small-diameter timber for construction*. Final report of project FAIR CT, 1999: p. 95-0091.
- [48] Roblot, G., et al., *Evaluation of the visual stress grading standard on French Spruce (Picea excelsa) and Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) sawn timber*. Annals of forest science, 2008. **65**(8): p. 812-812.

## ANEXOS

---

### ANEXO I – Resultados prévios dos ensaios de flexão dos provetes de escala reduzida.

Tabela 19 - Amostras de flexão de escala reduzida PD-F.

Amostras	F <sub>máx</sub> [kN]	w [mm]	Tempo [s]
PD-F-1	10,36	31,15	319,2
PD-F-2	11,45	40,99	348,6
PD-F-3	10,07	28,07	312
<b>PD-F-4</b>	<b>5,55</b>	<b>24,96</b>	<b>171,8</b>
PD-F-5	10,68	41,19	327
<b>PD-F-6</b>	<b>5,3</b>	<b>26,07</b>	<b>167</b>
<b>PD-F-7</b>	<b>5,3</b>	<b>17,75</b>	<b>171</b>
PD-F-8	10,06	36,44	301
PD-F-9	12,54	46,3	424,4
PD-F-10	14,11	35,15	426,4
PD-F-11	14,98	45,2	450,8
PD-F-12	7,85	22,55	234,2
PD-F-13	11,14	35,93	401,6
PD-F-14	9,76	36,17	307,6
<b>PD-F-15</b>	<b>2,91</b>	<b>14,56</b>	<b>100,2</b>
PD-F-16	7,345	19,98	218,4
<b>PD-F-17</b>	<b>4,78</b>	<b>20,92</b>	<b>147</b>

---

**ANEXO II – Resultados obtidos do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão dos provetes de escala reduzida.**

Tabela 20 - Amostras de 1330 mm de comprimento e  $h$  de 70 mm.

<b>Amostras</b>	<b><math>E_{m,g}</math> [MPa]</b>	<b><math>f_m</math> [MPa]</b>
S-PD-F-1	7615,17	42
S-PD-F-2	7985,55	48,03
S-PD-F-3	8910,33	42,05
S-PD-F-4	6113,28	23,98
S-PD-F-5	6776,78	45,3
S-PD-F-6	5700,7	20,94
S-PD-F-7	6835,25	21,12
S-PD-F-8	6787,47	39,87
S-PD-F-9	9298,21	49,59
S-PD-F-10	11397,33	56,88
S-PD-F-11	9447,55	60,76
S-PD-F-12	8317,33	31,37
S-PD-F-13	14619,07	50,2
S-PD-F-14	8873,06	39,37
S-PD-F-15	4386,53	11,35
S-PD-F-16	7542,24	28,42
S-PD-F-17	3949,77	17,05

**ANEXO III – Resultados prévios das amostras ensaiadas à compressão axial.**

Tabela 21 – Dados das amostras PD-IC-186

<b>Amostras</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Deslocamento entre placas [mm]</b>	<b>F<sub>máx</sub> [kN]</b>
PD-IC-186-1	268	5,68	56,34
PD-IC-186-2	254	3,04	54,47
PD-IC-186-3	373	2,30	89,31
PD-IC-186-4	253	2,87	54,63
PD-IC-186-5	191	2,45	36,87
PD-IC-186-6	254	2,16	54,54
PD-IC-186-7	249	2,75	51,65
PD-IC-186-8	235	6,30	53,8
PD-IC-186-9	355	3,56	76,94
PD-IC-186-10	353	2,97	76,51

Tabela 22 - Dados das amostras PD-IC-200.

<b>Amostras</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Deslocamento entre placas [mm]</b>	<b>F<sub>máx</sub> [kN]</b>
PD-IC-200-1	282	4,87	64,08
PD-IC-200-2	265	4,34	56,22
PD-IC-200-3	310	3,01	65,87
PD-IC-200-4	298	3,16	55,97
PD-IC-200-5	303	5,12	58,5
PD-IC-200-6	274	3,57	57,61
PD-IC-200-7	315	3,38	66,52
PD-IC-200-8	247	3,54	52,05
PD-IC-200-9	224	3,22	48,72
PD-IC-200-10	278	2,43	60,24

Tabela 23 – Dados das Amostras PD-EM-200.

<b>Amostras</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Deslocamento entre placas [mm]</b>	<b>F<sub>máx</sub> [kN]</b>
PD-EM-200-1	282	2,28	67,03
PD-EM-200-2	265	1,02	77,15
PD-EM-200-3	310	5,83	65,07
PD-EM-200-4	315	4,02	66,3
PD-EM-200-5	215	1,39	39,86
PD-EM-200-6	378	1,45	87,81
PD-EM-200-7	292	3,28	61,95
PD-EM-200-8	254	0,22	58,63
PD-EM-200-9	297	2,09	56,83
PD-EM-200-10	296	1,74	62,57

**ANEXO IV - Resultados obtidos do  $E_{c,0}$  e  $f_{c,0}$  das amostras ensaiadas à compressão axial**

Tabela 24 – Valores determinados dos  $E_{c,0}$  e  $f_{c,0}$  das amostras PD-CI-186.

<b>Amostras</b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	<b>Tensão de compressão [MPa]</b>
PD-CI-186-1	11972,37	26,42
PD-CI-186-2	4582,02	27,06
PD-CI-186-3	14761,31	46,42
PD-CI-186-4	5911,57	26,87
PD-CI-186-5	13836,77	18,22
PD-CI-186-6	5248,66	26,04
PD-CI-186-7	15621,18	25,26
PD-CI-186-8	15291,81	27,19
PD-CI-186-9	12021,6	40,21
PD-CI-186-10	8603,38	39,51

Tabela 25 - Valores determinados dos  $E_{c,0}$  e  $f_{c,0}$  das amostras PD-CI-200.

<b>Amostras</b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	<b>Tensão de compressão [MPa]</b>
PD-CI-200-1	12581,43	30,13
PD-CI-200-2	4962,5	26,83
PD-CI-200-3	7042,04	31,5
PDCI-200-4	11479,44	26,98
PD-CI-200-5	4357,27	29,97
PD-CI-200-6	5473,95	28,8
PD-CI-200-7	8298,15	32,27
PD-CI-200-8	10985,73	25,09
PD-CI-200-9	9624,47	23,21
PD-CI-200-10	14914,13	27,26

Tabela 26 - Valores determinados dos  $E_{c,0}$  e  $f_{c,0}$  das amostras PD-EM-200.

<b>Amostras</b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	<b>Tensão de compressão [MPa]</b>
PD-EM-200-1	3302,58	32,67
PD-EM-200-2	3640,43	35,74
PD-EM-200-3	2376,74	30,57
PD-EM-200-4	3222,7	32,11
PD-EM-200-5	3557,84	18,93
PD-EM-200-6	17742,11	41,27
PD-EM-200-7	2688,02	28,27
PD-EM-200-8	59729,95	27,61
PD-EM-200-9	1139,91	26,86
PD-EM-200-10	17260,16	29,07

**ANEXO V – Resultados obtidos do Coeficiente de Poisson nas direções longitudinal e tangencial**

Tabela 27 –  $\nu_{LT}$  referente as amostras PD-IC-200.

<b>Amostras</b>	<b><math>\nu_{LT}</math></b>
PD-IC-200-1	0,41
PD-IC-200-2	0,27
PD-IC-200-3	0,25
PD-IC-200-4	0,59
PD-IC-200-5	0,44
PD-IC-200-6	0,69
PD-IC-200-7	0,46
PD-IC-200-8	0,66
PD-IC-200-9	0,62
PD-IC-200-10	0,36

**ANEXO VI – Resultados obtidos do teor de humidade, densidades aparente ( $\rho_{ap}$ ) e básica ( $\rho_{bas}$ ).**

Tabela 28 – Valores encontrados do conjunto amostral.

<b>Amostras</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho_{bas}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Teor de humidade [%]</b>
D-1	501,95	402,92	11,39
D-2	518,73	441,51	11,53
D-3	476,75	406,41	11,49
D-4	468,19	392,47	11,65
D-5	465,63	408,72	11,64
D-6	472,01	405,66	11,56
D-7	498,04	404,76	11,61
D-8	489,09	398,62	11,72
D-9	501,93	411,95	11,37
D-10	552,21	441,13	11,47
D-11	465,75	385,72	11,26
D-12	489,76	406,73	11,04
D-13	507,69	416,06	11,48
D-14	473,18	399,09	11,26
D-15	511,32	437,77	11,19
D-16	478,68	413,44	11,53
D-17	477,37	409,55	11,54
D-18	463,49	388,68	11,13
D-19	479,73	398,04	11,24
D-20	483,88	410	10,94
D-21	496,95	404,07	11,33
D-22	509,66	413,2	11,23
D-23	504,66	409,74	11,21
D-24	499,58	403,96	10,86
D-25	509,62	414,08	10,97
D-26	482,23	404,45	10,99
D-27	463,44	393,2	11,17
D-28	522,75	415,54	11,21
D-29	485,73	400,16	11,24
D-30	501,13	410,15	11,19
D-31	471,81	385,28	10,82
D-32	511,66	441,12	10,83
D-33	460,64	401,55	11,15
D-34	465,51	383,56	10,78
D-35	487,02	402,43	10,86
D-36	456,99	386,24	10,76
D-37	494,99	418,16	10,40
D-38	470,16	396,85	10,63
D-39	486,61	416,78	10,49
D-40	497,52	419,48	10,51

**ANEXO VII – Resultados prévios dos ensaios de flexão dos provetes de escala real.**

Tabela 29 – Resultados prévios dos ensaios de flexão à escala real.

<b>Amostras</b>	<b>F<sub>máx</sub> [kN]</b>	<b>w [mm]</b>	<b>Tempo [s]</b>
PD-F-R-1	80,81	31,15	409
PD-F-R-2	32,35	20,5	331
PD-F-R-3	91,18	26,29	314
PD-F-R-4	78,68	32,6	386
PD-F-R-5	89,83	49	346

**ANEXO VIII – Resultados obtidos do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão dos provetes de escala real.**

Tabela 30 – Resultados do módulo de elasticidade global ( $E_{m,g,r}$ ) e resistência à flexão ( $f_{m,r}$ ) dos ensaios em escala real.

<b>Amostras</b>	<b><math>E_{m,g,r}</math> [MPa]</b>	<b><math>f_{m,r}</math> [Mpa]</b>
<b>PD-F-R-1</b>	5830,33	86,58
<b>PD-F-R-2</b>	5656,21	36,21
<b>PD-F-R-3</b>	8061,87	101,91
<b>PD-F-R-4</b>	6569,71	86,8
<b>PD-F-R-5</b>	8576,84	96,87

## ANEXO IX – Gráficos dos ensaios de flexão das amostras PD-F.

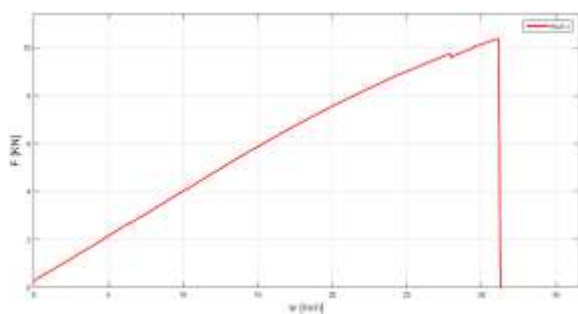


Figura 72 – Provete PD-F-1.

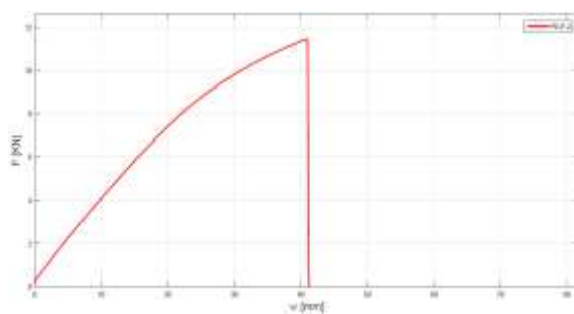


Figura 73 – Provete PD-F-2.

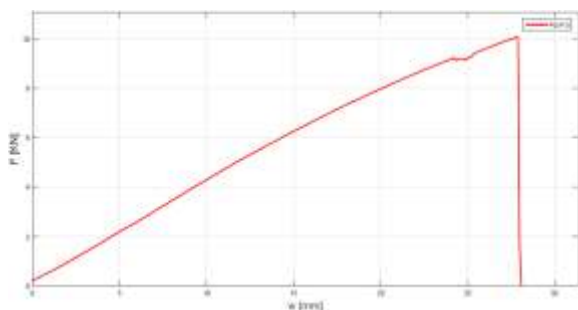


Figura 74 – Provete PD-F-3.

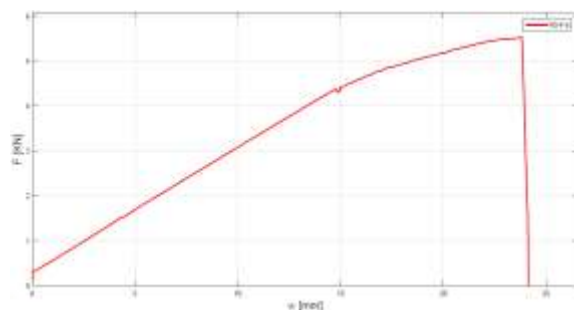


Figura 75 – Provete PD-F-4.

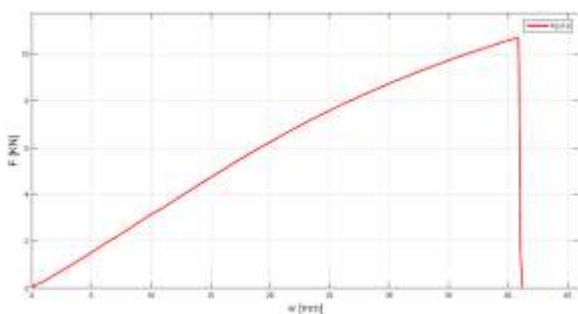


Figura 76 – Provete PD-F-5.

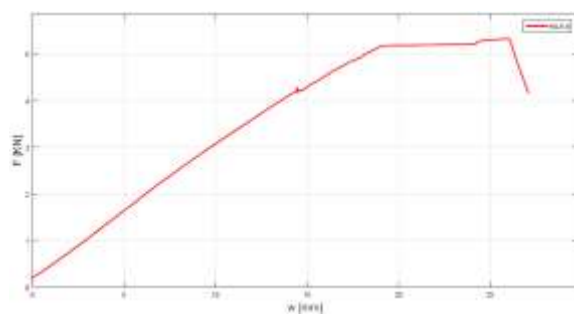


Figura 77 – Provete PD-F-6.

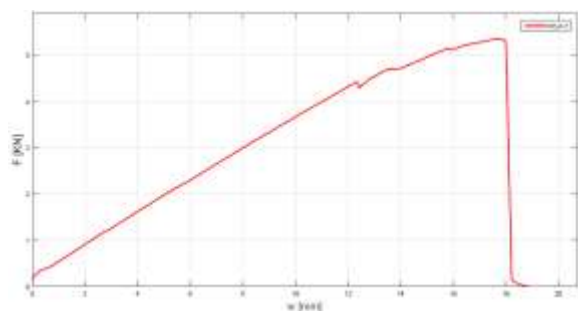


Figura 78 – Provete PD-F-7.

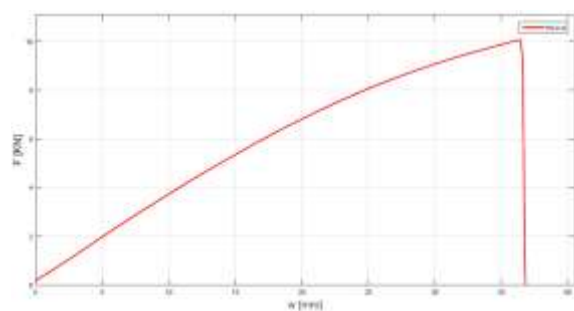


Figura 79 – Provete PD-F-8.

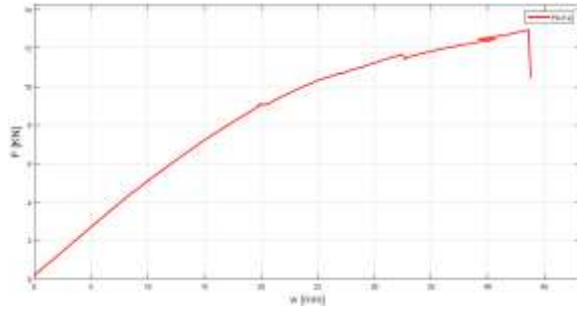


Figura 80 – Provete PD-F-9.

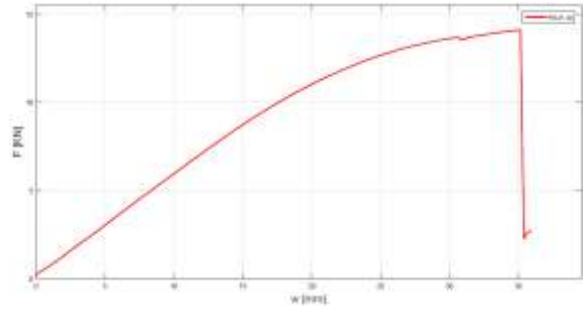


Figura 81 – Provete PD-F-10.

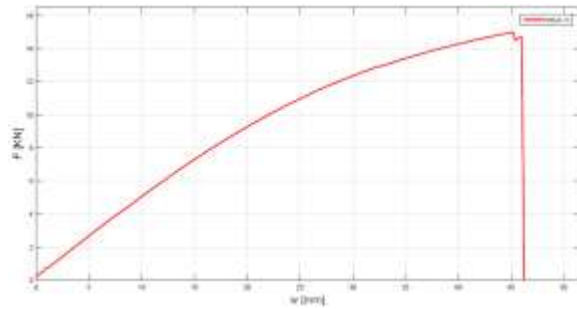


Figura 82 – Provete PD-F-11.

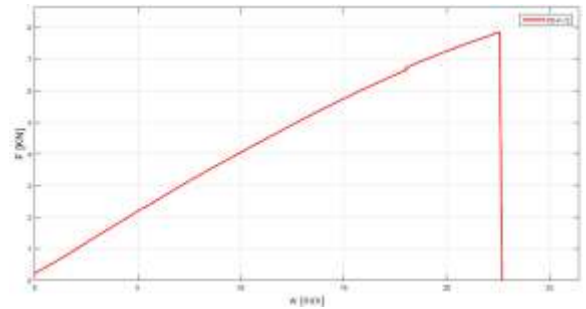


Figura 83 – Provete PD-F-12.

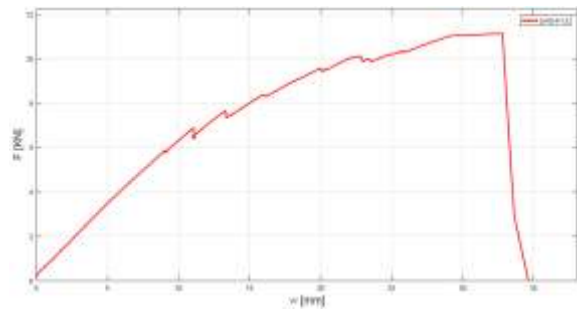


Figura 84 – Provete PD-F-13.

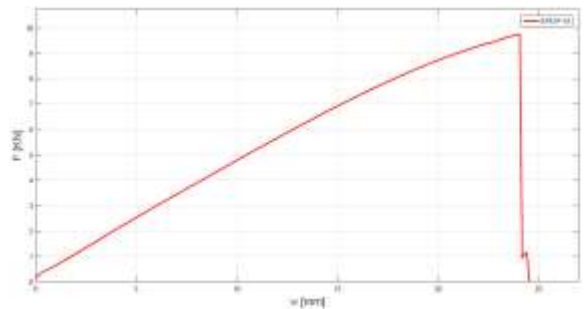


Figura 85 – Provete PD-F-14.

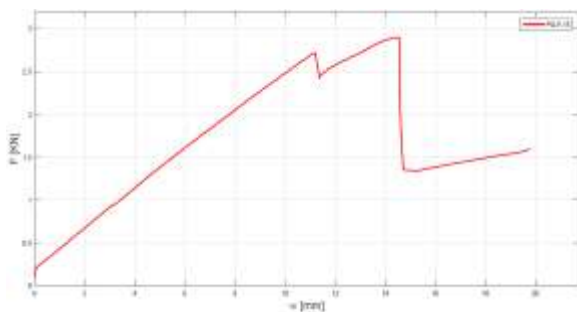


Figura 86 – Provete PD-F-15.

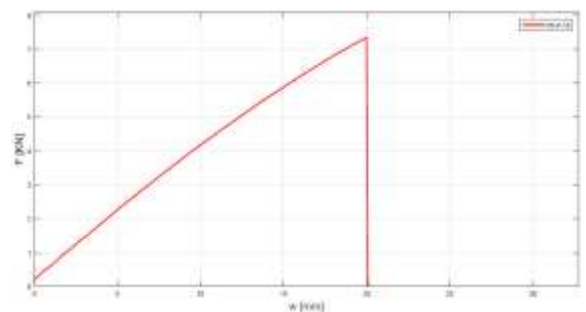


Figura 87 – Provete PD-F-16.

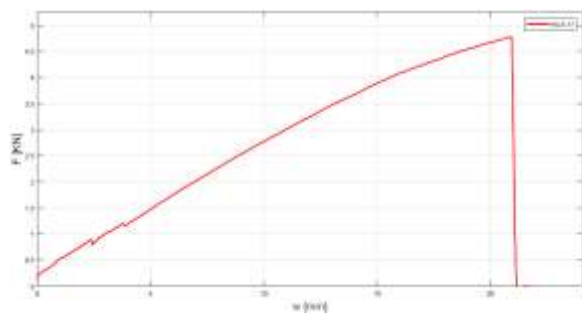


Figura 88 – Proverte PD-F-17.

**ANEXO X– Gráficos dos ensaios de flexão de escala real das amostras PD-F-R.**

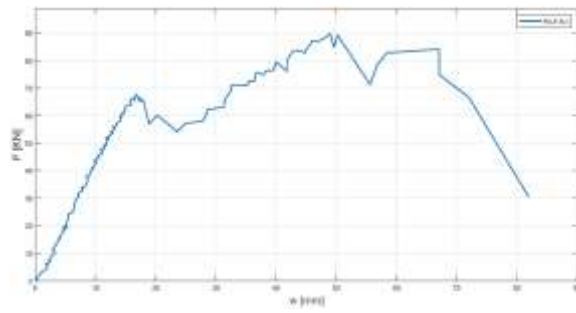


Figura 89 – Provete PD-F-R-1.

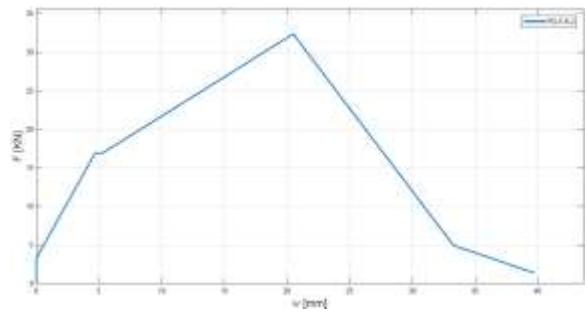


Figura 90 – Provete PD-F-R-2.

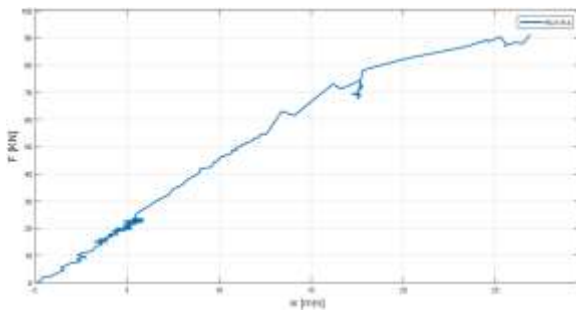


Figura 91 – Provete PD-F-R-3.

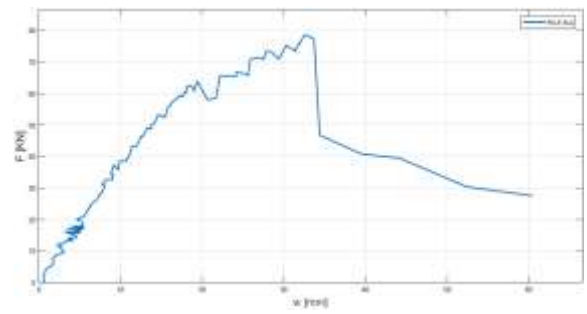


Figura 92 – Provete PD-F-R-4.

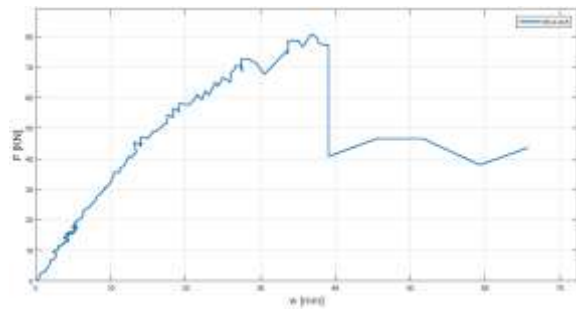


Figura 93 – Provete PD-F-R-5.

## ANEXO XI– Gráficos dos ensaios de compressão axial das amostras PD-IC-186.

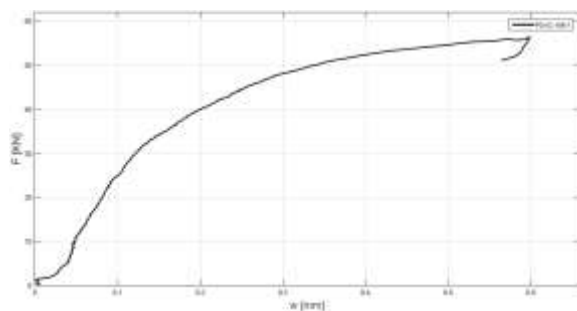


Figura 94 – Provete PD-IC-186-1.

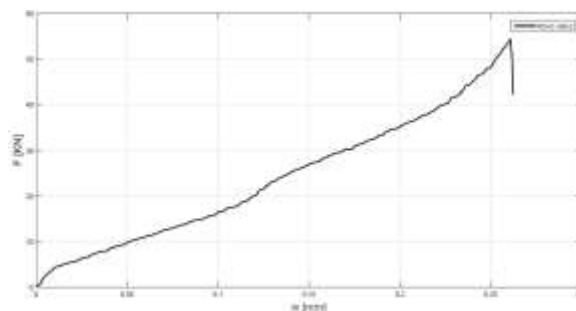


Figura 95 – Provete PD-IC-186-2.

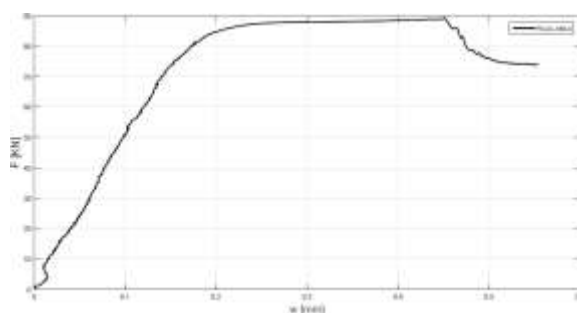


Figura 96 – Provete PD-IC-186-3.

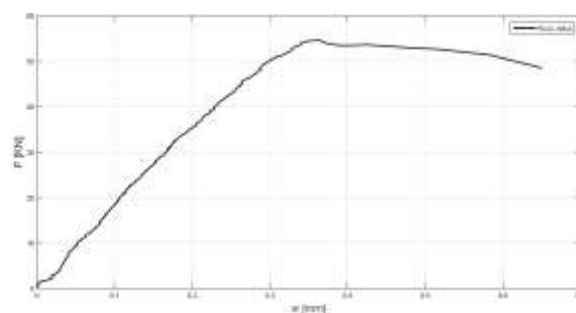


Figura 97 Provete PD-IC-186-4.

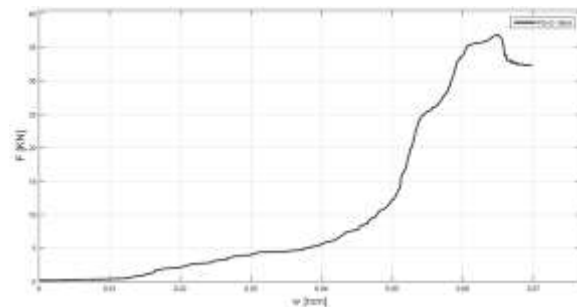


Figura 98 – Provete PD-IC-186-5.

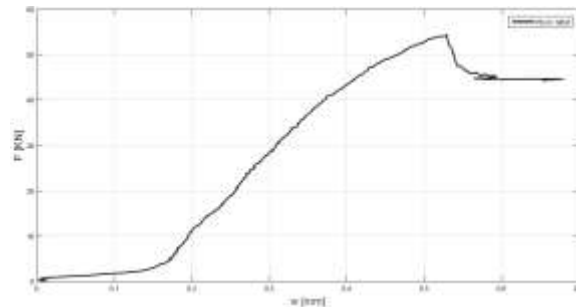


Figura 99 – Provete PD-IC-186-6.

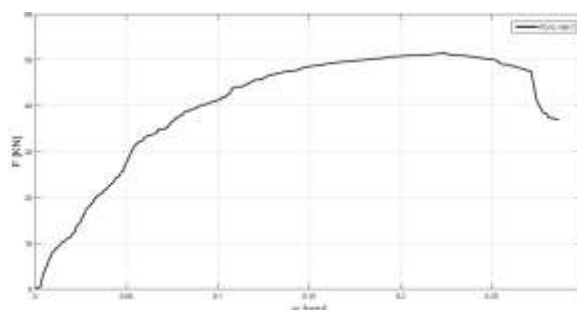


Figura 100 – Provete PD-IC-186-7.

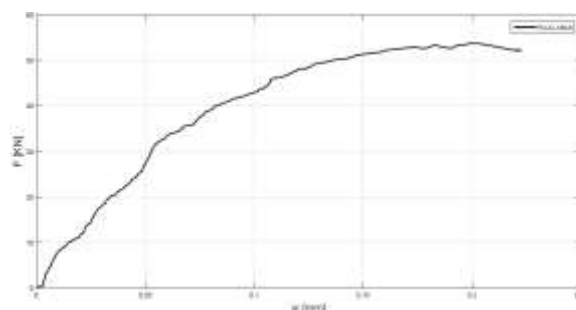


Figura 101 – Provete PD-IC-186-8.

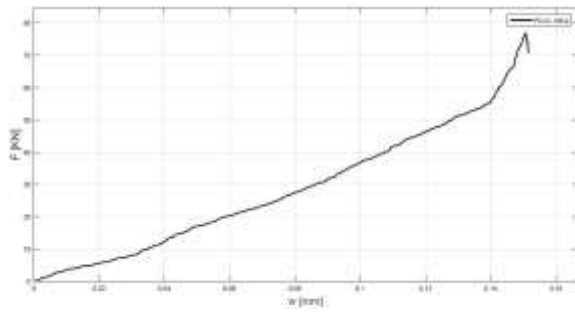


Figura 102 – Provete PD-IC-186-9.

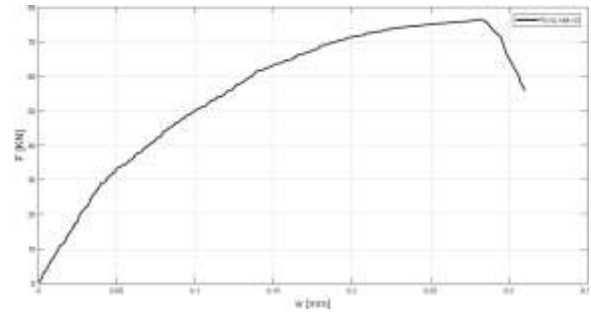


Figura 103 – Provete PD-IC-186-10.

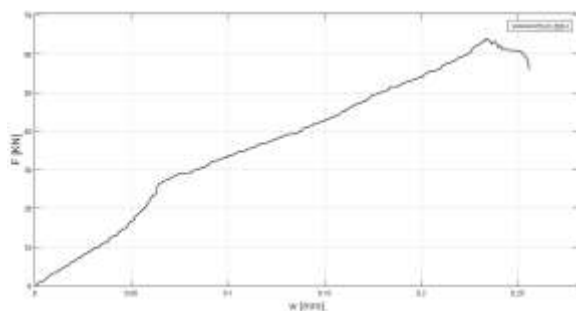
**ANEXO XII– Gráficos dos ensaios de compressão axial das amostras PD-IC-200.**

Figura 104 – Provette PD-IC-200-1.

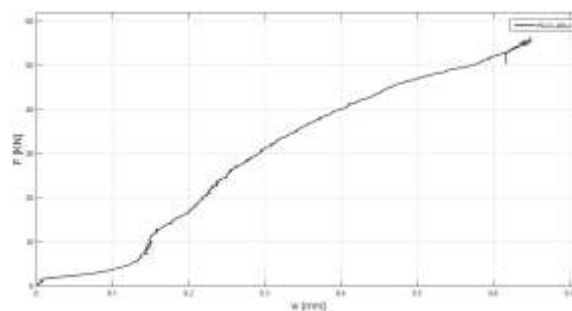


Figura 105 – Provette PD-IC-200-2.

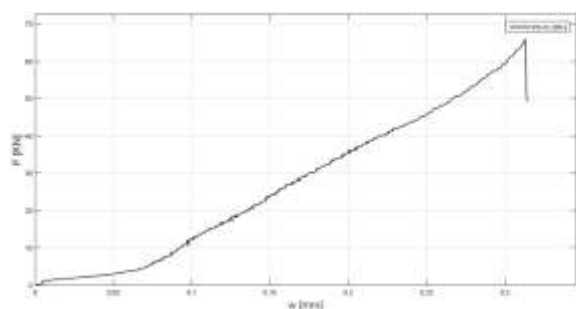


Figura 106 – Provette PD-IC-200-3.

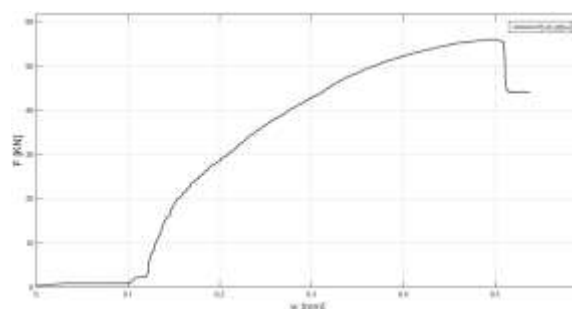


Figura 107 – Provette PD-IC-200-4.

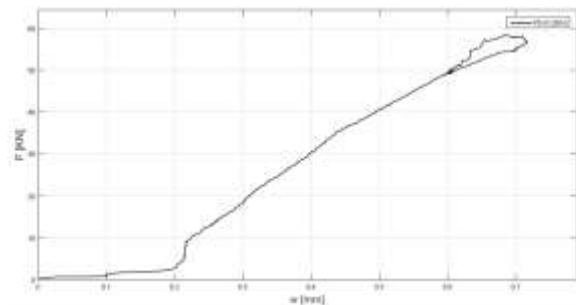


Figura 108 – Provette PD-IC-200-5.

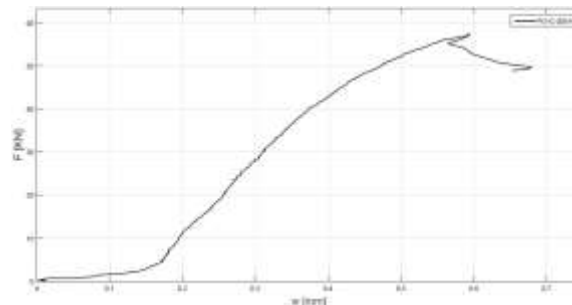


Figura 109 – Provette PD-IC-200-6.

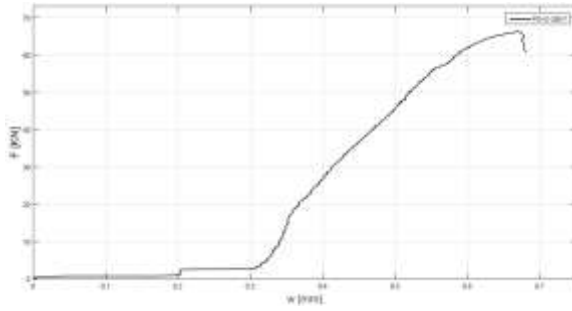


Figura 110 – Provete PD-IC-200-7.

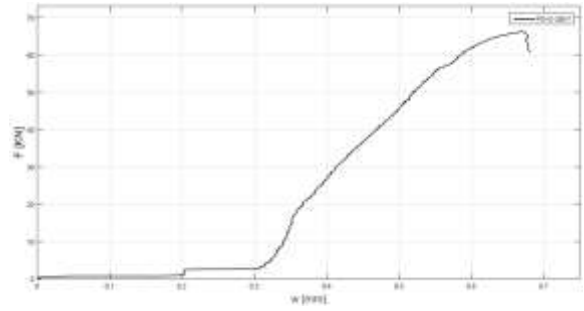


Figura 111 – Provete PD-IC-200-7.

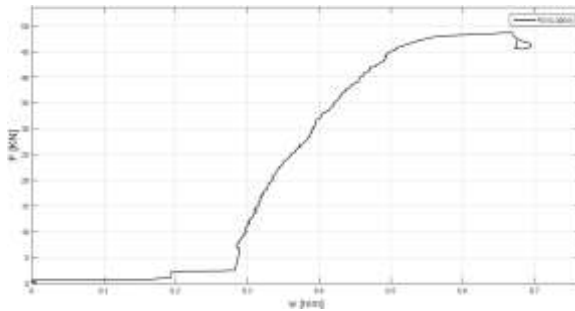


Figura 112 – Provete PD-IC-200-9.

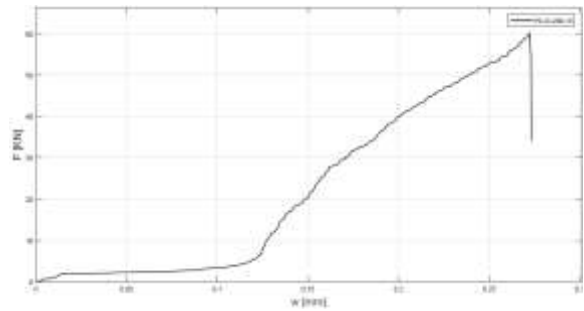


Figura 113 – Provete PD-IC-200-10.

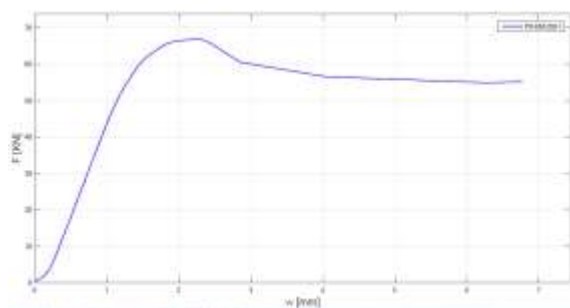
**ANEXO XIII– Gráficos dos ensaios de compressão axial das amostras PD-EM-200.**

Figura 114 – Provete PD-EM-200-1.

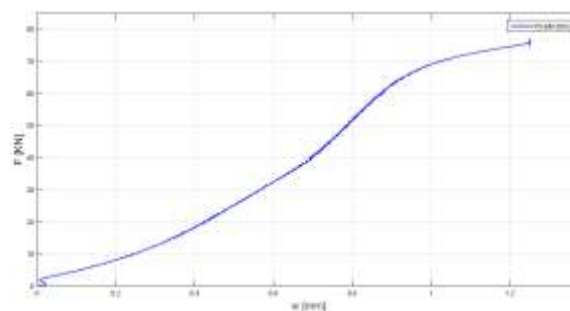


Figura 115 – Provete PD-EM-200-2.

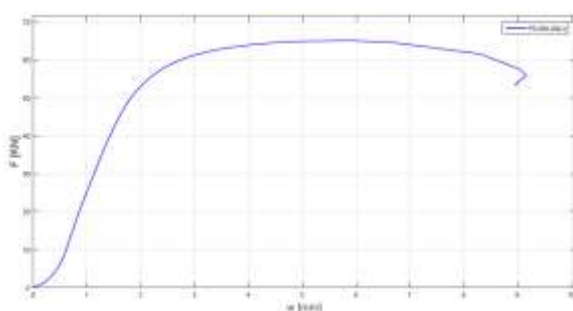


Figura 116 – Provete PD-EM-200-3.

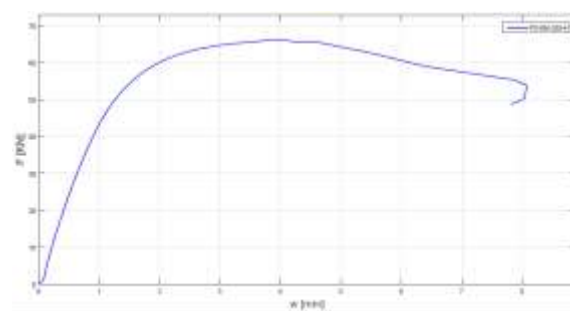


Figura 117 – Provete PD-EM-200-4.

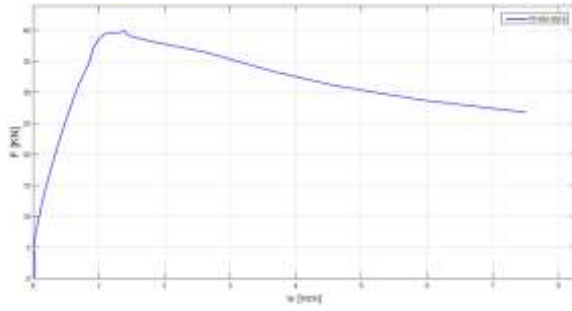


Figura 118 – Provete PD-EM-200-5.

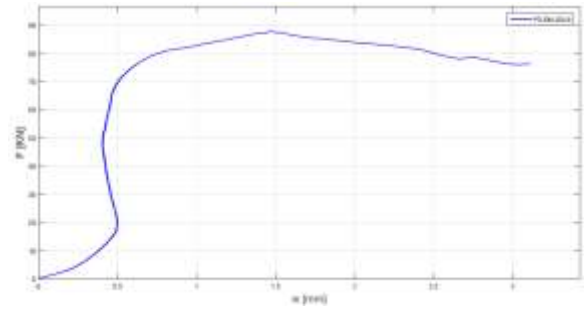


Figura 119 – Provete PD-EM-200-6.

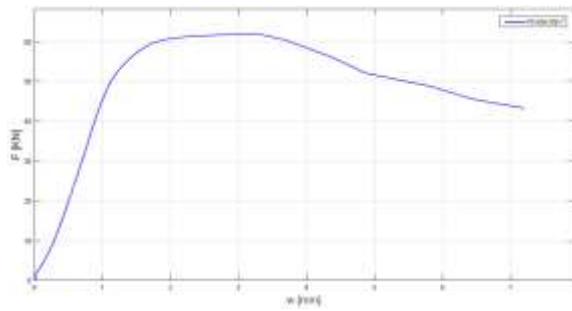


Figura 120 – Provete PD-EM-200-7.

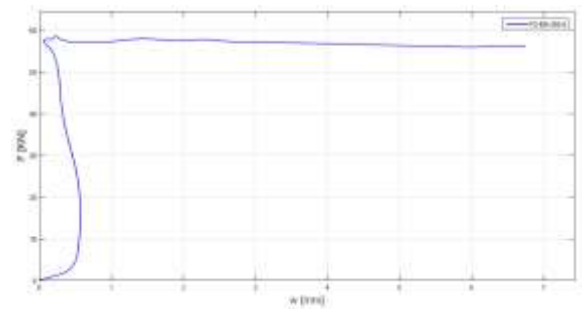


Figura 121 – Provete PD-EM-200-8.

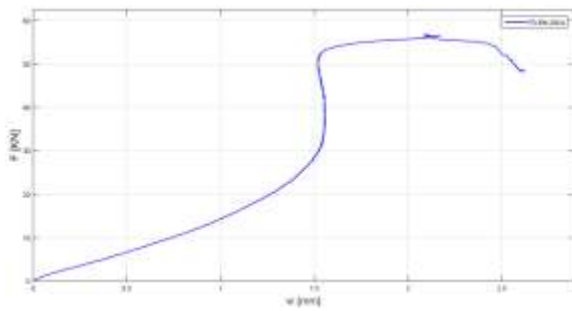


Figura 122 – Provete PD-EM-200-9.

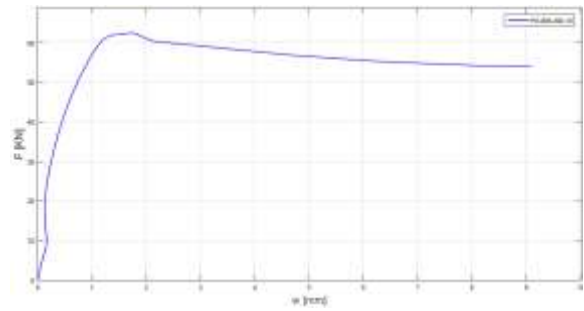


Figura 123 – Provete PD-EM-200-10.

**ANEXO XIV – Resultados dos valores característicos de acordo com classe de resistência.**

Tabela 31 – Valores característicos para o Abeto de Douglas de acordo com a norma Europeia EN 338: 2009, classe de resistência C18.

	Símbolo	Classe C18
<b>Propriedades de resistência [N/mm<sup>2</sup>]</b>		
Valor característico da resistência à flexão	$f_{m,k}$	18
Valor característico da tração paralela ao grão	$f_{t,0,k}$	11
Valor característico da resistência de tração perpendicular ao grão	$f_{t,90,k}$	0,4
Valor característico da resistência de compressão paralela ao grão	$f_{c,0,k}$	18
Valor característico da resistência de compressão perpendicular ao grão	$f_{c,90,k}$	2,2
Valor característico da resistência de cisalhamento	$f_{v,k}$	3,4
<b>Propriedades de rigidez [kN/mm<sup>2</sup>]</b>		
Valor característico do módulo médio de elasticidade paralelo	$E_{0,méd}$	9
5 % do módulo de elasticidade paralelo	$E_{0,05}$	6
Média do módulo de elasticidade transversal	$E_{90,méd}$	0,30
Módulo de cisalhamento médio	$G_{méd}$	0,56
<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>		
Valor característico da densidade	$\rho_k$	320
Valor médio da densidade	$\rho_{méd}$	380



## FICHA TÉCNICA

### ABETO DE DOUGLAS

<b>Família:</b>	PINACEAE (gimnospermas)
<b>Nome Científico:</b>	Pseudotsuga menziesii
<b>Nome Latim:</b>	Pseudotsuga menziesii Franco. Pseudotsuga douglasii Carr

DESCRIÇÃO DA MADEIRA	DESCRIÇÃO DO TORO
<b>Cor de referência:</b> Castanho rosado	<b>Diâmetro:</b> de 50 a 80cm
<b>Borne:</b> Bem distinto	<b>Espessura do Borne:</b> de 5 a 10cm
<b>Cerne:</b> Médio	<b>Conservação na floresta:</b> Fraco (deve ser tratado)
<b>Fio:</b> Direito	
<b>Contra - fio:</b> Isento	

### PROPRIEDADES FÍSICAS

<b>Densidade aparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	488
<b>Densidade básica [kg/m<sup>3</sup>]</b>	407
<b>Teor de humidade [%]</b>	11

Nota: O teor de humidade foi obtido em ambiente segundo os padrões de referência (20 ± 2) °C e (65 ± 5) % de humidade relativa

### PROPRIEDADES MECÂNICAS

<b>Módulo de elasticidade global na flexão [MPa]</b>	8964
<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	44
<b>Módulo de elasticidade na compressão paralela as fibras [MPa]</b>	8971
<b>Resistência à compressão paralela as fibras [MPa]</b>	29

Nota: As propriedades mecânicas foram determinadas em ambiente segundo os padrões de referência (20 ± 2) °C e (65 ± 5) % de humidade relativa

---



---

**VALORES CARACTERÍSTICOS PARA O ABETO DE DOUGLAS DE ACORDO  
COM A NORMA EUROPEIA EN 338: 2009, CLASSE DE RESISTÊNCIA C18.**

---

**Classe C18**

---

**Propriedades de resistência [N/mm<sup>2</sup>]**

---

<b>Valor característico da resistência à flexão</b>	<b>18</b>
<b>Valor característico da tração paralela ao grão</b>	<b>11</b>
<b>Valor característico da resistência de tração perpendicular ao grão</b>	<b>0,4</b>
<b>Valor característico da resistência de compressão paralela ao grão</b>	<b>18</b>
<b>Valor característico da resistência de compressão perpendicular ao grão</b>	<b>2,2</b>
<b>Valor característico da resistência de cisalhamento</b>	<b>3,4</b>

---

**Propriedades de rigidez [kN/mm<sup>2</sup>]**

---

<b>Valor característico do módulo médio de elasticidade paralelo</b>	<b>9</b>
<b>5 % do módulo de elasticidade paralelo</b>	<b>6</b>
<b>Média do módulo de elasticidade transversal</b>	<b>0,30</b>
<b>Valor do módulo de cisalhamento médio</b>	<b>0,56</b>

**Densidade [kg/m<sup>3</sup>]**

<b>Valor característico da densidade</b>	<b>320</b>
<b>Valor médio da densidade</b>	<b>380</b>

---