

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Ana Lúcia Crespo Oliveira

**TAXA DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS DE ESPÉCIES FOLHOSAS E
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO ANGELIM-VERMELHO EM ALTAS
TEMPERATURAS**

Belo Horizonte

2019

Ana Lúcia Crespo Oliveira

**TAXA DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS DE ESPÉCIES FOLHOSAS E
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO ANGELIM-VERMELHO EM ALTAS
TEMPERATURAS**

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Belo Horizonte

2019

O48t

Oliveira, Ana Lúcia Crespo.

Taxa de carbonização de madeiras de espécies folhosas e características mecânicas do angelim-vermelho em altas temperaturas [recurso eletrônico] / Ana Lúcia Crespo Oliveira. - 2019.

1 recurso online (247 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 200-247.

Bibliografia: f. 184-199.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Altas temperaturas - Teses. 3. Carbonização - Teses. 4. Temperatura de transição vítrea - Teses. I. Mantilla Carrasco, Edgar Vladimiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

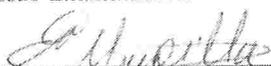
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

"TAXA DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS DE ESPÉCIES FOLHOSAS
E CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO ANGELIM VERMELHO EM
ALTAS TEMPERATURAS"

Ana Lúcia Crespo Oliveira

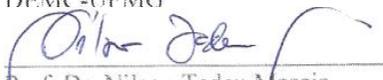
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas da Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de "Doutor em Engenharia de
Estruturas".

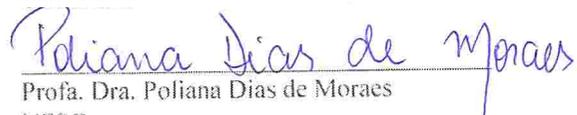
Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
TAU - ARQUITETURA/UFMG (Orientador)


Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG


Prof. Dr. Eduardo Chahud
DEMC-UFMG


Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
UNICAMP


Profa. Dra. Poliana Dias de Moraes
UFSC

Belo Horizonte, 11 de dezembro de 2019

A Deus, Pai e Criador de todo o Universo, ao
meu esposo H3lio, ao nosso filho Lucas, aos
meus Pais, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de todo Amor e Sabedoria;

Ao estimado orientador, Prof. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, pela amizade e orientações precisas e por compartilhar seu tempo e conhecimento;

Aos demais participantes da banca examinadora: Profa. Poliana Dias de Moraes, Prof. Eduardo Chahud, Prof. Francisco Carlos Rodrigues e Prof. Nilson Tadeu Mascia, por todos os comentários e sugestões, valiosos e imprescindíveis para a cristalização deste trabalho;

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Departamento de Engenharia de Estruturas, por toda a estrutura de trabalho e de pesquisa disponibilizada; aos estimados professores; técnicos dos laboratórios: Geraldo, Afonso e Marcos; aos funcionários: Fátima, Inês, Iracema, Patrícia, Lucíola, Juliana e Eliezer, por toda a atenção a mim dispensada, sempre generosa;

À Profa. Maria Irene Yoshida, pela disponibilização dos equipamentos e análises realizadas no Laboratório de Análise Térmica do Departamento de Química - Instituto de Ciências Exatas;

Aos meus saudosos e queridos Pais, Lysandro Albernaz Crespo e Maria Christina dos Santos Crespo, *In memoriam*, pela oportunidade da vida, pelos exemplos constantes, compreensão e confiança em mim depositados; meu Pai foi sempre, para mim, um exemplo de profissional estudioso e responsável na profissão que abraçou, a Engenharia Civil; minha Mãe, um exemplo de amor incondicional;

Ao meu esposo Hélio Nonato e ao nosso filho, Lucas Crespo, pelo amor e parceria, diários;

Aos meus irmãos, Lysandro Jr., Eduardo, Tereza, Neio, Scheila, Cristina e Andréa e todos os familiares muito queridos, pela torcida e paciência;

Aos colegas da Pós-Graduação pelo apoio, colaboração, idéias e sugestões e pela amizade e alegre convivência que para sempre serão lembrados; à Sílvia dos Santos Pereira e Rosália Gusmão de Lima, pelo companheirismo no início desta caminhada e à Rejane Costa Alves, Vinnícius Pizzol e Mônica Smits, por compartilharmos os desafios dos ensaios experimentais;

A todos que de forma direta ou indireta participaram e colaboraram para a minha formação acadêmica e pessoal dentro e fora da Universidade;

Aos órgãos de fomento, FAPEMIG e CAPES, pelo auxílio neste trabalho;

Muito obrigada!!

RESUMO

Para o dimensionamento das estruturas de madeira em situação de incêndio dois parâmetros são considerados básicos: a taxa de carbonização das madeiras e a espessura da camada com assumida resistência e módulo de elasticidade zero. Ambos os parâmetros contribuem para a determinação da profundidade efetiva de carbonização de um determinado elemento estrutural em madeira. Amostras de treze espécies folhosas de densidades aparentes entre 500 e 1300 kg/m³, a 12% de teor de umidade, foram submetidas à carbonização com exposição ao fogo padrão da ISO 834. Verificou-se que madeiras com a mesma densidade aparente podem apresentar taxas de carbonização diferentes, em função do tipo de obstrução nos vasos. Esta constatação orientou o agrupamento das espécies em função das características de obstruções nos vasos, sendo: agrupamento 1, para as espécies que apresentam todos ou alguns vasos obstruídos por depósitos associados ou não às tiloses, e agrupamento 2, para as espécies que apresentam vasos obstruídos somente por tiloses. Para cada agrupamento foram determinados modelos para a predição da profundidade de carbonização e, por derivação, modelos para a predição da taxa de carbonização. O modelo desenvolvido para o agrupamento 1 apresenta, como variáveis preditoras, a densidade aparente e o tempo de exposição ao fogo enquanto o modelo desenvolvido para o agrupamento 2, apresenta somente o tempo de exposição ao fogo como variável preditora. Foram propostos modelos para os gradientes de temperatura no interior dos corpos de prova para ambos os agrupamentos. Para períodos de 20 e 30 min sob a exposição ao fogo padrão, a estabilização da temperatura ocorre à profundidade de 50 mm. Foram realizados, também, ensaios de calorimetria exploratória para a verificação da estabilidade térmica da madeira da espécie angelim-vermelho (*Dinizia excelsa Ducke*) assim como a avaliação da influência da temperatura nas características mecânicas dessa mesma espécie, na faixa de 40 a 240 °C. Como consequência, são propostos fatores de modificação das propriedades mecânicas para a espécie *Dinizia excelsa Ducke* nas condições quente e arrefecida. Por fim, correlacionando o modelo de gradiente de temperatura desenvolvido para o agrupamento 1 com a segunda temperatura média de transição vítrea, determinada para a espécie *Dinizia excelsa Ducke*, calculou-se a espessura da camada assumida de resistência zero confirmando o valor adotado nas normas técnicas.

Palavras-chave: Folhosas. Taxa de carbonização. Tiloses e depósitos nos vasos. Temperatura de transição vítrea. Espessura da camada de resistência zero.

ABSTRACT

For the structural fire design of timber structures, two parameters are considered basic: the charring rate and the depth of layer with assumed zero strength and stiffness. Both parameters contribute to the determination of the effective charring depth of a given structural timber element. Samples of thirteen hardwood species with specific gravity between 500 and 1300 kg/m³, at 12% moisture content, were subjected to carbonization with exposure to the ISO 834 standard fire. It was found that wood with the same specific gravity may present different charring rates, depending on the type of obstruction in the vessel. This finding guided the grouping of species according to the characteristics of obstructions in the vessels, being: cluster 1, for species that have all or some vessels obstructed by deposits associated or not with tylosis, and cluster 2, for species that have obstructed vessels only for tylosis. Models for prediction of charring depth were determined for each cluster and, by derivation, models for prediction of charring rate. The model developed for cluster 1 presents, as predictor variables, the specific gravity and the time of exposure to fire while the model developed for cluster 2, presents only the time of exposure to fire as a predictor variable. Models for temperature gradients within the specimens were proposed for both groups. It was found that for periods of 20 and 30 min under exposure to standard fire, temperature stabilization occurs at a depth of 50 mm. Exploratory calorimetry tests were also carried out to verify the thermal stability of the wood of the species angelim-vermelho (*Dinizia excelsa Ducke*) as well as the evaluation of the influence of temperature on the mechanical characteristics of the same species, in the range of 40 to 240 °C. As a consequence, factors for modifying the mechanical properties of *Dinizia excelsa Ducke* in hot and cool conditions are proposed. Finally, by correlating the temperature gradient model developed for cluster 1 with the second average glass transition temperature, determined for the species *Dinizia excelsa Ducke*, the depth of layer with zero strength was calculated, confirming the value adopted in the technical standards.

Keywords: Hardwood. Charring rate. Tyloses and deposits in the vessels. Glass-transition temperature. Depth of layer with zero strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa mundi – Florestas tropicais, destaque em tom verde escuro.....	26
Figura 2.2 – Passagem de fluidos pela madeira.....	32
Figura 2.3 – Vasos obstruídos por tiloses.....	35
Figura 2.4 – Gomas- depósitos em seções de angelim-pedra: (a) Tangencial, (b) Transversal....	37
Figura 2.5 – Níveis de carbonização na madeira carbonizada.....	47
Figura 2.6 - Processos químicos e físicos em madeira carbonizada.....	48
Figura 2.7 - Fases e evolução do incêndio na edificação com base em material celulósico	66
Figura 2.8- Curva temperatura-tempo para o incêndio-padrão.....	67
Figura 2.9 - Estrutura aporticada/MLC/Morrison Printing Inks Machinery Ltd pós incêndio.....	71
Figura 2.10 – Definição de seção transversal residual e seção transversal efetiva.....	72
Figura 2.11 – Caracterização mecânica em seção transversal de espécie <i>Douglas-fir</i>	82
Figura 2.12 – Relação tensão-deformação (paralela às fibras da madeira) em diferentes temperaturas com plasticidade apenas na compressão.	88
Figura 3.1 – Famílias de espécies madeireiras estudadas nesta tese.....	99
Figura 3.2 – Imagens dos corpos de prova de sete das treze espécies estudadas.....	100
Figura 3.3 – Materiais termoresistentes: (a) placa durabord, (b) manta de fibra cerâmica.....	100
Figura 3.4 – Suporte: (a) com 5 furos e 1 aba lateral; (b) com 5 furos e 5 abas frontais	101
Figura 3.5 – Sensores de temperatura, termopar tipo K	103
Figura 3.6 – Esquema do forno a gás GLP para ensaios de carbonização.....	104
Figura 3.7– Esquema dos corpos de prova para ensaio de carbonização. Unid.: (mm).....	105
Figura 3.8 – Modo de preparação e isolamento dos corpos de prova.....	107
Figura 3.9 – Corpo de prova instrumentado para o ensaio de carbonização	107
Figura 3.10 – Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras	114
Figura 3.11 – Preparação para o ensaio de compressão paralela às fibras	117
Figura 3.12 – Aquecimento de corpos de prova de tração: (a) na estufa e (b) no mufla.....	118
Figura 3.13 – Preparação para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	120
Figura 4.1 – Relacionamento entre os agrupamentos A1 e A2 e os valores médios de massa específica aparente, reportadas a 12% de teor de umidade ($d_{ap,m12\%}$).....	129
Figura 4.2 – Análise da temperatura atuando nas superfícies dos corpos de prova.....	130
Figura 4.3 – Resultados do isolamento dos corpos de prova da espécie vinhático.....	131

Figura 4.4 – Corpos de prova da espécie vinhático após exposição ao fogo padrão por períodos de 15 min, 30 min e 60 min.....	132
Figura 4.5 – Taxa de carbonização versus intervalos de densidade para amostras.....	133
Figura 4.6 – Taxa de carbonização versus intervalos de densidade aparente com destaque para intervalo de 700 -1000 kg/m ³	134
Figura 4.7 – Teste simultâneo Games-Howell para avaliar diferenças de médias.....	136
Figura 4.8 – Modelos de taxa de carbonização propostos versus prescrições normativas.....	138
Figura 4.9 – Seções de MLC de <i>Eucalyptus sp</i> (Lyptus) antes e após exposição.....	142
Figura 4.10 – Tempo de carbonização para <i>Dinizia excelsa Ducke</i>	144
Figura 4.11 – Tempo de carbonização para <i>Hymenolobium petraeum Ducke</i>	144
Figura 4.12 – Tempo de carbonização para <i>Astronium lecointei</i>	145
Figura 4.13 – Tempo de carbonização para <i>Caryocar brasiliense Cambess</i>	145
Figura 4.14 – Gradientes de temperatura para tempos de 20, 30 e 60 min relacionados com a profundidade para espécies folhosas do Agrupamento 1.....	146
Figura 4.15 – Gradientes de temperatura para tempos de 20, 30 e 60 min relacionados com a profundidade para espécies folhosas do Agrupamento 2.....	147
Figura 4.16 - Estabilização das temperaturas no interior das amostras de folhosas.....	148
Figura 4.17 – Termogramas DSC para <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho AV1 e AV2.....	150
Figura 4.18 - Termogramas DSC para <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho AV3 e AV4.....	151
Figura 4.19 - Termogramas DSC para <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho AV5 e AV6.....	152
Figura 4.20 - Termogramas DSC para amostras AV7.....	153
Figura 4.21 – Temperaturas de transição vítrea, T _g , para <i>Dinizia excelsa Ducke</i>	154
Figura 4.22 – Análise termogravimétrica da espécie <i>Dinizia excelsa Ducke</i>	155
Figura 4.23 – Teores médios de umidade e de massa em corpos de prova de compressão paralela às fibras sob gradientes de 20 a 240 °C.....	157
Figura 4.24 – Teores médios de umidade e massa em corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras sob gradientes de 20 a 240 °C.....	158
Figura 4.25– Densidade aparente para a <i>Dinizia excelsa Ducke</i> (angelim-vermelho).....	159
Figura 4.26 – Modos de ruptura na compressão paralela às fibras.....	160
Figura 4.27 – Desvio da grã em <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho.....	161

Figura 4.28 – Influência das temperaturas nas resistências características na <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho na condição quente.....	164
Figura 4.29 – Influência das temperaturas nas resistências características na <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho na condição arrefecido.....	164
Figura 4.30 – Módulos de elasticidade característicos à compressão e à tração na condição quente na <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho.....	166
Figura 4.31 – Módulos de elasticidade característicos à compressão e à tração na condição arrefecido na <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho...	166
Figura 4.32 – Resistência característica à compressão paralela às fibras normalizada nas condições quente (Q) e arrefecido (A).....	168
Figura 4.33 – Resistência característica à tração paralela às fibras normalizada nas condições quente (Q) e arrefecido (A).....	169
Figura 4.34 – Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras normalizado nas condições quente (Q) e arrefecido (A).....	169
Figura 4.35 – Módulos de elasticidade na compressão paralelos às fibras normalizados nas condições quente (Q) e arrefecido (A).....	170
Figura 4.36 – Módulos de elasticidade na tração paralela às fibras normalizados nas condições quente (Q) e arrefecido (A).....	170
Figura 4.37 – Tempo de carbonização para angelim-vermelho (corpo de prova AV1).....	174
Figura 4.38 - Resistências relativas à compressão paralela às fibras de diferentes madeiras sob altas temperaturas.....	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Teores de extrativos de madeiras folhosas de diversas densidades.....	30
Tabela 2.2 – Forças primárias e secundárias nos polímeros.....	31
Tabela 2.3 – Fatores que governam a taxa de carbonização.....	54
Tabela 2.4 – Taxa de carbonização de espécies analisadas em White (1988a).....	58
Tabela 2.5 – Taxa de carbonização de espécies australianas (Gardner e Syme, 1991).....	59
Tabela 2.6 – Metodologias para ensaio de carbonização da madeira com função estrutural, em forno a gás.....	63
Tabela 2.7 – Taxas de carbonização da madeira segundo EN 1995-1-2 (2004).....	72
Tabela 2.8 – Profundidade efetiva de carbonização para seção transversal de folhosas para $d_m \geq 529 \text{ kg/m}^3$ segundo a EN 1995-1-2 (2004).....	73
Tabela 2.9 – Profundidade de carbonização e profundidade efetiva de carbonização segundo AWC-ANSI/NDS – 2018(a) (b).....	77
Tabela 2.10 – Fatores de ajuste para o projeto de incêndio para madeira na forma serrada.....	78
Tabela 2.11 – Modelos para predição de taxas de carbonização e profundidades de carbonização.....	79
Tabela 2.12 – Equações normalizadas para cálculo dos coeficientes de modificação ($k_{w0,T}$) das resistências características à compressão ($f_{c0,kT}$) e cisalhamento ($f_{v0,kT}$) paralelos às fibras de 20 a 230°C para <i>Eucalyptus saligna</i>	87
Tabela 2.13 – Equações normalizadas para cálculo dos coeficientes de modificação ($k_{w0,T}$) das resistências características à compressão ($f_{c0,kT}$) e cisalhamento ($f_{v0,kT}$) paralelos às fibras de 20 a 230°C para <i>Schizolobium amazonicum</i>	87
Tabela 4.1 – Caracterização física da amostra ensaiada.....	126
Tabela 4.2 – Classificação da amostra quanto às obstruções nos vasos.....	128
Tabela 4.3 – Informações sobre as médias nos 4 intervalos de densidade aparente.....	135
Tabela 4.4 – Diferenças de médias nos 4 intervalos de densidade, teste Games-Howell.....	135
Tabela 4.5 – Diferença de níveis e de médias nos 4 intervalos de densidade, teste Games-Howell.....	135
Tabela 4.6 – Modelos para predição da profundidade de carbonização unidimensional para Agrupamento 1 (PA1) e Agrupamento 2 (PA2).....	137
Tabela 4.7 – Modelos para predição da taxa de carbonização unidimensional.....	137
Tabela 4.8 – Profundidades de carbonização para cupiúba (<i>Goupia glaba Aubl</i>).....	140
Tabela 4.9 – Profundidades de carbonização para <i>Eucalyptus</i>	141

Tabela 4.10 – Profundidades de carbonização para <i>Eucalyptus sp.</i> (MLC de Lyptus).....	143
Tabela 4.11 – Modelos para gradientes de temperatura relacionados com a profundidade (P) para espécies folhosas dos Agrupamentos A1 e A2.....	147
Tabela 4.12 – Modelos para gradientes de temperatura relacionados com a profundidade (P) para espécie <i>Dinizia excelsa Ducke</i> – angelim vermelho (AV).....	149
Tabela 4.13 – Modelos de fatores de modificação da resistência e da rigidez para a madeira de <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho, sob temperaturas de 40 °C a 240 °C nas condições quente (Q) e arrefecida (A).....	172
Tabela 4.14 – Espessura da camada de resistência zero para <i>Dinizia excelsa Ducke</i> - angelim-vermelho para $T_g = 191,52$ °C.....	174
Tabela 4.15 – Características de madeiras folhosas por ordem crescente de densidade.....	175
Tabela 5.1 – Modelos de gradientes de temperatura (T, °C) relacionados com a profundidade (P, mm) para espécies folhosas dos Agrupamentos A1 e A2.....	179
Tabela 5.2 – Fatores de modificação das resistências (compressão, tração e cisalhamento) e dos módulos de elasticidade da espécie <i>Dinizia excelsa Ducke</i> para temperaturas, T, de 40 a 240 °C.....	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
AS	Australian Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWC	American Wood Council
BS	British Standard
CCWD	Code Conforming Wood Design
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CWC	Canadian Wood Council
DSC	Calometria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
EN	European Standard
FPL	Forest Products Laboratory
IAWA	International Association of Wood Anatomists
ICN	International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
LPF	Laboratório de Produtos Florestais
NBCC	National Building Code of Canada
NBR	Norma Brasileira
NDS	National Design Specification
NFPA	National Fire Protection Association
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SNIF	Sistema Nacional de Informações Florestais
TGA	Análise termogravimétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Arrefecida
B_0	Taxa de carbonização uni-dimensional
B_{ef}	Taxa de carbonização efetiva
B_n	Taxa de carbonização bi-dimensional (considera o arredondamento dos cantos)
CV	Coefficiente de variação
d_0	Espessura da camada de resistência zero
$E_{12\%}$	Módulo de elasticidade reportado ao teor de referência de 12% de umidade
$E_{c0,kT}$	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, característico, sob temperatura, T
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, médio
$E_{t0,kT}$	Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras, característico, sob temperatura, T
$E_{t0,m}$	Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras, médio
$E_{U\%}$	Módulo de elasticidade ao teor de U% de umidade
$E_{w0,m}$	Módulo de elasticidade paralelo às fibras, médio
$f_{12\%}$	Resistência ao teor de referência de 12% de umidade
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
$f_{c0,kT}$	Resistência à compressão paralela às fibras, característica, sob temperatura, T
$f_{c0,m}$	Resistência à compressão paralela às fibras, média
$f_{c0,m,12\%}$	Resistência à compressão paralela às fibras, média, ao teor de 12% de umidade
f_i, E_i	Cada elemento da amostra
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{t0,kT}$	Resistência à tração paralela às fibras, característica, sob temperatura, T
$f_{t0,m}$	Resistência à tração, paralela às fibras, média
$f_{U\%}$	Resistência ao teor de U% de umidade

f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{v0,kT}$	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, característica, sob temperatura, T
$f_{v0,m}$	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, média
$f_{w0,m}$	Resistência mecânica paralela às fibras, média
K	Constante de equilíbrio entre a água dissolvida e a sua pressão relativa de vapor (h)
$K_{mod,fi} (E_{w0,T}) = E_{w0,T}/E_{w0,20}$	Fator de modificação do módulo de elasticidade sob temperaturas elevadas
$K_{mod,fi} (f_{w0,T}) = f_{w0,T}/f_{w0,20}$	Fator de modificação das resistências sob temperaturas elevadas
K1	Constante de equilíbrio representada pela razão entre a atividade química do hidrato para as atividades dos dois reagentes (água e madeira não-hidratada aparente a U% de teor de umidade
$K_{mod,fi} (E_{c0,T})$	Fator de modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na temperatura, T
$K_{mod,fi} (E_{t0,T})$	Fator de modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras na temperatura, T
$K_{mod,fi} (f_{c0,T})$	Fator de modificação da resistência à compressão paralela às fibras, na temperatura, T
$K_{mod,fi} (f_{t0,T})$	Fator de modificação da resistência à tração paralela às fibras na temperatura, T
$K_{mod,fi} (f_{v0,T})$	Fator de modificação da resistência ao cisalhamento paralela às fibras na temperatura, T
m	Massa da madeira com U% de umidade
M_p	Peso molecular da madeira por mol de sítio de adsorção
N	Natural/ambiente
n	Tamanho da amostra
P_{A1}	Modelo para predição de profundidade de carbonização para o Agrupamento 1

P_{A2}	Modelo para predição de profundidade de carbonização para o Agrupamento 2
Q	Quente
s	Desvio padrão
T	Temperatura dos gases
t	Tempo de exposição ao fogo
t ou T	Valor tabelado da porcentagem da Distribuição T de Student
T_0	Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, tomada igual a 20°C
T_g	Transição vítrea
U	Teor de umidade da madeira, no instante do ensaio
U_E	Umidade de equilíbrio da madeira
V_U	Volume da madeira com U% de umidade
$d_{ap12\%}$	Densidade aparente (massa específica) reportada ao teor de umidade de 12%
d_{bas}	Densidade básica
$d_{ap,U\%}$	Densidade aparente (massa específica) ao teor de umidade de U%
d_m	Densidade média

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Contextualização	20
1.2 Justificativas	22
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo geral.....	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 Organização da tese.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A madeira como material construtivo	25
2.1.1 Famílias produtoras de madeiras	26
2.1.2 Usos da madeira na construção civil	27
2.1.3 Características químicas da madeira	28
2.1.4 Fluxo de fluidos.....	32
2.1.5 Obstrução dos vasos	33
2.1.5.1 Tiloses	33
2.1.5.2 Gomas e resinas.....	36
2.1.6 Propriedades físicas da madeira	37
2.1.6.1 Modelos e equações para estimar a umidade de equilíbrio na madeira	38
2.1.6.2 Densidade aparente ou massa específica	42
2.1.6.3 Reportando resultados à umidade de 12%.....	43
2.1.7 Características da madeira frente ao fogo.....	45
2.1.7.1 Fluxo de calor na madeira aquecida	46
2.1.7.2 A degradação térmica da madeira	48
2.1.7.3 Taxa de carbonização da madeira para fins estruturais	53
2.1.7.4 Conclusões parciais do item 2.1	64
2.2 Segurança contra o incêndio nas construções.....	65
2.2.1 Conceitos iniciais	65
2.2.1.1 Incêndio real.....	65
2.2.1.2 Incêndio padrão	67
2.2.1.3 Regimes de aquecimento.....	68
2.2.1.4 Reação ao fogo.....	68
2.2.1.5 Resistência ao fogo.....	69
2.2.2 Estruturas de madeira em situação de incêndio	69
2.2.2.1 Resistência de cálculo da madeira segundo a EN 1995-1-2 (2004).....	69
2.2.2.1.1 Métodos avançados	70
2.2.2.1.2 Método da seção transversal reduzida	71
2.2.2.1.3 Método das propriedades mecânicas reduzidas	73
2.2.2.1.4 Verificação da resistência mecânica segundo a EN 1995-1-2 (2004)	73
2.2.2.1.5 Fator de modificação em situação de incêndio	74
2.2.2.2 Resistência de cálculo da madeira segundo a AWC-ANSI/NDS (2018a).....	75
2.3 Resistência mecânica da madeira submetida a temperaturas elevadas	79
2.3.1 Formulações teóricas e empíricas.....	80
2.3.1.1 Modelo de falha em função do tempo de carbonização	80
2.3.1.2 Modelo de redução de resistência mecânica sob temperaturas elevadas	83
2.3.1.3 Resistência mecânica na madeira após arrefecimento das temperaturas	89
2.4 Determinação das resistências características	90
2.5 Análise e tratamento de dados	92
3 MATERIAIS E MÉTODOS	94
3.1 Ensaios de carbonização	94
3.1.1. Materiais.....	95
3.1.1.1 Madeiras.....	95
3.1.1.2 Material refratário e isolante térmico	100
3.1.1.3 Suporte para corpo de prova dentro do forno	101
3.1.2 Instrumentos e equipamentos	102
3.1.2.1 Termopares.....	102
3.1.2.2 Sistema de aquisição de dados ADS 0500.....	103
3.1.2.3 Paquímetro digital e balança eletrônica.....	103
3.1.2.4 Forno a gás para ensaios de carbonização	104
3.1.3 Métodos.....	104

3.1.3.1	Preparação dos corpos de prova de carbonização.....	104
3.1.3.2	Caracterização física.....	105
3.1.3.3	Isolamento térmico dos corpos de prova	106
3.1.3.4	Instrumentação dos corpos de prova	107
3.1.3.5	Passos para a execução do ensaio de carbonização	108
3.1.3.6	Determinação da taxa de carbonização e análise de dados.....	108
3.1.3.7	Modelos de avanço de profundidade de carbonização	109
3.2	Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e elásticas da espécie <i>Dinizia excelsa Ducke</i>.	111
3.2.1	Instrumentos e equipamentos	111
3.2.1.1	Termopares.....	111
3.2.1.2	Sistema de aquisição de dados	111
3.2.1.3	Paquímetro digital e balança eletrônica.....	111
3.2.1.4	Câmaras de aquecimento.....	112
3.2.2	Métodos.....	112
3.2.2.1	Amostragem e destinação dos corpos de prova.....	112
3.2.2.2	Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e elásticas da espécie <i>Dinizia excelsa Ducke</i>	113
3.2.2.2.1	Corpos de prova para ensaio de compressão paralelo às fibras	114
3.2.2.2.2	Corpos de prova para ensaio de tração paralelo às fibras	114
3.2.2.2.3	Corpos de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	115
3.2.2.2.4	Chave de identificação dos corpos de prova.....	115
3.2.2.2.5	Instrumentação dos corpos de prova e aquisição de dados.....	115
3.2.2.2.6	Preparação dos corpos de prova para ensaios de caracterização mecânica em altas temperaturas	115
3.2.2.2.7	Aquecimento e ensaio de compressão paralela às fibras	116
3.2.2.2.8	Aquecimento e ensaio de tração paralela às fibras	118
3.2.2.2.9	Aquecimento e ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	119
3.2.2.3	Correção dos valores médios e característicos para a umidade padrão	120
3.2.2.4	Determinação das resistências características	120
3.2.2.5	Determinação dos módulos de elasticidade longitudinal característicos	121
3.2.2.6	Determinação dos modelos de fatores de modificação das características mecânicas	121
3.2.2.7	Análise da estabilidade térmica da espécie <i>dinizia excelsa ducke</i>	122
3.2.2.8	Espessura da camada de resistência zero.....	124
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	125
4.1	Ensaio de carbonização da madeira	125
4.1.1	Caracterização física da amostra	125
4.1.2	Monitoramento da temperatura nas superfícies dos corpos de prova	129
4.1.3	Transferência de calor unidimensional.....	130
4.1.4	Análise dos dados de taxa de carbonização.....	133
4.1.5	Modelos para predição da profundidade de carbonização	136
4.1.6	Modelo para predição da taxa de carbonização	137
4.1.7	Validação dos modelos para prescrição das profundidades de carbonização	139
4.1.7.1	Estudo de caso 1	140
4.1.7.2	Estudo de caso 2	141
4.1.7.3	Estudo de caso 3	142
4.1.8	Profundidades de estabilização da temperatura	143
4.2	Influência da temperatura nas propriedades mecânicas	149
4.2.1	Estabilidade térmica da espécie <i>dinizia excelsa ducke</i> - angelim-vermelho.....	149
4.2.2	Caracterização física da espécie <i>dinizia excelsa ducke</i> - angelim-vermelho.....	156
4.2.2.1	Variação nos teores médios de umidade e de massa	156
4.2.3	Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e nos módulos de elasticidade da amostra	159
4.2.3.1	Modos de ruptura	159
4.2.3.2	Caracterização mecânica - valores médios e característicos	161
4.2.3.2.1	Condição natural	161
4.2.3.2.2	Caracterização mecânica sob temperaturas elevadas.....	163
4.2.3.3	Valores característicos normalizados	168
4.2.3.4	Fatores de modificação das resistências e dos módulos de elasticidade.....	171
4.2.3.5	Espessura da camada de resistência zero (d_0).....	174
4.2.3.6	Análises comparativas do efeito da elevação de temperatura.....	175
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	178
	REFERÊNCIAS	184
	APÊNDICES.....	200

Apêndice A.....	201
Apêndice B.....	210
Apêndice C.....	216
Apêndice D.....	218
Apêndice E.....	220
Apêndice F.....	226
Apêndice G.....	241
ANEXOS	243
Anexo 1	244
Anexo 2	245
Anexo 3	246

1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O resurgimento da madeira como material construtivo é um fenômeno mundial. Canadá, Estados Unidos, Nova Zelândia, Japão e diversos países da Europa já acumulam larga experiência em construções de múltiplos pavimentos de madeira e produtos de madeira dimensionadas para situação de incêndio. Com relação à segurança ao fogo das estruturas de madeira, nas últimas décadas, o tema vem merecendo investigações contínuas e constantes envolvendo diferentes instituições e pesquisadores (Östman et al. 2010, Gerard et al. 2013, Karacabeyli et al. 2013, Buchanan et al. 2014, Buchanan e Abu 2017, Bartlett et al. 2018). Em um ambiente globalizado, o IBC (2018) disponibiliza um modelo de desenvolvimento internacional da construção que abrange os recursos de proteção passiva e ativa contra incêndio e fumaça.

A experiência no segmento das estruturas de madeira vem-se consolidando devido ao alto grau de industrialização e de racionalização dos sistemas construtivos empregados, com a contrapartida do excelente desempenho térmico exibido pela madeira e pelos produtos engenheirados de madeira. Distinguem-se, basicamente, duas categorias de estruturas de madeira: (a) Estrutura leve de madeira (*Light timber frame, Light wood frame*); (b) Estrutura pesada de madeira (*Heavy timber frame, Heavy timber, Mass timber*).

Os elementos das estruturas do tipo leve devem receber uma proteção termoisolante, como medida de prevenção preditiva na questão da segurança de edificações contra incêndio. No entanto, para os elementos das estruturas do tipo pesada, não é necessário essa proteção, somente em situações exigidas por órgãos normativos. A adoção de seções transversais mínimas nos projetos de elementos e estruturas de madeira, segundo AWC-ANSI/NDS(2018 a,b), garante a

permanência de uma seção transversal suficiente de madeira não carbonizada para sustentar as cargas de projeto pela duração necessária da exposição ao fogo.

O desempenho das estruturas pesadas de madeira frente ao fogo é significativamente superior comparado ao desempenho das estruturas leves (APA, 2005) pois a proteção ao fogo é provida pela robustez dos próprios elementos de madeira aliada à baixa condutividade térmica desse material. Além desse fato, a camada de carvão, formada na superfície dos elementos, agrega um outro nível de proteção pois a condutividade térmica do carvão é cerca de 20% da condutividade da madeira.

A ABNT ainda não disponibiliza uma norma para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio. Desta forma, no Brasil, adota-se o Eurocode 5, uma norma probabilista de estados limites, assim como a NBR 7190 (1997). No entanto, foi apresentada em 2011 para consulta pública, uma proposta de Revisão da NBR 7190 (1997) que apresenta as seguintes inconsistências: a) propõe para as taxas de carbonização de madeiras de espécies folhosas os mesmos valores prescritos na norma EN 1995-1-2 (2004) sendo que não foram identificados na literatura técnica dados substanciais de pesquisas nacionais a partir de ensaios com a curva padrão de incêndio, com espécies nativas ou plantadas brasileiras, que respaldem essas adoções considerando a diversidade de espécies folhosas brasileiras de diferentes densidades; b) especifica valores de taxa de carbonização unidimensional (mm/min) para madeiras de espécies folhosas classificadas como de baixa, média e alta densidades, contudo não são especificados os intervalos numéricos de cada classe de densidade.

O EN 1995-1-2 (2004) orienta aos países que queiram adotar as suas prescrições normativas no projeto de edifícios, sobre a necessidade de se atender ao item da norma que trata dos “Parâmetros Determinados a nível Nacional”, ou seja, parâmetros específicos para os materiais de cada país. Dentre esses parâmetros, destacam-se dois itens de interesse nesta Tese: a) o fator parcial para as propriedades da madeira em incêndio; b) o método para a determinação das propriedades da seção transversal.

Neste contexto, observa-se que uma maior aplicação da madeira na construção civil brasileira ainda encontra sérias limitações, dentre as quais destacam-se a escassez de pesquisas acerca da carbonização das diferentes espécies nativas sob exposição padrão ao fogo e da influência das altas temperaturas na resistência mecânica dessas madeiras, à quente e após o arrefecimento.

Estudos e investigações experimentais nesses aspectos são, portanto, de grande relevância e motivaram o presente trabalho.

1.2 Justificativas

Ensaio sob exposição padrão ao fogo (temperatura-tempo) são adotados para investigar e determinar as propriedades dos materiais de construção em situação de incêndio, em especial, com a utilização da curva proposta na ISO 834. Os dados obtidos em ensaios de carbonização de diferentes elementos estruturais de madeira, sob exposição ao fogo padrão, são utilizados para calcular a resistência ao fogo desses elementos.

O adequado dimensionamento das estruturas de madeira em situação de incêndio requer o conhecimento das taxas de carbonização das madeiras que à nível internacional tem sido investigada intensamente. Apesar de ser um parâmetro de fundamental importância para a determinação das profundidades de carbonização, uma ampla revisão bibliográfica identificou uma significativa carência quanto à caracterização das espécies brasileiras nesse segmento.

Existe, também, uma extensa lacuna acerca da compreensão das relações entre a taxa de carbonização e a densidade aparente de madeiras de espécies folhosas. Identificou-se na literatura que a presença de obstruções nos vasos por tiloses ou por extrativos do tipo gomas e depósitos pode interferir na permeabilidade dos gases aquecidos, mas não foram identificadas pesquisas que relacionem as influências das presenças desses tipos de obstruções nas taxas de carbonização das madeiras.

A literatura técnica nacional contribui com um número restrito de resultados verificando-se, também, uma expressiva lacuna na proposição de coeficientes de modificação das resistências para espécies folhosas em função da redução das propriedades mecânicas sob temperaturas elevadas.

A madeira aquecida abaixo da camada de carvão experimenta gradações de resistência mecânica em função da temperatura do material. A camada de madeira imediatamente abaixo da camada de carvão, reconhecida como camada de resistência zero, apresenta uma espessura de 7,0 mm segundo a EN 1995-1-2 (2004), para todas as espécies. As normas AS 1720.4 (2006) e NDS (2018a) prescrevem valores aproximados, sendo 7,5 mm e 7,6 mm, respectivamente. As

publicações Schmid et al. (2014a), Schmid et al. (2014b) e Lange et al. (2014) questionam a prescrição de uma espessura de camada de resistência zero de valor único para espécies de diferentes características mecânicas.

Segundo Schmid et al. (2014), cálculos avançados precisam refletir o comportamento da madeira na condição de fogo, e para tal precisam contar com valores de entrada precisos e condições de contorno definidas. Por outro lado, em caso de incêndio, as condições de contorno são muito complexas e não é fácil de investigar, uma vez que muitos efeitos não podem ser analisados separadamente.

Portanto, visando suprir as lacunas identificadas na literatura técnica foram pesquisadas treze espécies de madeiras folhosas, tropicais brasileiras, que apresentam densidades aparentes contidas no intervalo entre 500 e 1300 kg/m³, sendo: angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), castanheira (*Bertholletia excelsa*), cedro (*Cedrela L.*), cumarú (*Dipteryx sp.*), garapeira (*Apuleia leiocarpa*), ipê (*Tabebuia spp.*), louro itaúba (*Mezilaurus itauba*), maçaranduba (*Manilkara spp.*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess), roxinho (*Peltogyne discolor*) e vinhático (*Plathymenia*). As espécies foram selecionadas em razão de sua frequente utilização na construção civil em nosso país. Para a avaliação da influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas foi selecionada, dentre as treze, uma espécie de alta densidade aparente, a angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Determinar a taxa de carbonização de treze espécies folhosas brasileiras e avaliar a influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas em uma espécie de alta densidade aparente.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Estudar a carbonização das espécies selecionadas sob exposição padrão ao fogo da ISO 834 e determinar a influência das variáveis: densidade aparente (massa específica),

presença de obstruções nos vasos anatômicos da madeira (do tipo tiloses, gomas e depósitos) e o tempo de exposição ao fogo na carbonização;

- b) Determinar modelos para a predição da profundidade de carbonização e da taxa de carbonização das espécies selecionadas;
- c) Determinar a influência das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas (resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento paralelos às fibras) e nos módulos de elasticidade à compressão e à tração em amostras da espécie selecionada *Dinizia excelsa Ducke*, angelim-vermelho, submetidas a temperaturas de 40 a 240 °C nas condições quente e após o arrefecimento;
- d) Determinar os modelos de fatores de modificação das propriedades mecânicas da espécie *Dinizia excelsa Ducke*, sob temperaturas de 40 a 240 °C nas condições quente e após o arrefecimento;
- e) Correlacionar os dados de gradiente de temperatura no elemento carbonizado com a variação de resistência mecânica para madeira da espécie *Dinizia excelsa Ducke* e determinar a profundidade da camada de resistência zero.

1.4 Organização da tese

A presente tese encontra-se organizada em capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica detalhada, visando oferecer subsídios para o alcance dos objetivos. O capítulo 3 apresenta os materiais, a descrição da metodologia e os equipamentos adotados para o desenvolvimento da tese. O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões pertinentes e, finalmente, o capítulo 5 expõe as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2

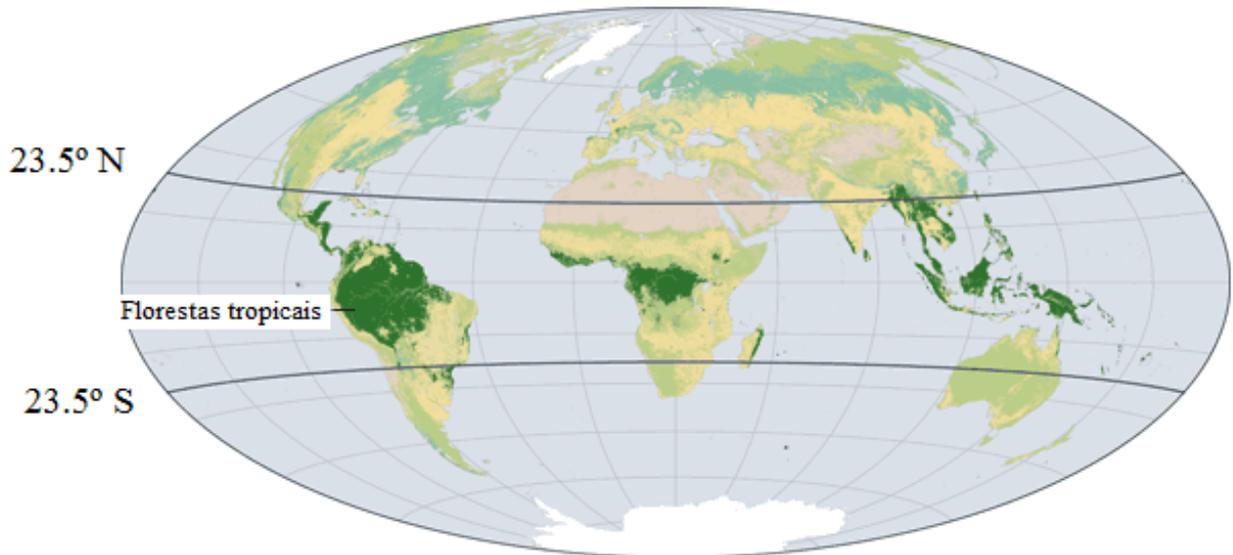
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão está direcionada para o entendimento do processo de carbonização e de redução nas propriedades mecânicas da madeira de espécies folhosas submetidas a temperaturas de incêndio. O incêndio, em si, é um processo aleatório e a madeira, o material em estudo, é um material natural e de grande complexidade e cada espécie pode ser considerada um material diferente. Diferentemente, os processos de carbonização da madeira para geração de carvão vegetal e a termorretificação, para melhoramento de determinadas propriedades da madeira, apresentam controle tanto da temperatura quanto da taxa de aquecimento (ESTEVES E PEREIRA, 2009). Nesse contexto, para direcionar os estudos, serão revisados aspectos sobre a estrutura química e anatômica da madeira, propriedades físicas e fluxo de calor na madeira aquecida, a degradação térmica da madeira e requisitos básicos para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio assim como serão apresentadas as características das amostras em estudo.

2.1 A madeira como material construtivo

A madeira é o material que constitui o tronco de plantas classificadas como gimnospermas ou angiospermas. As gimnospermas são conhecidas como coníferas, resinosas, não porosas ou *softwoods* e as angiospermas são chamadas de folhosas, porosas ou *hardwoods* (ARAÚJO, 2002). As madeiras folhosas mais comercializadas no mundo são provenientes das florestas tropicais. Por meio do satélite Icesat, a Nasa desenvolveu um mapa, que apresenta as principais florestas no mundo vistas do espaço. Neste mapa, pelas copas das árvores (em verde escuro) que atingem alturas superiores a 40 m, têm-se em destaque a floresta tropical da Amazônia e as florestas tropicais da África Central e da Indonésia na imagem da Fig. 2.1.

Figura 2.1 - Mapa mundi – Florestas tropicais, destaque em tom verde escuro.



Fonte: Nasa (<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Deforestation>)

O Brasil é formado por seis biomas de características distintas sendo dois destes biomas, constituídos de florestas tropicais: a Amazônia e a Mata Atlântica. A Amazônia é o maior bioma do Brasil e está formado, principalmente, por florestas densas e abertas, onde crescem um terço de toda a madeira tropical do mundo. Da Mata Atlântica, hoje resta cerca de 13% de sua cobertura original, porém estima-se que ainda existam cerca de 35% das espécies existentes no Brasil, aproximadamente. Ambas florestas apresentam um ambiente muito semelhante entre si: quente, de grande umidade, regime de muita chuva e a presença de árvores de grande e médio porte (MMA)¹, (SNIF)².

2.1.1 Famílias produtoras de madeiras

Segundo Gonzaga (2006), algumas famílias botânicas se destacam na produção de madeiras de lei. A Família Leguminosae se destaca no Brasil com espécies produtoras de boas madeiras, tais como jacarandás, pau-brasil, sucupira, acapu, araribá ou pau-rainha, jatobá, angelins e angicos,

¹ MMA – Ministério do Meio Ambiente, Brasil

² <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>

sendo considerada a família de belas madeiras. A família das Meliaceae se distingue por produzir madeiras estáveis, tais como cangerana (pau-de-santo), andiroba, cedro-rosa, mogno-brasileiro (ou aguano) e catiguá com peso moderado, boa trabalhabilidade, boa resistência a fungos, xilófagos e teredos. A Bignoneaceae é a família dos ipês, produtores de madeira de resistência e de durabilidade. A Lauraceae é a família de alguns louros e das canelas, madeiras estáveis e de múltiplas aplicações, dentre elas a imbuia e a itaúba (amarela e preta), a canela, que suporta bem a umidade e o contato com o solo. A família dos figos e das amoras, Moraceae, destaca-se com excelentes madeiras: a taiúva (ou tajuva) e a tatajuba, que são as madeiras brasileiras com mais altos coeficientes de qualidade (segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT/SP), comparáveis à teca (*Tectona grandis*, da Índia); da mesma família tem-se o conduru ou muirapiranga e a guariúba ou oiti. Na família das Apocynaceae tem-se o gênero *Aspidosperma* produtor das perobas rosa, araracanga e guatambu.

Segundo Oliveira (2011), a família Leguminosae ou Fabaceae é a terceira maior família entre as folhosas compreendendo 727 gêneros e 19325 espécies sendo que no Brasil estão representadas por cerca de 2100 espécies nativas reunidas em 188 gêneros que variam de grandes árvores, arbustos, ervas e trepadeiras. A classificação mais aceita para a família Leguminosae é a divisão em três subfamílias: Mimosoideae, com 56 gêneros e cerca de 2800 espécies; Caesalpinioideae, com 152 gêneros e cerca de 2800 espécies e Papilionoideae (ou Fabaceae)³, abrigando 440 gêneros e cerca de 12000 espécies vegetais. As Papilionoideae se destacam como árvores, nos trópicos e hemisfério sul, e arbustos, na zona temperada.

2.1.2 Usos da madeira na construção civil

Conforme Zenid et al (2009) e Nahuz et al (2013) a exaustão das florestas nativas das regiões Sul e Sudeste, no Brasil, fonte das tradicionais madeiras de pinho-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) e de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*), que eram tradicionalmente utilizadas no setor de construção civil, provocou a sua substituição por outras madeiras, desconhecidas pelos usuários e, geralmente, inadequadas ao uso pretendido. Com estas considerações, Zenid et al (2009) apresenta classificação geral de usos da madeira nas diversas necessidades da

³ Conforme a CIN (2012)

construção civil, tais como: construção civil pesada externa, construção civil pesada interna, construção civil leve externa e leve interna estrutural, construção civil leve interna decorativa, construção civil leve interna de utilidade geral, construção civil leve em esquadrias e construção civil em assoalhos domésticos.

2.1.3 Características químicas da madeira

Para entender o comportamento tecnológico da madeira no que se refere às suas propriedades físico-mecânicas, Silva et al (1994) esclarecem que é necessário conhecer a organização interna dos seus elementos celulares. Segundo Dinwoodie (2004) existem padrões distintos de variação dentro de uma única árvore que contribuem para identificar as madeiras e se refletem nas características básicas de células de coníferas e de folhosas. Nas coníferas têm-se as células de parênquima para a estocagem de amido, óleos, sais e água e traqueídeos para suporte e condução da água e dos sais minerais. As folhosas, mais complexas, apresentam quatro tipos de células: os parênquimas para estocagem de amido, óleos e outras substâncias; os traqueídeos, para suporte e condução da água e dos sais minerais; as fibras, para suporte e os vasos, para condução da água e da seiva no xilema.

A composição elementar da madeira varia pouco com a espécie. Conforme Brito e Barichello (1981) admite-se que a madeira contenha: 49-50% de carbono; 6% de hidrogênio; 44% de oxigênio; 0,1 a 0,5% de nitrogênio e segundo a natureza da espécie ou lugar de coleta, as madeiras podem apresentar teores variáveis de minerais (Ca, Mg, Na, K, Fe, Si, P, S, etc.).

De acordo com Silva et al. (1994), as células presentes na anatomia das folhosas são longitudinais. O vaso ou elemento de vaso, por exemplo, consiste de um sistema tubular axial, composto de células individuais interligadas pelas extremidades; são relativamente pequenos e largos em diâmetro, quando comparados às fibras. As aberturas nas extremidades desses elementos de vaso são denominadas de placas de perfurações e podem ser de três tipos principais (podendo ocorrer combinações entre elas): simples, com uma abertura larga; escalariforme, com aparência de uma escada e foraminada, com pontoações mais ou menos circulares e agrupadas.

Belgacem e Pizzi (2016) apresentam a madeira como um material orgânico composto de fibras de celulose (fase de reforço) incorporadas em lignina (um polímero reticulado polifenólico) como

matriz e com um terceiro componente, as hemiceluloses, que desempenham o papel de agente compatibilizador entre as fibras de celulose de reforço e a matriz de lignina.

Conforme D'Almeida (1988), as fibras são constituídas de regiões cristalinas (altamente ordenadas) e amorfas (desordenadas). Estas regiões não possuem fronteiras bem definidas, mas parece haver uma transição de um arranjo ordenado das cadeias de celulose para um estado desordenado ou amorfo, no qual estas cadeias apresentam uma orientação menor.

Segundo Fengel e Wegener (1989), a parede celular é rígida e composta basicamente de celulose e um carboidrato com propriedades mecânicas tais como plasticidade, elasticidade e resistência à solicitações; propriedades físico-químicas como resistência à decomposição por microorganismos, higrofilia e transparência. As paredes primárias são finas e elásticas nas células vegetais mais jovens e quando adultas sofrem um espessamento formando internamente uma parede secundária composta de lignina, de hemicelulose, de suberina e de cutina. A lignina reforça as fibras celulósicas sendo um componente estrutural, que confere à parede celular propriedades de elasticidade e de resistência à tração além de alta capacidade de absorção de esforços de compressão. A lignificação ocorre como uma consequência não somente do desenvolvimento do sistema de condução de água, mas também pela necessidade de sustentação da copa da árvore. A suberina e a cutina, por sua vez, são responsáveis por impermeabilizar e por reduzir a perda de água da célula vegetal.

A celulose, a holocelulose e a lignina (Klock et al, 2005) e (Souza, 2017) representam os componentes fundamentais integrantes das paredes das células vegetais enquanto os componentes secundários, não integrantes das paredes das células vegetais, seriam os extrativos (parte orgânica) e as cinzas (parte inorgânica).

Embora existam semelhanças na ocorrência de extrativos dentro das famílias, conforme Yang e Jaakkola (2011), há diferenças distintas na composição, mesmo entre espécies de madeira intimamente relacionadas. Conforme Klock et al. (2005), geralmente, para as madeiras de coníferas, o teor de extrativos fica na faixa de 5 a 8% e, para as folhosas de regiões temperadas, na faixa de 2 a 4%, podendo chegar a valores superiores a 10% na madeira de espécies de regiões tropicais. Segundo Pettersen (1984) os extrativos são uma variedade de compostos orgânicos, incluindo gorduras, ceras, alcalóides, proteínas, fenóis simples e complexos, açúcares simples,

pectinas, mucilagens, gomas, resinas, terpenos, amidos, glicosídeos, saponinas e óleos essenciais. Muitos destes funcionam como intermediários no metabolismo das árvores, como reservas de energia, como parte do mecanismo de defesa da árvore contra ataques microbiano e, também, contribuem para as propriedades da madeira, como cor, odor e resistência à decomposição. Devido à esta diversidade de compostos químicos no grupo dos extrativos, a extração conforme esclarecido em Souza (2017), requer a utilização de solventes polares ou apolares: a água fria extrai substâncias como gomas, taninos, açúcares e corantes; a água quente, além de extrair as substâncias anteriores, extrai os amidos; a mistura etanol: tolueno na proporção 1:2 extrai cera, gorduras, resinas e óleos; a solução de álcali aquecida (NaOH a 1%) extrai carboidratos de baixo peso molecular, constituídos basicamente de poliose e celulose degradada. Apresenta-se na Tab. (2.1) dados de teores de extrativos de madeiras de diversas regiões brasileiras e massas específicas aparentes, reportadas ao teor de 12% de umidade.

Tabela 2.1 – Teores de extrativos de madeiras folhosas de diversas densidades.

Referências	$d_{\text{apa},12}$ (kg/m ³)	Teores de extrativos
Santana e Okino (2007)	310 a 1070	0,6 a 17,3%
Santos (2008)	731 a 1033	6,14 e 8,54%.
Silva et al. (2014)	704 a 813	3,55 a 7,68%.
Souza (2017)	575 a 1058	1,72 a 20,73%.

Para a extração dos extrativos, os pesquisadores adotaram procedimentos diferenciados. Santana e Okino (2007) e Santos (2008) adotaram o método T 264 om-88 apresentado em Tappi Standard (1996); Silva et al. (2014) determinou o teor de extrativos através da solubilidade em etanol/tolueno, de acordo com a norma NBR 14853; Souza (2017) determinou o teor de extrativos em água fria (sendo 1,72 a 5,83%), em água quente (sendo 2,58 a 7,82%), em NaOH (1%) (sendo 5,54 a 20,73%) e em etanol/tolueno (sendo 3,14 a 11,64%). Utilizando-se os dados disponíveis na literatura, foram realizadas análises estatísticas para buscar uma correlação entre as densidades das diferentes espécies e as taxas de teor de extrativo. As correlações foram muito baixas. Deduziu-se que a baixa correlação deve-se ao fato de os dados serem de resultados obtidos a partir de diferentes metodologias.

Materiais poliméricos apresentam comportamento mecânico intermediário ao elástico e ao viscoso, sendo denominados viscoelásticos. A contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero depende da temperatura e da escala de tempo do experimento (CASSU E FELISBERTI, 2005).

Um polímero é uma macromolécula, esclarece Canevarolo Jr. (2006), composta por dezenas de milhares de unidades de repetição unidas por ligação covalente. Nas ligações covalentes os átomos da molécula estão conectados entre si por ligações primárias fortes. Normalmente envolvem curtas distâncias e altas energias. Forças moleculares secundárias fracas são forças entre segmentos de cadeias poliméricas que aumentam com a presença de grupos polares e diminuem com o aumento da distância entre moléculas, podendo ser de dois tipos: forças de van der Waals e pontes de hidrogênio. Dentre as forças de van der Waals, a interação dipolo-dipolo (força de atração entre dois dipolos permanentes, de sinais opostos) ocorre em grande quantidade na cadeia polimérica enquanto as pontes de hidrogênio envolvem longas distâncias e baixas energias (Tab. 2.2).

Tabela 2.2 – Forças primárias e secundárias nos polímeros.

	Forças primárias intramoleculares	Forças secundárias intermoleculares
Tipo	Covalente	van der Waals Pontes de hidrogênio
Influência	Estrutura química Estabilidade da molécula (térmica, química, fotoquímica, etc).	Propriedades físico-químicas (Tg, Tm, solubilidade, etc)

Fonte: Canevarolo Jr. (2006).

As forças intramoleculares covalentes e fortes vão determinar, com o arranjo das unidades de repetição, a estrutura química e o tipo de cadeia polimérica, incluindo o tipo de configuração e influenciar na rigidez/flexibilidade da cadeia polimérica e conseqüentemente do polímero, assim como na estabilidade (térmica, química, fotoquímica, etc).

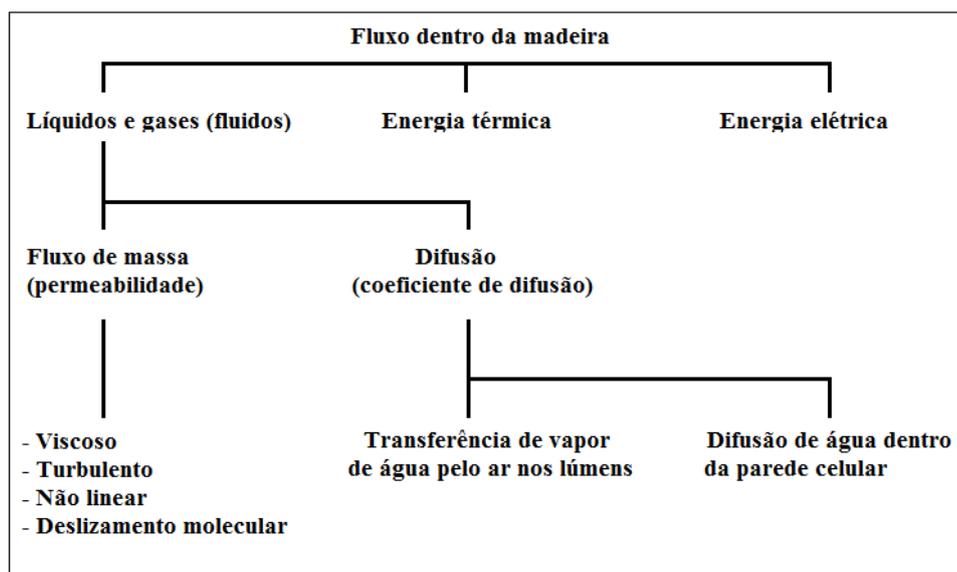
Por outro lado, as forças intermoleculares fracas vão determinar, decisivamente, a maioria das propriedades físicas e químicas do polímero, tais como: temperaturas de transição vítrea (Tg) e de fusão cristalina, solubilidade, cristalinidade, difusão, permeabilidade a gases e vapores, deformação e escoamento envolvendo em todos os casos a quebra e formação de ligações intermoleculares. Quanto mais fortes forem essas forças, maior a atração entre as cadeias, tornando-se mais difícil todo e qualquer evento que envolva a separação e/ou fluxo de uma cadeia sobre a outra. A estrutura física da celulose é responsável por suas reações não-uniformes e, também, por algumas de suas propriedades. Por exemplo, na estrutura de supermolécula da

celulose, a fração de grupos hidroxilas disponível para interagir com a água é limitada, a ponto de tornar a celulose insolúvel nesse meio, apesar de sua polaridade. A presença de regiões amorfas e cristalinas nas quais a acessibilidade de agentes químicos normalmente difere, provocando reações não uniformes.

2.1.4 Fluxo de fluidos

A passagem de fluidos na forma de líquidos e gases pelo interior da madeira pode ocorrer de duas formas (Dinwoodie, 2004): por fluxo de massa ou por difusão. O fluxo de massa permite quantificar ou mensurar a permeabilidade da madeira enquanto a difusão relaciona-se à transferência de vapor de água, água e ar pelos lúmens e parede celular, conforme a Fig. 2.2.

Figura 2.2 – Passagem de fluidos pela madeira.



Fonte: Dinwoodie (2004).

Segundo Dinwoodie (2004), a magnitude do fluxo de massa de um fluido através das cavidades celulares da madeira é determinada por sua permeabilidade, enquanto a difusão abrange tanto a transferência de vapor de água através do ar nos lúmens quanto o movimento da água ligada (adsorvida) dentro da parede celular. O fluxo radial ocorre por meio dos raios, enquanto que o fluxo tangencial conta com a presença de canais que interligam vasos adjacentes, fibras e parênquimas verticais. A permeabilidade é maior no externo alburno, diminuindo para dentro e reduzindo marcadamente com o início da formação do cerne assim como as células ficam

bloqueadas pela deposição de gomas (carboidratos) ou resinas ou, como acontece em certas madeiras, pelo crescimento de tilose para dentro dos vasos. A variabilidade na permeabilidade entre as diferentes espécies de madeiras folhosas deve-se muito à grande variação no diâmetro dos vasos: os anéis porosos das madeiras folhosas caracterizadas por terem vasos de madeira de verão, são de grande diâmetro e têm, geralmente, permeabilidades muito mais elevadas do que as madeiras de poros difusos que têm vasos de diâmetro consideravelmente inferior.

Contudo, nessas mesmas madeiras de anéis porosos que desenvolvem tilos, a permeabilidade relativa ao cerne pode ser inferior à do cerne das madeiras porosas difusas, visto que, segundo Burger e Richter (1991) e Silva (2007), a presença de tilos nos vasos causa a obstrução das vias normais de circulação de líquidos nas madeiras e dificultam a secagem e a impregnação com substâncias preservativas. Outra situação evidenciada em Burger e Richter (1991), refere-se ao fato de madeiras de alta massa específica apresentarem menor volume de espaços vazios causando impacto na circulação de fluidos e na permeabilidade da madeira.

2.1.5 Obstrução dos vasos

Segundo Botosso (2011), a presença de conteúdos e/ou de tiloses obstruindo o lume dos vasos auxilia na identificação de madeiras, embora não sejam caracteres estruturais. Os conteúdos ou gomo-resinas são típicos em determinados grupos botânicos e apresentam considerável importância para o reconhecimento e a identificação das espécies e das propriedades tecnológicas das madeiras. Existem, porém, espécies que apresentam vasos desobstruídos, totalmente livres, sem gomo-resinas ou tilos em seu interior como a madeira de faveira (*Parkia pendula*, Leg. Fabaceae).

2.1.5.1 Tiloses

A presença de tiloses, também denominada como tilos, no interior dos vasos, especialmente de folhosas, há muito desperta a atenção dos pesquisadores. Conforme Gerry (1914), existe registro

datado de 1675⁴ sobre a presença de tilose, descrita como uma célula de enchimento no desenho de uma seção transversal de madeira de castanha (chestnut) de autoria de Marcello Malpighi, médico, anatomista e biólogo, considerado o fundador da histologia.

Segundo Gerry (1914), o preenchimento dos vasos pelas tiloses torna a madeira praticamente impermeável ao ar e aos líquidos. Estão constituídos de amido, resina, cristais de cálcio e gomas. Nas superfícies rachadas de madeiras, como carvalho branco (white oak), as tiloses aparecem nos canais de vasos como crescimentos celulares reluzentes que se assemelham a massas de bolhas de sabão. Nas coníferas, as tiloses são relativamente pequenas, mas nas folhosas formam bolsas de considerável tamanho.

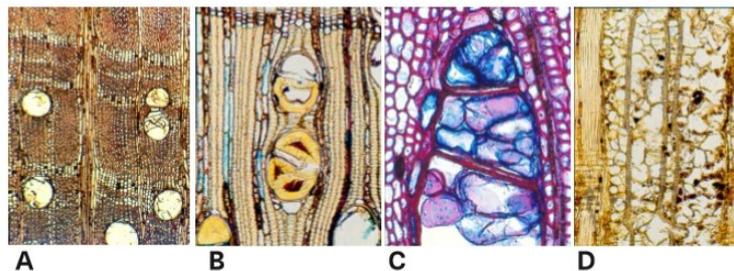
Conforme Gerry (1914), a tilose consiste de uma porção ou prolongamento de uma célula de parênquima da madeira ou de raio medular e o conteúdo da tilose é, portanto, o mesmo que os da célula do parênquima. Consiste de um recurso característico da madeira normal, não ferida, de muitas famílias de árvores, uniforme em vez de ser esporádico ou irregular, como no caso de tiloses associadas a feridas. Em madeiras onde tiloses são poucas e dispersas há considerável variação de espécime para espécime no número real de tiloses presentes. Como a formação de tilose depende da presença de células do parênquima, seja na forma de parênquima de madeira ou de raios medulares em proximidade para vasos ou traqueidas, a variação de posição, abundância e vitalidade dessas células proporciona, pelo menos, uma explicação parcial do desenvolvimento irregular de tiloses em diferentes espécies de madeira. O objetivo principal do estudo desenvolvido em Gerry (1914) foi determinar a ocorrência de tilose em espécies comerciais mais importantes de madeiras nativas da América do Norte e o seu significado em relação à adaptabilidade destas madeiras a certos usos práticos. O estudo identificou a presença de tecido do parênquima consideravelmente desenvolvido em determinadas famílias e seus respectivos gêneros, sendo que o tipo paratraqueal, ou parênquima vasocêntrico, relaciona-se à espécies que apresentam tiloses abundantes e à espécies que apresentam muitas tiloses.

⁴ Época das grandes navegações, expansão mercantilista e colonizadora onde as naus e as caravelas e os tonéis de vinho e de azeite eram de uso comum e fabricados, basicamente, com madeiras e aros de ferro. Nota da Autora.

Segundo Gerry (1914) e Burger e Richter (1991), ferimentos externos podem, também, estimular a formação de tilos visando bloquear a penetração de ar na coluna de líquidos em circulação e algumas vezes, o surgimento de tilos é decorrente da degradação enzimática das membranas de pontuações por fungos xilófagos.

A tilose, conforme IAWA Committee (2007), é classificada como tilose comum ou como tilose esclerosada. A tilose comum cresce a partir de uma célula de raio ou de parênquima axial adjacente ao raio por intermédio da pontuação de uma parede de vaso bloqueando parcial ou totalmente o seu lume. A tilose esclerosada apresenta parede muito espessa, em muitas camadas e encontra-se lignificada. Botosso (2011) esclarece que os vasos obstruídos por tilos estão localizados, em geral, na região do cerne e quando observados macroscopicamente, com auxílio de uma lupa de mão, esses tilos aparecem como membranas transparentes brilhantes com coloração clara característica; são o resultado da expansão do conteúdo de células parenquimáticas adjacentes que penetram nos vasos pelas pontuações parênquimo-vasculares, como mostrado na Fig. 2.3. Os tilos constituem barreiras físicas que podem dificultar a penetração de fungos xilófagos, inclusive sua secagem e tratamentos preservativos, pelo fato de obstruírem a circulação natural de líquidos. Sua presença é típica em gêneros, como: *Platanus*, *Quercus*, *Robinia*, *Populus*, *Carya*, *Castanea*, *Lecythis*, *Astronium*, entre outros.

Figura 2.3 – Vasos obstruídos por tiloses.



Fonte: Botosso (2011).

Na Fig. 2.3 os exemplos apresentados correspondem à seções das seguintes espécies: A) Cardeiro (*Scleronema micranthum*, Malvaceae); B) ucuúba-punã (*Iryanthera tricornis*, Myristicaceae); C) Seringueira (*Hevea brasiliensis*, Euphorbiaceae); D) Matamatá, sapucaia cheirosa, tauari (*Eschweilera coriacea*, Sin.: *E. odora*, Lecythidaceae), sendo D em seção longitudinal radial.

Diferentes trabalhos, tais como Tomazello Filho et al.(1983), Cury (2002), De Micco et al.. (2016) dedicaram-se a estudar a frequência de tiloses nas espécies madeireiras. De Micco et al (2016) desenvolveram ampla pesquisa na base de dados de 111 famílias de madeiras folhosas das quais 17% foram identificadas com presença de tilose comum, com porcentagens mais altas nas espécies da Índia e da Austrália e menores, nas espécies das regiões mediterrâneas, Europa temperada e Nova Zelândia. Cury (2002), investigando 41 espécies arbóreas do cerrado e da Mata Atlântica do Estado de São Paulo, identificaram a maior frequência de espécies arbóreas com tiloses concentrada na família das Leguminosae (Fabaceae).

Segundo Zenid e Ceccantini (2012), utilizando-se da técnica de identificação macroscópica de madeiras, características anatômicas, como camadas de crescimento, tipos de parênquima, poros (vasos) e raios são observadas à vista desarmada ou com auxílio de uma lupa de 10 vezes de aumento, permitindo-se identificar muitas das espécies comercializadas no Brasil.

2.1.5.2 Gomas e resinas

Segundo IAWA Committee (2007), além de obstruções por tiloses, muitas madeiras podem apresentar gomas e outros depósitos nos vasos que incluem uma larga variedade de compostos químicos em cores diferenciadas (branco, amarelo, vermelho, marrom e preto). Das 111 famílias investigadas por De Micco et al (2016), espécies folhosas da bacia mediterrânea, Índia, Austrália e África tropical, representativas de 19 famílias, apresentaram gomas e outros depósitos nos vasos associados a tiloses comuns e tiloses esclerosadas.

Marques (2008) menciona que substâncias como óleos, resinas ou gomas são produzidos em estruturas anatômicas comuns em espécies folhosas como os canais secretores intercelulares que podem ser canais secretores horizontais ou radiais, localizados nos raios lenhosos, ou canais secretores verticais ou axiais, situados ao longo das fibras; existem, também, os canais intercelulares de origem traumática observados na superfície da madeira em forma de veios geralmente preenchidos por resina escura ou goma.

Segundo Gonzaga (2006), as resinas são substâncias produzidas por árvores, especialmente, as folhosas, que formam um líquido viscoso, inflamável, que endurece, assumindo forma vítrea e

quebradiça; às vezes aromáticas, são insolúveis em água e contribuem para a impermeabilização do lenho e o aumento da sua resistência a fungos.

Appezato-da-Glória e Carmello-Guerreiro (2006) apresentam investigação sobre famílias de folhosas que apresentam gomas e mucilagens identificadas como polímeros complexos que, como substâncias lipofílicas, incluem terpenos, ácidos graxos livres, agliconas flavonóidicas e ceras. Nas folhosas, o material secretado pode ser observado na forma de óleos essenciais voláteis, de óleo-resinas ou de secreções heterogêneas de goma-resinas e de compostos fenólicos. O látex, produzido nos laticíferos, é uma emulsão de pequenas partículas (óleos, resinas, ceras e borracha) dispersas em um líquido que contém mucilagem, carboidratos, ácidos orgânicos, íons minerais e enzimas proteolíticas além de açúcares e de vitaminas. As resinas e o látex podem bloquear ferimentos e atuar na defesa contra patógenos assim como os óleos voláteis afastam insetos reduzindo a herbivoria. Destaca-se o agrupamento de famílias de folhosas quanto à presença de gomas e de produtos orgânicos (óleos essenciais voláteis, óleo-resinas, goma-resina e látex) e dentre as folhosas, destacam-se as Leguminosae que apresenta espécies com todos esses polímeros complexos mencionados. A espécie angelim-pedra apresenta gomas em sua anatomia interna conforme imagens na Fig. 2.4.

Figura 2.4 – Gomas- depósitos em seções de angelim-pedra: (a) Tangencial, (b) Transversal.



Fonte: <http://images.lib.ncsu.edu/luna/servlet/detail/NCSULIB~2~2~24668~125125>.

2.1.6 Propriedades físicas da madeira

A madeira sendo um material higroscópico, apresenta a capacidade de absorver a umidade do ambiente circundante. A troca de umidade entre a madeira e o ar depende da umidade e da temperatura relativa do ar e do teor de umidade na própria madeira. Essa relação de umidade tem uma influência importante nas propriedades e desempenho da madeira (GLASS, ZELINKA,

2010), (JANKOWSKY, 1986). De forma simplificada, segundo Mellado (2007), pode-se considerar que a água na forma líquida e como vapor movimenta-se pelas aberturas naturais da madeira e através das paredes celulares.

Existem dois tipos de água na madeira: a água livre ou capilar (presente nos espaços celulares ou intercelulares e retidas por forças capilares) e a água de impregnação ou higroscópica que se encontra nos espaços submicroscópicos da parede celular (ligada por forças físico-químicas). A perda das águas de impregnação afeta a maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A água de impregnação compreendida entre 6% a 28% é adsorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares e no intervalo de 0% a 6% encontra-se a água de adsorção físico-química aderida entre as moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias (van der Waals e pontes de hidrogênio).

O teor de umidade da madeira em uso depende principalmente da umidade relativa e da temperatura do meio. Fixando-se estas duas variáveis, o teor de água da madeira ajusta-se a um valor denominado umidade de equilíbrio. Isso torna possível a estimativa da umidade da madeira utilizada em diferentes condições ambientais (Galvão, 1975).

2.1.6.1 Modelos e equações para estimar a umidade de equilíbrio na madeira

O modelo de Hailwood e Horrobin (1946)⁵, considera um sistema constituído de polímero e água como sendo uma solução. Se aceita que a água se apresente de duas formas distintas: primeiro, como água de hidratação entre as moléculas e locais de adsorção e, segundo, como água de dissolução no polímero. Desta forma, a parede celular pode considerar-se integrada por três componentes: madeira seca, madeira hidratada e água dissolvida (GARCÍA, 2015).

⁵ Hailwood, A. J. e Horrobin, S. 1946. Absorption of water by polymers: Analysis in terms of a simple model. Transactions of the Faraday Society. 42B:84-102.

Simpson (1971) considera a teoria da adsorção de Hailwood e Horrobin (1946), para um hidrato e adota a Eq. (2.1) para o cálculo da umidade de equilíbrio (UE)⁶ da madeira em função da temperatura e umidade relativa.

$$UE = \frac{18}{M_p} \left[\frac{K h}{1 - K h} + \frac{K_1 K h}{1 + K_1 K h} \right] \cdot 100, \quad (2.1)$$

sendo: UE = umidade de equilíbrio da madeira (%); M_p , K , K_1 e h , parâmetros do material, sendo: M_p , o peso molecular da madeira por mol de sítio de adsorção; K , a constante de equilíbrio entre a água dissolvida e a sua pressão relativa de vapor (h); K_1 , seria uma constante de equilíbrio, representada pela razão entre a atividade química do hidrato para as atividades dos dois reagentes (água e madeira não-hidratada); 18, o peso molecular da água.

Posteriormente, Simpson (1973) desenvolve minuciosas análises e compara dez modelos matemáticos de teorias de adsorção de materiais higroscópicos (sistema madeira-água ou polímero-água), visando relacionar funcionalmente os dados de teor de umidade de equilíbrio e de umidade relativa do ar para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. Simpson (1973) conclui que a forma de dois hidratos do modelo Hailwood e Horrobin seja a mais precisa ao igualar o teor de umidade de equilíbrio UE em (%) à uma função da umidade relativa, estabelecendo a Eq. (2.2):

$$UE = \frac{18}{M_p} \left(\frac{K h}{1 - K h} + \frac{K_1 K h + 2K_1 K_2 K^2 h^2}{1 + K_1 K h + K_1 K_2 K^2 h^2} \right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

Na Eq.(2.2), também conhecida como a equação de dois hidratos, o primeiro termo entre parêntesis representa a fração da água livre dissolvida enquanto que o outro termo representa a fração da água presente como monohidrato e dihidrato; K é a constante de equilíbrio entre a água dissolvida e a sua pressão relativa de vapor (h); K_1 e K_2 são constantes de equilíbrio, representadas pela razão entre a atividade química do hidrato para as atividades dos dois reagentes (água e madeira não-hidratada); 18 é o peso molecular da água e M_p o peso molecular

⁶ No texto original, apresenta-se na equação a sigla M para umidade de equilíbrio em vez de UE.

da madeira por mol de sítio de adsorção. Simpson (1973) demonstrou que a Eq. (2.2) fornece um bom ajuste entre os dados de temperatura (T), teor de umidade de equilíbrio (UE) e umidade de referência (RH) ao se considerar: h, umidade relativa (decimal) e Mp, K, K₁ e K₂ parâmetros dependentes da temperatura, T em °C, conforme as equações (2.3) a (2.6)⁷:

$$Mp = 349 + 1,29.T + 0,0135.T^2, \quad (2.3)$$

$$K = 0,805 + 0,000736.T - 0,00000273.T^2, \quad (2.4)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938.T - 0,000303.T^2, \quad (2.5)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407.T - 0,000293.T^2. \quad (2.6)$$

Galvão (1975) utiliza o modelo de Hailwood e Horrobin (1946) e o método proposto em Simpson (1971) para prever o teor de umidade de equilíbrio da madeira em doze cidades do Brasil. Foram coletados dados das Normais Climáticas das temperaturas médias (T) e umidades relativas médias (UR), para o período 1931 a 1960, relativos aos doze meses de cada ano para cada uma das doze cidades. Conforme o autor, o teor de umidade de equilíbrio previsto pode ser aplicado em utilizações práticas. Para os cálculos adotou-se a Eq. (2.7) e as constantes conforme as Eqs. (2.8) a (2.10), sendo a temperatura, T na escala Fahrenheit.

$$UE = \left[\frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right] \cdot \frac{1800}{Mp}, \quad (2.7)$$

$$K_1 = 3,730 + 0,03642.T - 0,000154.T^2, \quad (2.8)$$

$$K_2 = 0,6740 + 0,001053.T - 0,000001714.T^2, \quad (2.9)$$

$$Mp = 216,9 + 0,01961.T + 0,005720.T^2, \quad (2.10)$$

Lima et al. (2000) determinaram valores de umidade relativa e de temperatura diariamente com termo-higrômetro instalado nas mesmas condições das amostras visando determinar a umidade de equilíbrio para vinte e sete espécies comerciais de madeiras tropicais brasileiras com uso de câmara de climatização. Para a estimativa das umidades de equilíbrio adotou a equação desenvolvida em Simpson (1971) conforme Eq. 2.7 e constantes conforme Eq. (2.8) a (2.10),

⁷ As equações com temperaturas em graus F convertidas para °C foram obtidas em Wood Handbook (2010), cap. 4, página 4-3.

sendo T em graus Fahrenheit, $h =$ pressão relativa de vapor d'água $= UR/100$ e $UR =$ umidade relativa. Foram observadas diferenças entre os valores obtidos pela fórmula de Simpson (1971) e os estimados pela regressão atribuindo-se estas diferenças, principalmente, ao fato de a equação de Simpson ter sido determinada a partir de valores de umidade de equilíbrio para espécies que diferem das tropicais brasileiras.

Jankowsky (1986) apresenta estimativas do equilíbrio higroscópico (UE) para oito cidades da região sul do Brasil (estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul). As estimativas foram feitas aplicando-se a mesma equação proposta em Simpson (1971), representada em Eq. (2.7) adotando-se as normais climatológicas fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia, considerando $h =$ umidade relativa/100 e as constantes M_p , K_1 e K_2 parâmetros dependentes da temperatura T em graus Celsius ($^{\circ}C$), conforme Eq. (2.11) a (2.13):

$$K_1 = 4,737 + 0,04773.T - 0,00050123.T^2 \quad (2.11)$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698.T - 0,000005553.T^2 \quad (2.12)$$

$$M_p = 223,374 + 0,69309.T + 0,01850.T^2 \quad (2.13)$$

Baraúna e Oliveira (2009) utilizam a equação proposta em Simpson (1971) para previsão da umidade de equilíbrio de três espécies tropicais na cidade de Manaus (tauari, angelim vermelho e guariúba) conforme Eq. (2.7) considerando $h =$ pressão relativa de vapor d'água e as constantes M_p , K_1 e K_2 como parâmetros dependentes da temperatura T em graus Celsius ($^{\circ}C$), conforme Eq. (2.11) a (2.13). Os autores afirmam que apesar de a equação de Simpson (1971) ser muito empregada para estimar a umidade de equilíbrio, a sua utilização pode incidir em erros e que dependendo da condição de ambiente estabelecida (temperatura e teor de umidade) e da espécie de madeira, mesmo entre indivíduos da mesma espécie, orienta-se cautela na sua aplicação.

O Instituto Nacional de Meteorologia - INMET⁸ a partir de observações realizadas diariamente na sua Rede de Observações de Superfície divulga, dentre outras, as seguintes variáveis ambientais (normais) utilizadas para o cálculo das previsões da umidade de equilíbrio:

⁸ INMET, www.inmet.gov.br.

temperatura média compensada (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), temperatura máxima absoluta (°C), temperatura mínima absoluta (°C) e umidade relativa do ar compensada (%). Conforme o INMET, o Município de Belo Horizonte/MG apresenta as seguintes referências: latitude de -19.877, longitude de -43.909, altitude de 857 m; chuva mais frequente no verão do que no inverno; clima temperado úmido com inverno seco e verão quente; temperatura média de 20,5 °C; pluviosidade média anual atingindo os 1430 mm, sendo agosto o mês mais seco com 11 mm, com uma média pluviométrica de 310 mm, sendo dezembro o mês de maior precipitação.

A metodologia do INMET, para o estabelecimento do cômputo do valor diário, considera as coletas de dados nas estações meteorológicas convencionais do INMET nos horários de 12, 18 e 24 UTC (Coordenadas Universais de Tempo⁹). Algumas estações, contudo, têm observações em apenas dois horários, normalmente, 12 e 24 UTC . Os valores diários utilizados nos cálculos nestas condições resultam dessas observações. Seguindo essas condições, as temperaturas mínima e máxima diárias são registradas em termômetros especiais (termômetro de mínima e termômetro de máxima) e lidas pelo observador, usualmente, nos horários de 12 UTC e 24 UTC, respectivamente. No cômputo do valor diário da umidade relativa do ar, o INMET utiliza, também, o valor de média compensada.

2.1.6.2 Densidade aparente ou massa específica

A NBR 7190 (1997) apresenta as definições de densidade básica da madeira e de densidade aparente. A densidade básica da madeira é a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado. Para determinar-se a massa seca deve-se manter os corpos de prova em estufa a 103°C até que a massa do corpo de prova permaneça constante. Para determinar-se o volume saturado deve-se primeiramente manter os corpos de prova submersos em água até atingirem massa constante antes de realizar as medidas finais dos corpos de prova. A densidade aparente da madeira é a massa específica convencional, obtida pelo quociente entre a massa e o volume, ambos ao mesmo teor de umidade ($U = 12\%$) sendo fornecida em (kg/m^3).

⁹ UTC corresponde ao Tempo Médio de Greenwich (GMT).

Segundo Hellmeister (1982), a densidade é a propriedade física mais significativa para caracterizar as madeiras e vem sendo utilizada por diversas normas e pesquisadores para classificar a madeira. Atestando-se esta afirmativa foram identificadas diferentes classificações das massas específicas das madeiras na literatura pesquisada. Lobão et al. (2010) apresentam a seguinte classificação utilizando-se as massas específicas básicas: muito baixa ($0,20 \text{ g/cm}^3$); média ($0,43$ a $0,55 \text{ g/cm}^3$); muito alta (acima de $0,80 \text{ g/cm}^3$). Melo e Coradin (1992), também consideram uma classificação segundo critérios de massa específica básica: madeira leve ($\leq 500 \text{ kg/m}^3$); madeira média (500 a 720 kg/m^3) e madeira pesada ($>720 \text{ kg/m}^3$). Njankouo et al. (2004) adotam como critério de classificação, a massa específica aparente a 12% de umidade: leve (400 a 600 kg/m^3), média e pesada (600 a 900 kg/m^3) e muito pesada (900 a 1100 kg/m^3). Sales (2004) apresenta uma proposta de agrupamento de massas específicas aparentes de folhosas brasileiras sendo: Classes C20 (650 a 800 kg/m^3); C30 (800 a 950 kg/m^3); C40 (950 a 970 kg/m^3); C50 (970 a 1000 kg/m^3) e C60 ($>1000 \text{ kg/m}^3$).

Conforme Gonzaga (2006), densidade ou massa específica aparente é um indicativo de quanto o cerne da madeira foi impregnado com resinas, óleos, cristais e outros extrativos, em sua defesa contra os xilófagos da floresta. Por este motivo, as madeiras de mais alta densidade, de forma geral, são bem adequadas ao uso no solo, como estacas, mourões, dormentes e na construção de pontes, pois enfrentam bem a umidade sendo chamadas, em algumas regiões, de “madeiras-do-chão”. Segundo Gonzaga (2006), a densidade alta encontra-se associada à resistência e boa qualidade da madeira, mas não quanto à qualidade e ao desempenho nos usos mais nobres.

2.1.6.3 Reportando resultados à umidade de 12%

A norma NBR 7190 (1997) especifica que os resultados de ensaios realizados para caracterizar as propriedades das madeiras devem ser reportados para a umidade de referência de 12%. Porém não apresenta nenhuma expressão para reportar a massa específica aparente à massa específica de referência. Logsdon (1998) esclarece que dificilmente se consegue condicionar a madeira para o ensaio com um teor de umidade exatamente de 12% sendo necessário corrigir os resultados dos ensaios para esse teor de umidade.

A norma ISO 3131 (1975) propõe para a correção do valor da densidade aparente para a densidade de 12% a utilização da Eq. (2.14).

$$d_{12\%} = d_U \cdot \left[1 - \frac{(1-k) \cdot (U-12)}{100} \right], \quad (2.14)$$

onde: k = coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, conforme Eq. (2.15):

$$k = 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot d_U, \quad (2.15)$$

sendo: d_U = densidade aparente a U% de teor de umidade, kg/m^3 ; U = teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, %.

Soares (2014) e Soares et al. (2015) apresentam os resultados de densidade da madeira, corrigidos ao teor de umidade de referência para dez espécies folhosas brasileiras (*Handroanthus serratifolius*, *Mezilaurus itauba*, *Clarisia racemosa*, *Guarea trichilioides*, *Copaifera langsdorffii*, *Vataireopsis speciosa Ducke*, *Goupia glabra*, *Cedrela odorata L.*, *Simarouba amara*, *Ochroma pyramidale*) as quais abrangem as classes de resistência D20 a D60. Foram comparados resultados de ensaios realizados em madeira seca ao ar e condicionada (valores próximos a 12% de teor de umidade) com os resultados obtidos a partir de ensaios em madeira muito úmida, no caso, saturada em água. Os trabalhos analisam diferentes equações e curvas e, após diversas análises, apresentam as conclusões: a) para se reportar valores à umidade de referência não se pode partir de ensaios em madeira com elevado teor de umidade; b) para reportar adequadamente resultados de ensaio à umidade de referência de 12%, os corpos de prova de madeira devem passar inicialmente por um processo de secagem prévia que os coloque com um teor de umidade em equilíbrio com o ambiente, podendo ser utilizados dois ambientes: protegido das intempéries (seco ao ar), ou clima padronizado (condicionado); c) para corrigir a densidade aparente ao teor de umidade de referência de 12%, a Eq. (2.16) proposta em BROCHARD (1960)¹⁰ forneceu resultados bastante adequados.

¹⁰ BROCHARD, F. X. Bois et charpente em bois (Le matériau et son utilisation). Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Paris. Éditions Eyrolles, 1960.

$$d_{12\%} = d_{U\%} \frac{\left(1 + \frac{12}{100}\right)}{\left(1 + \frac{U\%}{100}\right)}, \quad (2.16)$$

sendo: $d_{12\%}$: densidade aparente a 12% de teor de umidade, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $d_{U\%}$: densidade aparente a U% de teor de umidade, kg/m^3 ; U: teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, %.

Jesus et al. (2015) determinaram as características físicas (teor de umidade e massa específica) e mecânicas (resistências características à compressão, tração, cisalhamento paralelos às fibras e módulos de elasticidade longitudinal) de vinte e seis espécies nativas brasileiras (*Protium heptaphyllum*, *Vataireopsis speciosa* Ducke, *Dinizia excelsa* Ducke, *Vochysia guianensis*, *Nectandra* sp., *Bertholletia excelsa* H. B. K., *Quarea trichilioides* L., *Cedrela odorata* L., *Goupia glabra*, *Apuleia molaris*, *Astronium lecointei* Ducke, *Clarisia racemosa*, *Helicostylis podogyne* Ducke, *Tabebuia serratifolia*, *Tabebuia heptaphylla*, *Mezilaurus itauba*, *Manilkara huberi* (Ducke), *Simarouba amara*, *Glycydendron amazonicum* Ducke, *Copaifera langsdorffii*, *Aspidosmerma populifolium*, *Caryocar villosum*, *Martiodendron elatum* (Ducke), *Bagassa guianensis*, *Couratari oblongifolia* Ducke, *Couratari stellata*). Adotaram a Eq. (2.16) para corrigir a densidade aparente ao teor de referência de 12%. A utilização do valor característico do módulo de elasticidade longitudinal é adequado às verificações de estabilidade.

2.1.7 Características da madeira frente ao fogo

Dentre as características que quantificam o comportamento de queima da madeira encontram-se a degradação térmica da madeira, a ignição por fontes de calor, a taxa de carbonização da madeira, a liberação de calor e fumaça, a propagação de chamas em ambientes aquecidos (WHITE, DIETENBERGER, 2010). Segundo Law e Hadden (2017), é possível projetar edifícios de madeira com segurança usando o conhecimento da dinâmica fundamental do fogo e a sua interação com a estrutura. Portanto, compreender e quantificar estas características é de grande importância para o desenvolvimento dos projetos, tanto o arquitetônico quanto o estrutural. Considerando os aspectos de dimensionamento do elemento estrutural, nos próximos itens serão revisados os temas: o fluxo de calor na madeira aquecida (2.2.3.1), a degradação térmica da madeira (2.2.3.2) e a taxa de carbonização da madeira (2.2.3.3).

2.1.7.1 Fluxo de calor na madeira aquecida

Segundo Dinwoodie (2004), o fluxo de calor é determinante na ignição da madeira e encontra-se relacionado não só à temperatura absoluta, mas também ao tempo de exposição a essa temperatura. Vários fatores podem influenciar o fluxo de calor na madeira aquecida. Na literatura foram identificados: a permeabilidade da madeira, a presença de tiloses nos vasos e as fissuras no carvão.

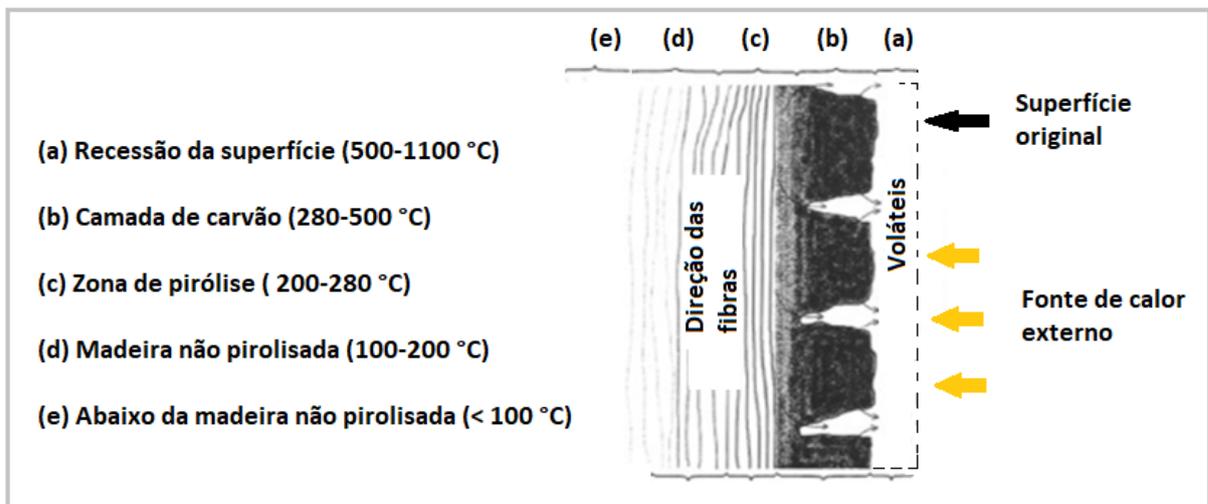
Os trabalhos Schaffer (1967), Schaffer (1984) e White e Dietenberger (2010) atestam a influência da permeabilidade na taxa de carbonização da madeira. Também Hugi e Weber (2012) observaram que a permeabilidade ao gás determina a velocidade de um fluido que passa por um meio poroso e pode ser considerada um parâmetro apropriado que caracteriza o comportamento de carbonização. No entanto, segundo Silva (2007), a porosidade da madeira não é fator determinante na permeabilidade visto que os vasos podem estar obstruídos por estruturas do tipo tiloses. Burger e Richter (1991) também observaram que a presença de substâncias especiais no cerne, como gomas e resinas, pode afetar a secagem da madeira por se liquefazerem com o calor obstruindo a passagem dos fluidos. As tiloses são estruturas resistentes que foram identificadas em amostras de carvão obtidas a diferentes temperaturas e analisadas em Scheel-Ybert e Gonçalves (2017).

Muniz et al. (2012) identificaram na anatomia do carvão de diferentes madeiras (araucária, pinus, castanheira, faveira bolacha, imbuia, itaúba, jacareúba, maçaranduba, mandioqueira, marupa) a estrutura anatômica característica da respectiva espécie podendo-se observar no lenho carbonizado da castanheira, por exemplo, as rachaduras seguindo as linhas de parênquima, vasos e raios bem distintos, inclusive mantendo a obstrução dos vasos por tiloses, evidenciando que as tiloses são estruturas resistentes e não voláteis.

Pereira et al. (2016) avaliaram as modificações anatômicas que ocorrem com a carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis*, híbrido de *Eucalyptus urophylla* e híbrido de *Eucalyptus grandis*, com densidade básica entre 531 e 585 kg/m³. Constataram que as paredes celulares dos vasos mantiveram-se intactas e as tiloses continuaram evidentes na região do cerne. Observaram que, durante a fase de secagem da madeira, o fluxo de gases provenientes da degradação de extrativos foi dificultado pelas tiloses presentes nos vasos do cerne.

Conforme Oliveira et al. (1982), a temperatura de uma peça de madeira sob a ação do calor aumenta gradativamente com o tempo de exposição ao calor e durante o seu aquecimento são identificados na peça diferentes processos de carbonização. Ocorre um gradiente térmico da superfície original para o centro desenvolvendo-se quatro zonas características sujeitas a diferentes níveis de temperatura representadas na Fig. 2.5.

Figura 2.5 – Níveis de carbonização na madeira carbonizada.

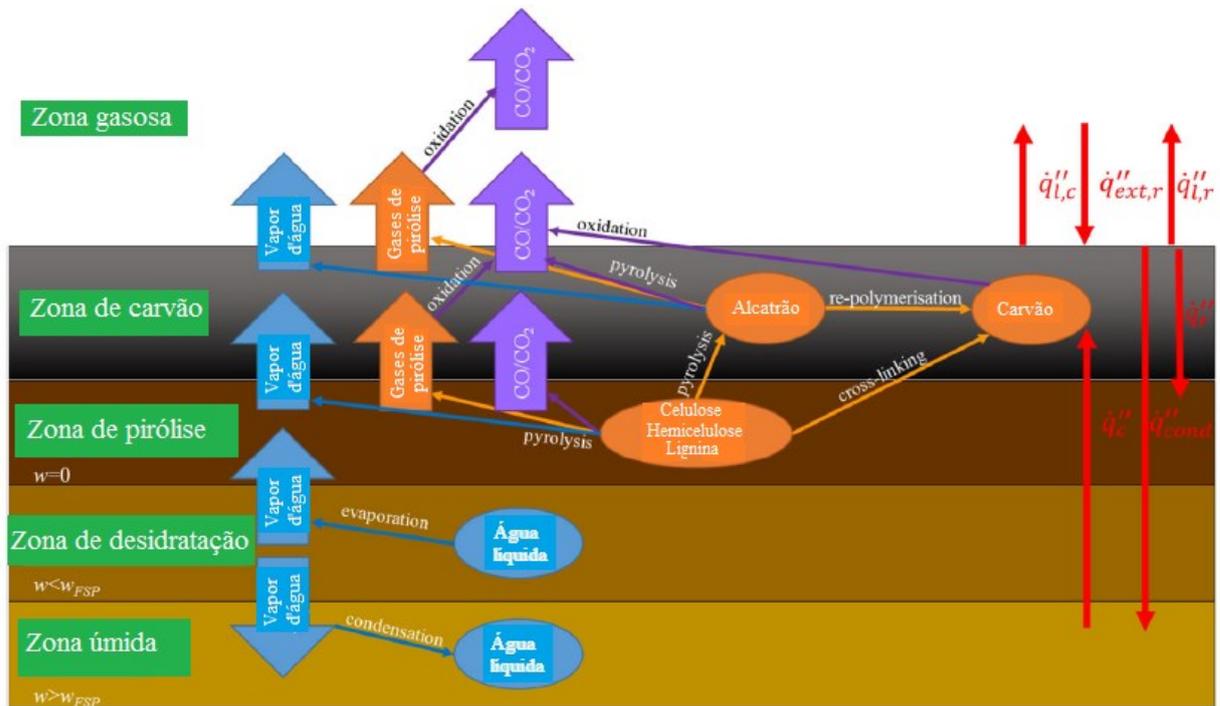


Fonte: Adaptado de Friquin (2010).

White e Nordheim (1992) observaram, a partir das análises nos elementos de madeira ensaiados a altas temperaturas, que a camada de carvão e as fissuras que nela se desenvolvem são fatores importantes na carbonização da madeira e que a recessão da superfície gera uma camada a ser carbonizada mais fina do que a espessura original da madeira que foi carbonizada. Essa recessão da superfície pode ser devida à oxidação química ou à degradação mecânica na superfície ou à contração do carvão sendo que as fissuras facilitam o fluxo de produtos voláteis e diminuem o contato entre os gases e o sólido.

Segundo Bartlett et al. (2018), após o aquecimento, e antes do início da pirólise, a água livre começa a evaporar à medida que as temperaturas dentro da madeira se aproximam de 100 °C. Algum vapor de água irá migrar mais fundo na amostra (longe da fonte de calor) e recondensar, aumentando o teor de umidade local promovendo a criação de três zonas: uma zona seca mais próxima da face exposta (na qual ocorre a pirólise); uma zona desidratante e uma zona úmida. A Fig. 2.6 apresenta o esquema dos processos químicos e físicos em uma amostra de madeira com a superfície carbonizada.

Figura 2.6 - Processos químicos e físicos em madeira carbonizada.



Fonte: Bartlett et al. (2018).

Na Fig. 2.6 têm-se: $q''_{l,c}$ - perda de calor superficial por convecção; $q''_{l,r}$ - perda de calor na superfície por radiação; $q''_{ext,r}$ - fluxo de calor externo; q''_r - radiação em profundidade; q''_{cond} - condução na amostra e q''_c - transferência de calor por convecção através de rachaduras.

A condutividade térmica na madeira, segundo Nogueira (2004), está relacionada a diversos fatores: densidade, estrutura e ultra-estrutura da madeira, direção da grã, umidade e temperatura. Quanto maior a densidade, a umidade e a temperatura na madeira, mais elevado será o seu coeficiente de condutividade térmica.

Segundo White e Diitenberger (2010), a condutividade térmica da madeira é quase a mesma nas direções radial e tangencial e, ao longo da grã, é de 1,5 a 2,8 vezes maior. A umidade também exerce influência no processo de carbonização. Devido ao calor, a água presente no material passa por diversas transformações.

2.1.7.2 A degradação térmica da madeira

A complexidade dos processos químicos e físicos que ocorrem em uma amostra de madeira promovem, em consequência, a degradação térmica de seus componentes (celulose,

hemicelulose e lignina). A combustão de madeira é uma combinação de reações químicas com processos puramente físicos, como transições de fase, difusão, troca de calor e processos de transferência de massa (ASEEVA et al., 2014).

Conforme White e Dietenberger (2010), à medida que a madeira atinge temperaturas elevadas, os seus diferentes componentes químicos sofrem degradação térmica que afeta o comportamento da madeira. A extensão das alterações depende do nível de temperatura e do tempo de exposição à fonte de calor. Em temperaturas abaixo de 100 °C, podem ocorrer reduções permanentes na resistência e sua magnitude depende do teor de umidade, do meio de aquecimento, do período de exposição e das características das espécies de madeira. A degradação da resistência que ocorre a esta temperatura pode ser, provavelmente, devido à reações de despolimerização dos polímeros da madeira, com a degradação de uma macro molécula (sem perda de peso de carboidratos). As ligações químicas começam a se romper em temperaturas acima de 100 °C e se manifestam como perdas de massa de carboidratos de vários tipos, que aumentam com a elevação da temperatura.

Nagaoka et al. (1988) após a avaliação de 7 espécies entre coníferas e folhosas, *Cedar* (360 kg/m³), *Japanease Sen* (420 kg/m³), *Lauan* (504 kg/m³), *Douglas fir* (598 kg/m³), *Oak* (646 kg/m³) *Oak* (657 kg/m³), *Cherry* (671 kg/m³) e *Scrub oak* (751 kg/m³) em ensaios de ignição em cone calorímetro, concluíram que embora a liberação de calor total devido à combustão da madeira tenha uma correlação positiva com a densidade aparente, parece haver outros fatores influentes além da densidade.

A produção de gases oxigenados também varia em função do teor de extrativos nas madeiras. Conforme Gonzaga (2006), nas coníferas predominam as terebentinas, que são voláteis e o breu, não volátil, em diferentes composições; nas folhosas, predominam compostos fenólicos, aromáticos, taninos, compostos nitrogenados e inúmeros carboidratos. Os extrativos (na forma de resina ou goma e, especialmente, as ceras e gorduras, de baixa massa molecular) na presença de calor migram para a superfície sob temperaturas entre 100 e 160 °C e evaporam completamente a 180 °C não sendo detectada nenhuma resina na superfície ou no interior da madeira acima de 200 °C. A evaporação de óleos essenciais, bálsamo ou resinas, sob a ação de forte calor, sem a contraposição de vapor sob pressão, numa secagem mal conduzida em estufa, pode levar à perda muito intensa de extrativos, que antes preenchiam os espaços entre os tecidos da madeira, produzindo um efeito na superfície da madeira que parece murchar (defeito denominado de colapso). Também Bianchi et al (2010), confirmam que durante a degradação

dos componentes da madeira, pequenas moléculas, como óleos e componentes voláteis, entram em ignição e são eliminadas sob a elevação da temperatura.

Segundo Canevarolo Jr. (2006), os polímeros podem apresentar pelo menos três temperaturas de transição importantes: a transição vítrea, a fusão cristalina e a cristalização. A temperatura de transição vítrea ou Tg corresponde ao valor médio da faixa de temperatura que, durante o aquecimento de um material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram possibilidade de mudança de conformação. A Tg trata-se de uma transição termodinâmica de segunda ordem que afeta as variáveis termodinâmicas secundárias de forma que algumas propriedades mudam com Tg, tais como o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão e o calor específico. As transições de segunda ordem caracterizam-se pela variação de capacidade calorífica, porém sem variações de entalpia (ou seja, sem absorção ou liberação de calor). Segundo Leite et al (2005), a Tg é variável com a composição do material, principalmente, com o teor de água. Segundo D'Almeida (1988), a lignina sendo um polímero amorfo possui um ponto de transição vítrea ou de amolecimento muito variável. Segundo Silva (2019), quanto à temperatura de transição vítrea (Tg), existe uma série de valores catalogados para diferentes espécies e métodos de extração, sendo eles igualmente discrepantes entre si. A Tg da lignina é de difícil obtenção de extração pois é fortemente influenciada pela massa molar, história térmica, ligações cruzadas, pressão, presença de contaminantes de baixa massa molar (como água e solventes) e método extrativo.

A temperatura de transição vítrea da madeira é a mesma da lignina que se encontra entre 60 °C e 200 °C e a diminuição do teor de umidade da madeira aumenta a temperatura de transição vítrea (Lenth, 1999; Length e Kamke, 2001).

As análises térmicas da madeira adotando-se as técnicas TG/DTG e DSC são utilizadas para a identificação das principais fases das reações de liberação ou absorção de energia e perda de massa. Diferentes trabalhos na literatura desenvolvidos sobre esse tema foram revisados.

Martin e Mattoso (2000) observam, por intermédio das análises térmicas de DSC, que os componentes hemicelulose e celulose de amostras de sisal, quando isolados, ficam mais acessíveis ao calor e se degradam a menores temperaturas em comparação à fibra de sisal bruta;

também observam que, no processo de separação dos componentes, ocorre a remoção de lignina que é o componente da fibra de sisal mais resistente à degradação térmica.

Oliveira (2009) adotou análises (TG/DTG e DSC) para estudo das mudanças térmicas nos constituintes químicos em duas folhosas (*Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*) e duas coníferas (*Pinus elliotti* e *Araucária angustifolia*) identificando 4 fases: desidratação, em torno de 62-71 °C; degradação de estruturas macromoleculares da madeira que contém grupos OH de fácil acesso, entre 100 e 270 °C; degradação total da hemicelulose e produção de ácidos orgânicos e furfural, responsáveis por acelerar a degradação da lignina e da celulose, nas seguintes etapas de temperatura: 270 a 350 °C, de 350-380 °C, correspondendo à degradação da celulose e para temperaturas maiores do que 380 °C, quando ocorre a degradação da lignina e a produção do carvão vegetal e cinzas.

Leroy et al. (2010) utilizaram a DSC para estudo da madeira das espécies mediterrâneas, sendo duas folhosas (*Erica arborea* e *Arbutus unedo*) e uma conífera (*Pinus pinaster*) com densidades aparentes a 12% de teor de umidade, respectivamente, 970, 731 e 630 kg/m³. Entre 130 e 630 °C todas as madeiras exibiram dois eventos exotérmicos com picos em 371 °C e 506 °C, provavelmente correspondendo à degradação da celulose associada à lignina.

Suárez et al. (2010) apresentam as curvas DSC e DTA (em atmosfera de ar) de madeira de *E. dunnii* que mostram dois picos exotérmicos, um à 338 °C e um à 478 °C. O primeiro pico pode ser devido à combustão de matéria volátil, proveniente da hemicelulose (temperaturas mais baixas), da celulose (temperaturas médias) e da decomposição da lignina, enquanto que o segundo pode ser devido à combustão do carvão.

Soares (2011) adotou análises TG/DTG e DSC na investigação de madeiras de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, em três idades diferentes e densidade aparente média de 567 kg/m³. As temperaturas relacionadas aos picos da curva DSC podem ser atribuídas à degradação da hemicelulose associada à celulose (354-378 °C) e à degradação da celulose residual e da lignina (484-526 °C).

Awal e Sain (2011) apresentam os resultados do estudo da estabilidade térmica de dois tipos de lignina oriundas de coníferas (Kraft lignina) e de folhosas (soda lignina). As temperaturas de amolecimento e de transição vítrea da lignina foram medidas por DSC (de 40 a 220 °C). As

propriedades térmicas foram investigadas por TGA (de 35 a 900 °C). Ambas as ligninas demonstraram baixo teor de voláteis e baixa perda de massa (6-8%) ocorrido a 250 °C. A lignina de folhosa apresentou 0,4% de teor de cinzas a 800 °C enquanto a lignina de coníferas, o teor de 1,58% à temperatura de 525 °C. As reações exotérmicas de decomposição de ambas as ligninas ocorreram entre 225 e 450 °C. A temperatura de transição vítrea (Tg) da lignina de folhosa foi à 93 °C enquanto a Tg da lignina de conífera foi à 100 °C.

Vidaurre et al. (2012) determinam as propriedades energéticas da madeira do *Schizolobium amazonicum* (paricá) com densidade aparente média de 355 kg/m³, à 12% de teor de umidade, com técnicas TG/DTG. As maiores perdas de massa foram observadas nos intervalos de 200 a 300 °C (14,89%); de 300 a 400 °C (50,39%) e acima de 450 °C (78,91%), intervalos, provavelmente, devidos à degradação dos componentes hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente.

Pereira et al. (2013) utilizaram análises TG/DTG para estudo da madeira de seis clones de *Eucalyptus spp* identificando intervalos entre 278 e 280 °C referentes à degradação de hemiceluloses associadas a menores proporções de celulose e lignina; entre 342 e 347 °C, referente à degradação da celulose e temperaturas próximas a 400 °C, correspondendo, principalmente, à degradação de lignina. As curvas DSC indicaram picos exotérmicos em 317 e 341 °C podendo ser atribuídos, principalmente, à degradação térmica das hemiceluloses e em 357 e 381 °C, provavelmente, devido à degradação dos produtos originários (voláteis) durante a decomposição térmica da celulose. De 380 a 400 °C ocorre um fluxo de calor, linear e constante, devido, provavelmente, à degradação mais intensa da lignina.

Carneiro et al. (2013) avaliaram o perfil de decomposição térmica da madeira de oito espécies da floresta de caatiga do Rio Grande do Norte, utilizando as técnicas TGA e DSC até a temperatura final de 600 °C. Foram estudadas as espécies *Bauhinia cheilantha*, *Mimosa tenuiflora*, *Caesalpinia pyramidalis*, *Piptadenia stipulacea*, *Croton sonderianus*, *Aspidosperma pyriforme* e *Commiphora leptophloeos* com densidades aparentes a 12% de teor de umidade, respectivamente: 1134, 995, 958, 857, 832, 781 e 365 kg/m³. Curvas TGA, semelhantes para as 8 espécies, indicam que a perda de massa na faixa de 300-400 °C correspondem à provável degradação da celulose. As curvas de DSC das oito espécies apresentam picos exotérmicos de 362 a 393 °C, coincidindo com os picos de máxima perda de massa atribuídos à degradação da celulose e liberação de voláteis, associada à frações de lignina.

Poletto (2016) investiga a estabilidade térmica de três espécies folhosas: *Eucalyptus grandis*, *Dipteryx odorata* e *Mezilaurus itauba*, com densidades aparentes a 12% de TU, respectivamente: 617, 1144 e 1008 kg/m³ e de uma espécie conífera: *Pinus elliottii*, com densidade aparente a 12% de 504 kg/m². As curvas DSC apresentam picos exotérmicos de 220-250 °C referentes à degradação provável da hemicelulose; picos endotérmicos de 349-366 °C, referentes à degradação provável da celulose; picos exotérmicos de 417-426 °C, associados à provável degradação da lignina. Observa-se que na análise com a curva DSC foi considerada a interação entre os diversos componentes da madeira e avaliou-se que os altos teores de extrativos presentes nas folhosas (4,0%, para *Eucalyptus*; 11%, para *Dipterix* e 14%, para *Mezilaurus*) promoveram a degradação dos componentes da madeira (hemicelulose e celulose) a temperaturas mais baixas, reduzindo a estabilidade térmica da madeira.

Alves (2017) utilizando técnicas TGA investiga sete espécies folhosas tropicais: *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Bertholletia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, *Astronium lecointei*, *Caryocar villosum* e *Peltogyne discolor*, com densidade aparente a 12% de teor de umidade, contidos no intervalo de 650 a 1150 kg/m³. As análises das curvas TGA permitem identificar que, apesar da variação nas propriedades das madeiras analisadas, o comportamento de degradação térmica foi bastante semelhante. A primeira perda de massa (entre 50 e 100 °C) corresponde à eliminação da água e a segunda perda de massa de 7,5% (entre 200 e 230 °C) corresponde, provavelmente, à degradação da hemicelulose. Observou-se que a *Dinizia excelsa*, de densidade aparente de 1131 kg/m³, apresentou uma redução na massa de 7% à temperatura de 230 °C e o *Hymenolobium petraeum* (angelim-pedra), de densidade aparente de 761 kg/m³, uma redução de cerca de 9% à temperatura de 225 °C. A maior redução observada no *Hymenolobium petraeum* poderia ser devido ao fato de apresentar menor densidade entre estas duas espécies e, em consequência, menor teor de celulose.

2.1.7.3 Taxa de carbonização da madeira para fins estruturais

Os processos termo-físico-químicos relacionados à carbonização da madeira são extremamente complexos e os fatores que governam a taxa de carbonização da madeira são diversos e encontram-se resumidos na Tab. (2.3).

Tabela 2.3 – Fatores que governam a taxa de carbonização.

Fatores	Explicação
Densidades médias	Quanto mais material concentrado em um determinado espaço, mais energia será necessária por unidade de volume para se decompor e mais material pirolisado (carvão) será liberado no processo.
Teor de umidade	Mais energia será necessária para evaporar a umidade absorvida pela amostra.
Permeabilidade	Uma maior permeabilidade permite um maior fluxo de voláteis.
Espécies	Diferenças na composição química e na anatomia promovem diferentes rendimentos e taxas de formação de carvão e gases de pirólise.
Orientação do corpo de prova	Afeta as condições convectivas, o fluxo de gás, o comportamento da chama e a delaminação.
Tamanho do corpo de prova	Afeta o tamanho da chama e provoca o retorno térmico e a troca de calor.
Direção das fibras	Influencia a permeabilidade e a condutividade térmica.
Proteção da superfície	Reduz a temperatura experimentada pela madeira, atrasando a carbonização, porém causa uma aceleração na carbonização no momento em que a proteção caia.
Cenário de aquecimento	Fluxos de calor mais altos fornecem mais energia para iniciar reações de pirólise (desde 30 kW/m ² , observado no ensaio segundo padrão da ISO 834, a 270 kW/m ²).
Concentração de oxigênio	O aumento da concentração de oxigênio (de 4% a 21%) permite mais oxidação do carvão e permite mais combustão de gases de pirólise, aumentando o tamanho da chama e o retorno da radiação do calor.

Fonte: Bartlett et al. (2018)

É importante compreender o termo taxa de carbonização, conceitualmente, como uma taxa da variação da velocidade de carbonização. Segundo Friedli (2013), o exemplo mais clássico sobre o uso de taxas de variação é o movimento de partículas. Neste caso, calcular a velocidade instantânea significa calcular a velocidade média em intervalos de tempo $[t, t+\Delta t]$ infinitesimais, ou seja, determinar a derivada de $x(t)$ com respeito a t .

O conceito de derivada é utilizado para expressar variações instantâneas de uma dada função e uma das primeiras aplicações é na definição de velocidade instantânea (SOSSAE et al. 2010). Em termos gráficos a velocidade instantânea é definida como a inclinação da reta tangente à curva do deslocamento em relação ao tempo em determinado ponto P, expressa na Eq. (2.17).

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (2.17)$$

Na Eq. (2.17), Δx corresponde ao deslocamento no intervalo de tempo Δt ; quando Δt tende a zero conceitualmente é substituído por dt , e o deslocamento correspondente Δx , por dx .

Segundo Lau et al., (1999), a carbonização de elementos estruturais de madeira apresentam modelos, em geral, representados como na Eq. (2.18).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \eta_1 t^n \quad (2.18)$$

Na Eq. (2.18), $\partial x/\partial t$ representa a taxa instantânea do avanço da frente de carbonização; t é o tempo e η_1 representa a constante de regressão. O expoente n determina se a taxa de carbonização é crescente ($n>0$), constante ($n=0$) ou decrescente ($n<0$) enquanto o tempo aumenta, sendo que n atinge o valor 1 se os dados iniciais, não lineares da taxa, sejam excluídos da regressão.

Segundo Lau et al (1999), de forma geral, o comportamento de carbonização da madeira pode ser caracterizado pelo taxa de perda de peso (g/s) ou pela taxa de avanço da frente do carvão ao longo de um determinado eixo ou dimensão (mm/s). Esta última definição tem sido mais amplamente utilizada, particularmente no projeto e na análise de segurança estrutural em situação de incêndio, para o cálculo da “área residual” da seção transversal. Na prática, os dados experimentais de taxa de carbonização para cada corpo de prova são determinados conforme a Eq. (2.19).

$$\beta = \frac{x}{t}, \quad (2.19)$$

sendo: x , a profundidade de carbonização, que corresponde às distâncias nominais entre a superfície mais exterior do elemento original e a posição da linha de carbonização, em milímetros (mm); t , tempo de exposição ao fogo, em minutos (min).

Diferentes publicações na literatura técnica internacional apresentam resultados de investigações experimentais sobre a taxa de carbonização de madeiras de diferentes espécies coníferas e folhosas seja na forma serrada ou de madeira engenheirada.

Segundo Babrauskas (2004), os dados disponíveis sobre taxa de carbonização, profundidade de carbonização e tempos de queima de elementos de madeira são obtidos basicamente por

intermédio de três procedimentos: (1) dados tradicionais obtidos via testes de resistência ao fogo onde a exposição é realizada em fornos com controle de temperatura segundo a curva ISO 834 ou procedimentos da ASTM E119; (2) dados obtidos via testes realizados em calorímetro de cone ou outros testes de bancada com especificação de um fluxo de calor, normalmente invariante ao longo do tempo, imposto ao corpo de prova; (3) dados de programas experimentais em larga escala onde compartimentos inteiros ou casas são expostos ao fogo em escala real.

Em relação às diferenças existentes entre os ensaios de exposição ao fogo padrão pela ISO 834 ou segundo a ASTM E 119, a normativa AWC-NDS(2018a) avalia que as taxas de carbonização experimentais determinadas em várias partes do mundo parecem ser consistentes, o que justifica a utilização desses dados para projetos, independentemente do método adotado.

É importante ressaltar a distinção entre as taxas de carbonização uni-dimensional e bi-dimensional. Conforme Östman et al. (2010), a carbonização uni-dimensional (β_0) é válida para a transferência de calor em uma superfície de madeira semi-infinita ou em partes de uma seção transversal onde a transferência de calor seja predominantemente uni-dimensional. Por outro lado, a carbonização bi-dimensional (β_n) inclui os efeitos da transferência de calor em duas dimensões na vizinhança de cantos ou próximo a fissuras largas, levando em consideração os cantos arredondados. Tanto a carbonização uni-dimensional quanto a carbonização bi-dimensional são aplicáveis aos elementos de viga e coluna e superfícies vertical (parede) e horizontal (laje).

Apresenta-se na sequência, uma revisão de trabalhos que tratam de ensaios experimentais de carbonização de diferentes espécies de madeiras sob exposição ao fogo padrão conforme a ISO 834 ou conforme a ASTM E 119 e as respectivas metodologias aplicadas.

Schaffer (1966) realiza uma extensa revisão sobre o tema da carbonização da madeira e apresenta como conclusões: a capacidade de calor dos sólidos de madeira pode ser considerada constante para qualquer madeira, o que significa que quanto mais massa disponível para absorver energia térmica, mais lenta será a degradação; a massa é diretamente proporcional à gravidade específica da madeira; o fator que controla a taxa global da reação de decomposição não é a composição química da madeira, mas sim uma característica física; o conteúdo de combustível volátil está ligado à propagação de chamas em um material e pode influenciar a taxa de desenvolvimento do carbonização; somente depois de 4 mm de profundidade de carvão é que a taxa de carbonização

se torna regular. A. Em resumo, as seguintes propriedades da madeira podem influenciar a taxa de desenvolvimento do carvão sob exposição ao fogo e devem ser consideradas: (a) densidade (gravidade específica), (b) condutividade térmica, (c) umidade, (d) permeabilidade, (e) orientação do anel, (f) espessura da amostra, (g) temperatura de carbonização, (h) conteúdo volátil combustível e (i) características da camada carbonizada (espessura, profundidades e larguras das fissuras, permeabilidade e condutividade térmica). Também as condições ambientais, como a temperatura de exposição e o tipo de fonte de calor.

Schaffer (1967) avalia experimentalmente a taxa de carbonização no sentido normal às fibras de duas espécies coníferas: *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) e *Pinus sp.* (Southern pine) e uma espécie folhosa: *Quercus alba* (white oak) norte-americanas. Adotou-se procedimento da ASTM E 119 considerando os seguintes parâmetros: temperatura de exposição ao fogo (538, 816 e 927 °C); valores de teor de umidade (TU) de equilíbrio (6%, 12% e 18%); orientação dos anéis anuais (paralelo e normal à superfície de exposição ao fogo); temperatura de carbonização correspondente a 288 °C. Utilizou corpo de prova de madeira laminada colada de seção transversal de 254 mm × 508 mm × 76,2 de espessura, com uma única face exposta ao fogo. O controle de temperatura no interior dos corpos de prova foi realizado com dois termopares tipo K, à cada uma das seguintes profundidades: 6,35; 12,7; 25,4; 38,1 e 50,8 mm, espaçados de 25,4 mm. Identificou que a taxa de carbonização é inversamente proporcional ao teor de umidade e à densidade aparente. Foram desenvolvidos modelos para a predição da taxa de carbonização, B (mm/min), para cada espécie investigada em função de três constantes relativas à cada espécie, sendo, portanto, de uso muito exclusivo à estas espécies.

White (1988a) e White e Nordheim (1992) apresentam extensa investigação para a compreensão do processo de taxa de carbonização de espécies coníferas e folhosas. Os corpos de prova de seção de 510 mm × 230 mm e espessuras de 38 mm e 63 mm foram submetidas aos critérios de ensaio da ASTM E 119-83 em exposição uni-dimensional e sob temperaturas de 538, 704, 843, 927 °C e tempos de exposição de 5, 10, 30 e 60 min, respectivamente. Foram adotados dois termopares nas profundidades de 13, 25, 38 e 51 mm em cada corpo de prova; as extremidades das peças foram isoladas com material isolante; a temperatura adotada na base de carvão foi de 288 °C. Os dados de densidade, permeabilidade (penetração em mm) e taxa de carbonização para cada espécie ensaiada encontram-se na Tab. (2.4).

Tabela 2.4 – Taxa de carbonização de espécies analisadas em White (1988a).

Grupo	Espécie	Nome comum	d_m (kg/m ³)	Penetração mm	B (mm/min)
Conífera	<i>Thuja plicata</i>	Western red cedar	310	3	1,04
	<i>Sequoia sempervirens</i>	Redwood	343	4	0,9
	<i>Picea engelmannii</i>	Engelmann spruce	425	3	0,89
	<i>Pinus sp.</i>	Southern pine -	509	31	0,87
Folhosa	<i>Tilia sp.</i>	Basswood	399	30	1,29
	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Yellow poplar	504	5	0,97
	<i>Quercus sp.</i>	Red Oak	664	3	0,79
	<i>Acer sp.</i>	Hard maple –	691	47	0,87
	<i>Quercus alba</i>	White oak – carvalho branco	811	3	0,59

White (1988a) e White e Nordheim (1992) investigaram alguns fatores para esclarecer não-linearidades no efeito da densidade sobre a taxa de carbonização: o calor de combustão dos diferentes extrativos nas várias espécies; as características anatômicas, a permeabilidade e o fator de contração de carvão. Também, foram avaliados diferentes modelos de regressão para a predição da taxa de carbonização, considerando como variáveis preditoras: densidade aparente, teor de umidade, a profundidade de penetração de produto preservante a base de arseniato de cobre cromatado e o coeficiente para a espécie de madeira (folhosa ou conífera). Os parâmetros para a prescrição dos valores de taxa de carbonização foram significativamente diferentes para as várias espécies gerando modelos complexos que, no entanto, contribuem para o desenvolvimento de modelos teóricos mais adequados. White (1988a) identificou um efeito de não linearidade da densidade na taxa de carbonização que poderia estar relacionado à permeabilidade das espécies. Nesse caso a permeabilidade poderia influenciar o movimento da umidade associado ao gradiente de temperatura e ao efeito das diferentes composições químicas na degradação térmica. A partir dos dados de permeabilidade (penetração) apresentados na Tab. (2.7), pode observar-se, por exemplo, as folhosas Hard maple, permeável (47 mm) e White oak, impermeável (3 mm), de densidades relativamente próximas (691 e 811 kg/m³, respectivamente) mas apresentando taxas de carbonização muito diferentes (0,87 e 0,59 mm/min).

Gardner e Syme (1991) ensaiaram oito espécies australianas e determinaram as taxas de carbonização para 60 minutos de exposição no ensaio padrão ISO 834, conforme dados relacionados na Tab. (2.5).

Tabela 2.5 – Taxa de carbonização de espécies australianas determinadas em Gardner e Syme (1991).

Madeira	Espécie	d_m (kg/m ³)	B (mm/min)
Conífera	<i>Pinus radiata</i>	526	0,80
	<i>Callitris glauca</i>	666	0,60
Folhosa	<i>Eucalyptus regnans</i>	659	0,40
	<i>Lophostemon confertus</i>	819	0,50
	<i>E. marginata</i>	848	0,70
	<i>E. Corymbia maculata</i>	901	0,50
	<i>Eucalyptus pilulares</i>	939	0,60
	<i>E. saligna</i>	968	0,50

O valor de taxa de carbonização para a madeira de *E. saligna*, de maior densidade (968 kg/m³) foi de 0,50 mm/min e para a madeira de *Eucalyptus regnans*, de densidade menor (659 kg/m³), foi de 0,40 mm/min. O *Eucalyptus regnans* (*Victorian ash*, também conhecida como *Fraxinus*), do gênero botânico da família Oleaceae, apresenta no cerne, frequentemente, veios de goma e minerais, bem como estrias, que provavelmente reduzem a penetração do calor e, em consequência, reduzindo a taxa de carbonização.

Collier (1992) determinou a taxa de carbonização de espécies coníferas da Nova Zelândia com densidades de 400 a 600 kg/m³ a 12% de teor de umidade, em corpos de prova na forma serrada e laminada colada. Foram investigados fatores que afetam a taxa de carbonização, tais como: taxas de crescimento da árvore, anéis de crescimento mais largos e maior variabilidade de densidade entre os anéis anuais. Os experimentos foram realizados no forno com controle de temperatura segundo a ISO 834 e pressão por período de 60 min. Foram preparados corpos de prova de 200 mm × 100 mm de seção e espessura de 90 mm dispostos em uma parede de material refratário instalada dentro do forno com exposição ao fogo unidimensional. As extremidades dos corpos de prova foram seladas com uma fita de alumínio. O teor de umidade foi determinado por medidas de perda de massa das amostras secas no forno. Foram ensaiadas, também, amostras de MLC de seção 545 mm × 135 mm e comprimento de 1985 mm, densidade 452 kg/m³ e cerca de 12% de teor de umidade e expostas ao fogo em três direções. Foram utilizados 4 termopares à 18 mm da superfície externa e 22 termopares à 36 mm da superfície externa espaçados à cada 100 mm. As taxas reais de carbonização foram determinadas de duas maneiras: 1) retirando-se as partes carbonizadas e obtendo-se a média da profundidade remanescente subtraída da espessura inicial que foi dividida pelo tempo de exposição; 2) Para as sete amostras instrumentadas com termopares e expostas por 60 min, as taxas de carbonização foram determinadas tomando em conta o tempo para alcançar a marcação de 300 °C. As conclusões deste trabalho foram: a) a

densidade e o teor de umidade são os dois principais fatores a influenciar a taxa de carbonização tanto em madeiras serradas quanto em MLC; b) o comportamento de MLC difere da madeira serrada nas seguintes situações: pode ocorrer carbonização maior na linha de cola; a madeira adjacente à nós tem carbonização acelerada enquanto em MLC este efeito diminui; c) os valores de taxa de carbonização determinados experimentalmente (0,65 - 0,70 mm/min) foram menores em relação aos valores determinados utilizando-se a equação proposta na AS 1720.4 (2006).

Pinto (2005) realizou ensaios em corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus citriodora*, com densidades aparentes a 12% de TU, de 843 e 979 Kg/m³, respectivamente, para determinação da taxa de carbonização unidimensional. Foram preparados 24 corpos de prova com seções nominais de 175 mm × 175 mm e espessura de 65 mm, expostos ao gradiente de temperatura segundo condições de temperatura prescritos na norma ASTM E 119 (2000), porém em forno elétrico. Foram adotados termopares do tipo K, com bainha de 1,5 m sendo 2 termopares à cada uma das profundidades: 5, 10 e 15 mm; 1 termopar à profundidade de 25 mm e um termopar posicionado em contato com a superfície da madeira para monitorar a temperatura superficial. Depois de resfriados, foram avaliadas as perdas de massa e realizadas as medidas das espessuras carbonizadas determinando-se a taxa de carbonização das espécies. Os corpos de prova apresentavam teor de umidade médio de 19,21% e taxa de carbonização média de 0,21 mm/min. Pode-se deduzir que o alto teor de umidade presente nos corpos de prova atrasou a carbonização da madeira reduzindo os valores de taxa de carbonização.

Pinto (2005) apresenta o processo para a determinação da taxa de carbonização em seis vigas de *Eucalyptus citriodora* e seis vigas de *Eucalyptus grandis* com dimensões nominais de 160 mm × 260 mm × 2000 mm expostas ao gradiente de temperatura segundo os dados de tempo × temperatura propostos pela norma ASTM E 119 (2000), com exposição nas quatro faces das vigas, mas sem aplicação de esforços. Foram instalados termopares tipo K nas profundidades de 10, 20 e 30 cm, totalizando 72 pontos para captura de dados em forno, à gás, de dimensões internas de 4,00 m × 3,07 m × 0,91 m de profundidade. Durante os dez minutos iniciais ocorre intensa liberação de fumaça e vapores d'água sendo que o *E. citriodora* apresentou maior quantidade de fumaça mais odorífica relacionado à presença de extrativos (15,03%) enquanto o *E. grandis* apresentou 10,83% de extrativos. O *E. citriodora* apresentou 25,27% de teor de lignina e o *E. grandis* 30,95%. A taxa de carbonização obtida para as duas espécies foi de 0,58 mm/min considerando-se a temperatura na base de carvão sendo 290 °C. A profundidade média de

carbonização foi de 29,74 mm após 59 min de exposição para o *E. citriodora* e 29,27 mm após 57,80 min de exposição para o *E. grandis*.

Njankouo et al. (2004) e Njankouo et al. (2005) propõem um procedimento para se determinar as taxas de carbonização de madeiras de sete espécies tropicais (de densidades entre 500 e 1000 kg/m³) e três espécies de regiões temperadas: *Shorea rubro* (Meranti), *Quercus robur* (oak), *Nauclea diderrichii* M. (Bilinga), *Intsia spp.* (Merbau), *Azalia sp.*, *Millettia laurentii* (Wenge), *Shorea spp* (Balau) e *Lophira alata* (Azobe), submetidas a uma condição de transferência de calor unidimensional. Foram preparados 20 corpos de prova em MLC com dimensões 250 mm (largura) × 140 mm (altura) × 90 mm (espessura). Foi utilizado um forno vertical de 2 m × 2 m, conforme norma belga para verificação da resistência de elementos estruturais, NBN 713-020¹¹. No interior do forno preparou-se uma estrutura em aço preenchido com alvenaria de concreto celular na qual foram realizadas vinte pré-furações de 280 mm × 170 mm para acomodar os 20 corpos de prova com os respectivos materiais de isolamento térmico (fibra cerâmica) para minimizar o efeito de arredondamento das quinas. Os corpos de prova foram submetidos à curva de incêndio padrão ISO 834. A instrumentação constou de quatro termopares instalados no interior de cada corpo de prova. O ensaio concluía quando o termopar atingia a temperatura de 300 °C. As principais conclusões apresentadas no trabalho são: a) os resultados confirmam que a densidade da madeira influencia significativamente na taxa de carbonização; b) os valores experimentais das taxas de carbonização para espécies folhosas tropicais variaram de 0,36 a 0,58 mm/min; c) devido à grande variedade de espécies madeireiras, existe ainda uma grande demanda por ensaios para se determinar o efeito relativo das propriedades da madeira e dos fatores externos sobre a taxa de carbonização.

Pinto e Calil Jr (2008) investigaram experimentalmente a taxa de carbonização e propriedades químicas da madeira de cupiúba (*Goupia glaba Aubl.*) da família Goupiaceae com 840 kg/m³ a 12,68% de TU. Foram utilizadas peças de seção comercial de 50 mm × 200 mm × 2300 mm, sob ensaio seguindo a curva padrão da ISO 834, utilizando-se forno a gás, sem aplicação de esforços. Considerou-se a temperatura na base de carvão sendo 290 °C. O valor médio para a

¹¹NBN 713-020 – Fire resistance of building construction elements. Belgium Institute of Standardization; 1968.

taxa de carbonização foi de 0,30 mm/min determinados a partir de dados de temperatura capturados por termopar tipo K.

Hugi et al (2006) e Hugi e Weber (2012) investigaram a taxa de carbonização de espécies de clima temperado e tropicais: *Triplochiton scleroxylon* (abachi), *Hallea ciliata* (abura), *Acer pseudoplatanus* (maple), *Fagus sylvatica* (beech), *Quercus robur* (oak), *Fraxinus excelsior* (ash), *Picea abies* (spruce), *Pterygota macrocarpa* (koto), *Shorea ssp.* (meranti dark red), *Shorea ssp.* (meranti light red), *Entandophragma utili* (sipo), *Abies alba* (fir), *Erismia sp* (Cambará Mixto), *Ficus glabrata* (Bibosi), *Erismia spp* (Cambará Rojo.), *Calophyllum brasiliense* (Palomaria), *Hymenaea courbaril L* (Paquio.) com densidades variando de 350 a 1033 kg/m³. Avaliou-se o comportamento de madeiras tropicais em substituição às madeiras nativas européias na fabricação de portas contra fogo confrontando o projeto de norma européia prEN 15269-3 que prescreve a metodologia para o intercâmbio de peças de madeira com base exclusivamente na densidade da madeira. Os corpos de prova de dimensões de 45 mm × 90 mm × 1000 mm, submetidos à curva padrão da ISO 834 por 30 minutos em forno horizontal, considerando-se as direções 0°, 45° e 90° dos anéis de crescimento (tangencial, radial, radial, respectivamente) na fabricação dos corpos de prova. As conclusões do trabalho foram: a) não é confiável adotar a densidade da madeira como único parâmetro para validar a adoção de uma espécie de madeira alternativa como prescreve o projeto de norma européia prEN 15269-3 aplicando-se não apenas no caso da substituição da madeira nativa européia por madeira tropical, mas também pelo intercâmbio de espécies de madeira nativas européias entre si; b) dentre as avaliações realizadas no estudo, a substituição promovida com base na densidade atinge o pior resultado: três das cinco substituições (60%) resultaram ser errôneas; c) não identificou-se correlação entre a densidade das madeiras e a taxa de carbonização; d) existe uma correlação entre a taxa de carbonização e o índice de permeabilidade ao oxigênio perpendicularmente às fibras da madeira; e) a taxa de carbonização é afetada pela composição dos gases relativos à degradação química da madeira na zona de pirólise; f) a permeabilidade pronunciada de gases quentes acelera a degradação da parede celular e aumenta a taxa de carbonização da madeira.

Apresenta-se na Tab. (2.6) um resumo das metodologias utilizadas para a determinação das taxas de carbonização de madeiras. Foram destacados os itens: as dimensões dos corpos de prova, o tipo de forno adotado, a curva de ensaio adotada e detalhes dos procedimentos realizados, dando preferência aos procedimentos realizados em forno a gás.

Tabela 2.6 – Metodologias para ensaio de carbonização da madeira com função estrutural, em forno a gás.

Referência	Elemento/ Dimensões (mm)	Tipo de Forno/Curva	Procedimentos
Schaffer (1967)	MLC 254 × 508 × 76,2	Vertical/ASTM E119-61	<ul style="list-style-type: none"> - Exposição uni-dimensional (254 mm x 508 mm); - Termopares localizados ao longo da linha horizontal no centro do CP espaçados de 25,4 mm sendo dois termopares a cada uma das profundidades: 6,35 mm; 12,7 mm; 25,4 mm; 38,1 mm e 50,8 mm. - Temperaturas de exposição constantes: 538°C, 816°C, 927°C; <ul style="list-style-type: none"> - teor de umidade de equilíbrio (6, 12 e 18%); - orientação dos anéis anuais (paralelo e normal à superfície de exposição); - Temperatura adotada na base de carvão: 288°C.
White (1988) White e Nordheim (1992)	MLC 230 × 510 × 63	Vertical/gás/ ASTM E119-83	<ul style="list-style-type: none"> - Exposição uni-dimensional; - 4 temperaturas: 538, 704, 843, 927°C a 5, 10, 30 e 60 min, respectivamente; - 2 termopares nas profundidades: 13-25-38-51 mm; <ul style="list-style-type: none"> - Extremidades das peças com isolantes; - Temperatura adotada na base de carvão: 288°C.
Collier (1992)	Serrada 200 × 100 × 90 MLC 545 × 135 × 1985		<ul style="list-style-type: none"> - Patamares de temperatura; - Temperatura adotada na base de carvão: 300°C; - 60 min de exposição.
Lau et al. (1999)	Serrada 50,8 × 101,6		<ul style="list-style-type: none"> - Exposição constante à temperatura de 500°C; - Carga constante de tração de 15570 N (1/3) da resistência característica.
Njankouo et al.(2004)	250 × 140 × 90	ISO 834	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura na base de carvão 300°C.
Hugi et al. (2006)	45 × 90 × 1000	Forno horizontal ISO 834	<ul style="list-style-type: none"> - Exposição de 30 min; - Nas direções 0°, 45°, 90° dos anéis de crescimento.
Pinto e Calil Jr. (2008)	60 × 200 × 2350	Forno gás, ISO 834	<ul style="list-style-type: none"> - Sem aplicação de esforços; - Temperatura na base de carvão 300°C.

Com relação à definição das dimensões e do processo de condicionamento dos corpos de prova para o ensaio de carbonização da madeira, foram verificadas na literatura técnica dados que poderiam contribuir. As versões de 1961 e 2000 da norma ASTM E-119 propõem que os corpos de provas apresentem a menor dimensão igual ou superior a 150 mm de forma a estarem em conformidade com as dimensões reais de elementos estruturais presentes em estruturas pesadas de madeira. Ambas as versões consideram que para elementos estruturais, que normalmente apresentam até três superfícies expostas ao fogo, a influência da transferência de calor de uma superfície exposta a outra superfície da mesma peça pode ser negligenciada para período de exposição ao fogo até 60 min, considerando que a menor dimensão seja superior a 150 mm.

Dentre as especificações propostas na NBR 5628 (2001) para os ensaios de resistência ao fogo têm-se que: i) as dimensões dos corpos de prova adotados devem, de preferência, ser as reais de utilização; ii) no início do ensaio, os corpos de prova devem apresentar um teor de umidade próximo daquele previsto para as condições normais de uso. Observou-se na literatura que a equação proposta em Simpson (1973) possibilita a determinação de teor de umidade de equilíbrio da madeira.

2.1.7.4 Conclusões parciais do item 2.1

A revisão da literatura permitiu identificar as lacunas referentes à carência de dados experimentais acerca de parâmetros de carbonização de espécies folhosas brasileiras. A necessidade de disponibilização desses dados em nível nacional encontra-se registrada na EN 1995-1-2 (2004). A avaliação experimental de treze espécies nacionais irá contribuir para a geração de dados experimentais de taxa de carbonização. Foi identificado que não há homogeneidade nos tamanhos e formas dos corpos de prova para os ensaios de carbonização da madeira. Foi identificado que a proposta das versões de 1961 e 2000 da norma ASTM E-119 (dimensão mínima a partir de 150 mm) vai de encontro com proposta da NBR 5628 (2001) que prescreve que as dimensões da amostra, para a verificação da resistência ao fogo, devem, de preferência, ser dimensões reais de utilização. sob exposição ao fogo uni-dimensional e que no início do ensaio, a amostra deve apresentar teor de umidade próximo daquele previsto para as condições normais de uso. Identificou-se na literatura que a equação proposta em Simpson (1973) foi empregada para a determinação da umidade de equilíbrio da madeira em elementos estruturais em serviço.

Verificou-se que a temperatura na base de carvão de 300 °C, prescrita pela EN 1995-1-2 (2004) para a maioria das coníferas e folhosas, foi adotada em diversos trabalhos desenvolvidos na Europa, Nova Zelândia e Brasil. Verificou-se ser de grande eficiência a utilização de termopares instalados a diferentes profundidades no corpo de prova para a verificação da frente de carbonização (300 °C) determinada a partir de uma série de medições de temperatura.

A literatura apresenta dados de taxa de carbonização de diferentes espécies de madeira oriundas de diferentes trabalhos e o conjunto apresenta grande variabilidade (0,21-1,29 mm/min) que se afastam muito dos valores normativos (no EN 1997-1-2 seria 0,65-0,50 mm/min). Uma razão para este fato, segundo Schmid et al. (2014a), a exposição ao fogo seja diferente da exposição ao fogo padrão. A esse respeito, não foi identificado, na literatura técnica, um procedimento adotado internacionalmente para a determinação da taxa de carbonização da madeira que propicie a comparação dos resultados alcançados em diferentes instituições de pesquisa. A esse respeito, Friquin (2011) enfatiza que, no âmbito das normas de resistência de materiais construtivos frente ao fogo, existe a necessidade de definição de um procedimento com essas características.

2.2 Segurança contra o incêndio nas construções

A segurança contra o incêndio é uma preocupação importante em todos os tipos de construção que se reflete nos requisitos de projeto das normas de construção (WHITE E DIETENBERGER, 2010) e no desenvolvimento do projeto global do edifício no qual serão incluídas, com mais facilidade e menor custo, medidas de segurança contra o incêndio (MORAES, 2006).

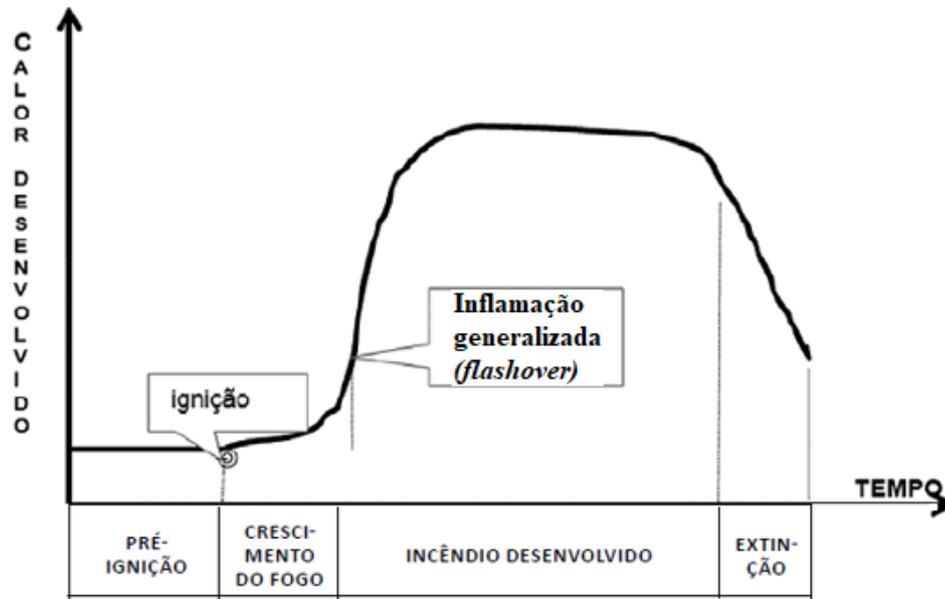
2.2.1 Conceitos iniciais

2.2.1.1 Incêndio real

O incêndio real, conforme Costa e Silva (2006), apresenta três estágios básicos: ignição, fase de aquecimento e fase de resfriamento. Conforme Seito et al. (2008) não existem dois incêndios iguais, pois vários fatores concorrem para o seu início e desenvolvimento. O crescimento dependerá do primeiro material ignizado, das características do comportamento ao fogo dos

materiais na proximidade do material ignizado e a sua distribuição no ambiente. A evolução do incêndio na edificação com base em material celulósico apresenta-se no esquema da Fig. 2.7.

Figura 2.7 - Fases e evolução do incêndio na edificação com base em material celulósico.



Fonte: Seito et al. (2008).

Seito et al. (2008) esclarecem as fases de um incêndio da seguinte maneira: a primeira fase corresponde ao início de incêndio que apresenta um crescimento lento, em geral de duração entre 5 a 20 minutos até a ignição, quando se inicia a segunda fase caracterizada pelas chamas que começam a crescer aquecendo o ambiente. Quando não ocorre o combate ao incêndio e a extinção do fogo, a temperatura no ambiente pode chegar a 600 °C; todo o ambiente é tomado por gases e por vapores combustíveis desenvolvidos na pirólise dos combustíveis sólidos contribuindo com seus vapores para que ocorra a inflamação generalizada (*flashover*); a partir desse momento todo o ambiente será envolvido por grandes labaredas. A terceira fase é caracterizada pela diminuição gradual da temperatura e das chamas no ambiente, com a finalização do material combustível.

A NBR 14432 (2001) estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. Tais critérios baseiam-se na resistência ao fogo dos elementos construtivos, considerando as condições de exposição ao incêndio-padrão.

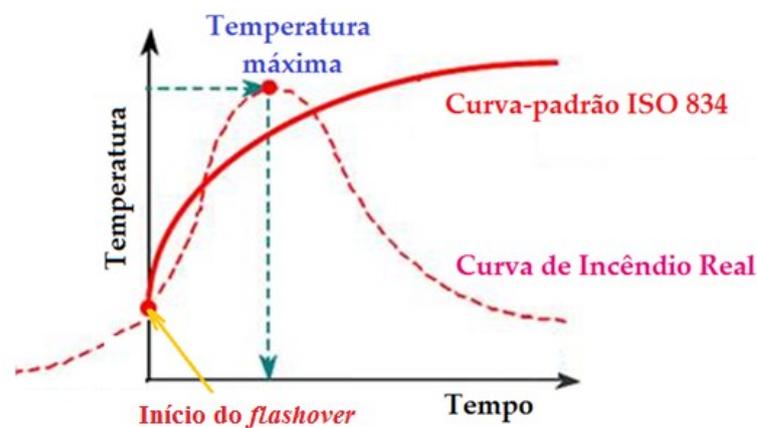
2.2.1.2 Incêndio padrão

Segundo Seito et al. (2008), a curva temperatura-tempo do incêndio real se altera para cada situação estudada e, sendo assim, convencionou-se adotar uma curva padronizada como modelo para a análise experimental de estruturas. A curva padronizada para ensaios geralmente é adotada como curva temperatura-tempo dos gases, conhecido como modelo do incêndio-padrão. A curva mais difundida internacionalmente é a recomendada pela *International Organization for Standardization* ISO 834 (1999) e está representada na Eq. (2.20):

$$T = T_0 + 345 \log_{10} (8t + 1), \quad (2.20)$$

sendo: t , o tempo expresso em minutos; T_0 , a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20 °C; e T , a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t . A curva de incêndio-padrão está conforme a Fig. 2.8.

Figura 2.8- Curva temperatura-tempo para o incêndio-padrão.



Fonte: Costa e Silva (2006).

As normas NBR 14432 (2001), NBR 5628 (2001), EN 1991-1-2 (2004), EN 1995-1-2 (2004) e AS 1530 (2005) recomendam a aplicação da curva-padrão da norma ISO 834 (1999), na determinação da resistência ao fogo de elementos construtivos. Segundo Costa e Silva (2006), as curvas das normas do Canadá, ULC S101 (2014) e do Japão, JIS A 1304 (2011) baseiam-se nos dados de temperatura \times tempo disponibilizados pela *American Society for Testing & Materials*, ASTM E119.

2.2.1.3 Regimes de aquecimento

Nos ensaios para caracterização do material construtivo é importante selecionar o regime de aquecimento do material. Na prática, tem-se dois regimes: o transiente e o constante. Segundo Costa (2008), os ensaios em regime de aquecimento transiente (*transient state tests*) são caracterizados pela variação de temperatura, normalmente, ascendente. Como exemplo, têm-se a exposição ao fogo-padrão segundo a curva proposta pela ISO 834 ou segundo procedimentos da ASTM E 119. Por outro lado, os ensaios em regime de aquecimento constante (*steady state tests*) são caracterizados por um período de aquecimento até o nível de temperatura de interesse, a partir do qual se inicia o período de estabilização térmica; após a uniformização da temperatura no corpo de prova, aplica-se, por exemplo, uma carga de ensaio suficiente para fornecer as relações tensão-deformação do material para qualquer situação de tensões ou outra solitação de interesse.

2.2.1.4 Reação ao fogo

A reação ao fogo refere-se à todas as transformações físicas e/ou químicas sofridas por um material exposto a um fogo incontrolado (SEITO et al., 2008). Nessa situação, a reação ao fogo, dos materiais utilizados no revestimento/acabamento de paredes e tetos e daqueles materiais incorporados aos sistemas construtivos, deve ser considerada. Os materiais são avaliados quanto ao potencial que possuem para contribuir para o desenvolvimento do fogo, quando submetidos a uma situação definida de combustão. As regulamentações de reação ao fogo dos materiais, tratam da verificação do crescimento do fogo e da sua propagação para os ambientes do próprio edifício e também para os edifícios adjacentes.

Os materiais de revestimento, de acabamento e de isolamento termoacústico empregados na face interna dos sistemas ou dos elementos que compõem a edificação devem ter as características de propagação de chamas controladas, em atendimento aos requisitos estabelecidos nas ABNT NBR 15575-3 (2013): Sistemas de piso, ABNT NBR 15575-4 (2013): Sistemas de vedações verticais internas e externas e ABNT NBR 15575-5 (2013): Sistemas de cobertura. São estabelecidos três ensaios básicos, dentre outros: Ensaio de incombustibilidade (ISO 1182), Ensaio de propagação superficial de chama (ABNT NBR 9442) e Ensaio para a determinação da densidade ótica de fumaça (ASTM E662).

2.2.1.5 Resistência ao fogo

Resistência ao fogo, segundo a definição apresentada pela NBR 14432 (2001), corresponde à propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo a sua segurança estrutural, a estanqueidade e o isolamento. A segurança estrutural é verificada em elementos estruturais como vigas, colunas e lajes e a estanqueidade e o isolamento são verificados em superfícies como lajes e fechamentos de paredes. No Brasil, os ensaios para a determinação da resistência ao fogo são definidos pela NBR 14432 (2001) e os procedimentos de ensaios são definidos de acordo com a norma NBR 5628 (1980). Segundo a ABNT NBR 15575-1 (2013): Edificações habitacionais - Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais, a análise do projeto estrutural em situação de incêndio deve atender às normas específicas de cada tipo de estrutura: a) ABNT NBR 14323 (2013): Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio; b) ABNT NBR 15200 (2012): Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio; c) Eurocode correspondente, em sua última edição, para as demais estruturas; d) ABNT NBR 10636 (1989): Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio.

2.2.2 Estruturas de madeira em situação de incêndio

Neste sub item serão apresentados os critérios normativos básicos para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira sem proteção presentes na EN 1995-1-2 (2004), representante de uma norma probabilista de estados limites (em 2.2.2.1) e os critérios presentes na norma americana AWC-ANSI/NDS(2018a), representante de uma norma determinista de tensões admissíveis (em 2.2.2.2).

2.2.2.1 Resistência de cálculo da madeira segundo a EN 1995-1-2 (2004)

Para a determinação da resistência mecânica dos elementos estruturais em madeira encontram-se previstos na EN 1995-1-2 (2004) (EUROCODE 5) a possibilidade de se adotar regras prescritivas ou se adotar um código com base no desempenho (Ver Anexo 1). Serão revisadas aqui apenas as regras prescritivas.

As regras prescritivas baseiam-se em ações térmicas fornecidas a partir de ensaios realizados com base em curvas de incêndio padrão. Com estas regras é possível analisar um elemento

estrutural, uma parte da estrutura ou todo uma estrutura. Para analisar um elemento estrutural, pode-se adotar modelos simplificados de cálculo ou modelos avançados de cálculo. Os modelos avançados empregam métodos numéricos (formulações de elementos finitos) para proceder às análises conforme dois modelos: o modelo de resposta térmica e o modelo de resposta estrutural. Os métodos simplificados (Ver Anexo 2) para determinar-se as propriedades mecânicas reduzidas de elementos estruturais expostos ao fogo padrão são dois, sendo: o método da seção transversal reduzida e o método das propriedades mecânicas reduzidas. Os métodos mencionados serão esclarecidos nos próximos itens.

2.2.2.1.1 Métodos avançados

Como mencionado, o EN 1995-1-2 (2004) propõe dois modelos: o modelo de resposta térmica e o modelo de resposta estrutural. O modelo de resposta térmica visa a determinação da profundidade de carbonização, o desenvolvimento e a distribuição da temperatura dentro de um elemento estrutural, levando em conta as variações nas propriedades térmicas dos materiais com a variação da temperatura.

O modelo de resposta estrutural visa a avaliação do comportamento da estrutura ou de cada parte da estrutura, levando em conta os efeitos não lineares nas propriedades dos materiais. Para a aplicação de métodos avançados, conforme König (2005), é necessário o acesso às propriedades térmicas efetivas da madeira (condutividade, calor específico e fator de redução da densidade) sob a exposição ao fogo padrão, considerando, também, a influência das fissuras no carvão e a recessão da superfície do mesmo; e para a análise estrutural, além das propriedades termomecânicas, de resistência (tensão, compressão, cisalhamento) e de rigidez (módulo de elasticidade para tensão e compressão), também são incluídos os efeitos transitórios da umidade combinada à temperatura elevada em torno de 100 °C, incluindo o efeito do acúmulo de umidade na seção transversal residual e a fluência por absorção mecanizada quando a água é vaporizada.

Na literatura foram revisados os trabalhos: Moraes (2003), que desenvolve uma profunda análise sobre o fenômeno da combustão e o modelamento numérico da carbonização da madeira de *Pinus sylvestris*. Por outra vertente, Pinto e Calil Júnior (2008), estudando a madeira da espécie *Goupia glaba*, adotaram o modelo térmico. Molina *et al* (2012) investigando a espécie *Eucalyptus citriodora* adotou o modelo térmico para investigar a profundidade de carbonização;

observou que os valores determinados numericamente ficaram abaixo dos valores determinados experimentalmente; esclarece que esta diferença é, provavelmente, atribuída à falta de dados de condutividade para a espécie estudada visto que foram adotados no modelo numérico valores experimentais disponíveis na literatura para madeiras coníferas. Martins (2016), estudando amostras das espécies *Eucalyptus sp* e *Pinus Oocarpa*, adotou o modelo térmico visando estudar a redução da seção transversal e a distribuição da temperatura no interior dos elementos e, também, verificou uma análise mecânica, utilizando como dados de entrada a distribuição de temperatura obtida no modelo térmico previamente desenvolvido.

2.2.2.1.2 Método da seção transversal reduzida

Para ilustrar o efeito das propriedades isolantes de uma camada carbonizada, apresenta-se as imagens de estrutura executada em MLC após incêndio na Fig. 2.9.

Figura 2.9 - Estrutura aporticada/MLC/Morrison Printing Inks Machinery Ltd pós incêndio.

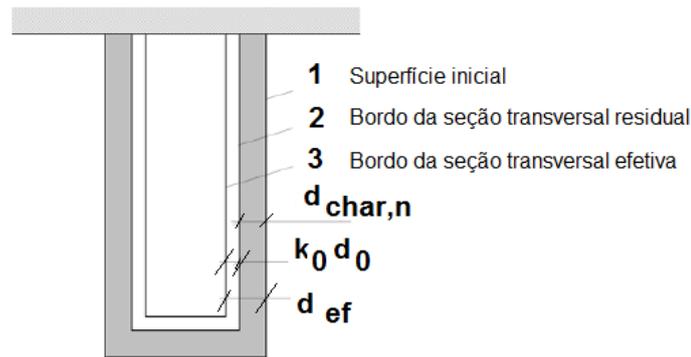


Fonte: <https://productspec.net/project/4e2cd3984ff399d114580af0/fire-resistance-of-glulam>.

Na superfície dos elementos estruturais, apresentados na Fig. 2.9, formou-se uma camada de carvão suficiente para isolar a seção transversal reduzida residual que manteve-se resistente. Tal fato evidencia a importância de dimensionamento da estrutura adequado à situação de incêndio.

Para a determinação de uma seção transversal efetiva, a EN 1995-1-2 (2004) prescreve reduzir da seção original, uma profundidade efetiva de carbonização, d_{ef} calculada conforme a Eq. (2.21) e a Fig. 2.10:

Figura 2.10 – Definição de seção transversal residual e seção transversal efetiva.



Fonte: EN 1995-1-2 (2004).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0, \quad (2.21)$$

com,

$$d_{char,n} = \beta_n t$$

$d_{char,n}$ = profundidade de carbonização notacional com efeito de arredondamento de cantos;

β_n taxa de carbonização notacional, inclui os efeitos de arredondamento dos cantos e fissuras;

t , tempo, em min; $k_0 = 1$, para $t \geq 20$ min e $d_0 = 7$ mm.

A EN 1995-1-2 (2004) prescreve valores de taxa de carbonização uni-dimensional (β_0) e notacional β_n para espécies coníferas e folhosas de diferentes densidades. Corrigindo os valores característicos para valores médios referentes ao valor de 5% da população com um coeficiente de variação de 10%, ($d_{12,k} = d_{12,m} - 1,645 (0,1 d_{12,m}) = 0,84 d_{12,m}$), apresenta-se os valores da Tab. (2.7).

Tabela 2.7 – Taxas de carbonização da madeira segundo EN 1995-1-2 (2004).

Valores de densidades médias reportados a $U = 12\%$	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
Coníferas com d_m igual ou superior a 345 kg/m^3	0,65	0,80
Folhosas com d_m igual a 345 kg/m^3	0,65	0,70
Folhosas com d_m igual ou superior a 529 kg/m^3	0,50	0,55

Aplicando-se a Eq. (2.22), para tempos de resistência requerida ao fogo, t , de 60, 90 e 120 min, para madeira serrada e MLC de folhosas com densidade média igual ou superior a 529 kg/m^3 , para $d_0 = 7$ mm, determinou-se os valores de profundidades efetivas de carbonização, conforme a Tab. (2.8).

Tabela 2.8 – Profundidade efetiva de carbonização para seção transversal de folhosas
(para $d_m \geq 529 \text{ kg/m}^3$)

Resistência requerida ao fogo t (min)	Taxa de carbonização notacional β_n (mm/min)	Profundidade notacional de carbonização $d_{char,n} = \beta_n t$ (mm)	Profundidade efetiva de carbonização $d_{ef} = d_{char,n} + d_0$ (mm)
60	0,55	33	40
90	0,55	50	57
120	0,55	66	73

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tab. (2.8) que as profundidades efetivas de carbonização além de crescerem em com o aumento do tempo requerido se elevam, também, pois se adota a profundidade notacional que considera o arredondamento dos cantos e possíveis fissuras no carvão que formou-se em torno do elemento estrutural.

2.2.2.1.3 Método das propriedades mecânicas reduzidas

A norma EN 1995-1-2 (2004) considera, na prescrição do *Método de propriedades reduzidas*, a influência da temperatura na redução dos valores das propriedades mecânicas da madeira para seções transversais retangulares de elementos fabricados com espécies madeireiras coníferas expostas ao fogo, ao longo de todo o seu perímetro. A seção transversal retangular para aplicação desse método, deverá ser calculada conforme descrito no item 2.2.2.1.2.

2.2.2.1.4 Verificação da resistência mecânica segundo a EN 1995-1-2 (2004)

Após a determinação das propriedades da seção transversal, para a verificação da resistência mecânica, os valores de projeto de resistência e propriedades de rigidez devem ser determinados pelas equações (2.22) e (2.23):

$$f_{d,fi} = k_{\text{mod},fi} \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.22)$$

$$E_{d,fi} = K_{\text{mod},fi} \frac{E_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.23)$$

sendo:

$f_{d,fi}$ = resistência de projeto em situação de incêndio;

$E_{d,fi}$ = rigidez de projeto (módulo de elasticidade ou módulo de cisalhamento) em situação de incêndio;

$f_{0,2}$ = quantil de 20% da propriedade de resistência em temperatura normal;

$E_{0,2}$ = quantil de 20% da propriedade de rigidez em temperatura normal;

$k_{mod,fi}$ = fator de modificação em situação de incêndio;

$\gamma_{M,fi}$ = fator parcial de segurança para madeira em situação de incêndio.

2.2.2.1.5 Fator de modificação em situação de incêndio

O fator de modificação em situação de incêndio deve considerar a redução das propriedades de resistência e de rigidez em temperaturas elevadas, variando com o método utilizado, sendo:

a) para o método da seção transversal reduzida, adota-se a Eq. (2.24):

$$k_{mod,fi} = 1,0 \quad (2.24)$$

b) para o método das propriedades mecânicas reduzidas, para tempo $t \geq 20$ min, são prescritos coeficientes de modificação das propriedades de resistência e de rigidez para situação de incêndio ($k_{mod,fi}$), calculados segundo as solicitações no elemento estrutural. Para as solicitações de tração e para o módulo de elasticidade paralelos às fibras, adota-se a Eq. (2.25):

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r} \quad (2.25)$$

Para a solicitação de flexão adota-se a Eq. (2.26):

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r} \quad (2.26)$$

Para a solicitação de compressão paralela às fibras adota-se a Eq.(2.27):

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r} \quad (2.27)$$

Nas equações (2.25) à (2.27), tem-se a razão $\frac{p}{A_r}$ denominada fator de massividade (*section factor*)¹². Nesta razão, p corresponde ao perímetro exposto da seção transversal residual e A_r corresponde à área da seção transversal residual. Para a resistência ao cisalhamento não foi prevista nenhuma equação. No instante inicial, para $t = 0$, considera-se que $k_{mod,fi} = 1,0$.

Conceitualmente, como esclarecido em Guimarães (2007), o fator de massividade se aplica a perfis com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, como ocorre nos perfis de aço. No caso das seções estruturais de madeira, a distribuição de temperatura não é uniforme, pois um gradiente de temperatura ocorre na seção transversal. Por este motivo, em diferentes trabalhos revisados na literatura, existe um posicionamento de forma contrária à prescrição da norma EN 1995-1-2 (2004) de adotar coeficientes de modificação para situação de incêndio em função do fator de massividade. Segundo König (2005), o método de propriedades reduzidas proposto na EN 1995-1-2 (2004) apresenta alguns inconvenientes, tais como: o fator de massividade não seria um parâmetro aperfeiçoado para se determinar a redução das propriedades de resistência e da rigidez da seção transversal em elementos de madeira; o método não considera o gradiente de temperatura na seção transversal, nem o isolamento térmico promovido pela camada de carvão; nenhuma redução é conferida para a resistência ao cisalhamento; o fator de seção depende das taxas de carbonização utilizadas; embora o método pareça mais complexo, não oferece melhor precisão do que o método de seção transversal reduzida. Wiesner e Bisby (2018) afirmam que o método das propriedades reduzidas deve ser removido das edições futuras do EN 1995-1-2 não sendo permitida a sua adoção em algumas jurisdições.

2.2.2.2 Resistência de cálculo da madeira segundo a AWC-ANSI/NDS (2018a)

A normativa AWC-ANSI/NDS(2018a), ampliada em AWC-ANSI/NDS(2018b), adota nos projetos para uma situação de incêndio, valores admissíveis de resistência os quais são afetados por fatores de ajuste e coeficientes de modificação. Um elemento estrutural pode ser afetado por vários coeficientes de modificação. Para a situação de incêndio, estabelece as disposições

¹² O termo “*section factor*” é reconhecido no Brasil e Portugal como “fator de massividade”, sendo igualmente adotado nos códigos para dimensionamento de estruturas de aço e mistas aço-concreto em situação de incêndio.

gerais que se aplicam a todos os elementos e conexões estruturais de madeira, na forma serrada, de forma geral. Estabelece que cada elemento ou conexão de madeira deve apresentar uma seção transversal suficiente e que as tensões induzidas não devam exceder a resistência que foi ajustada para a exposição ao fogo, para tempo de exposição limitado a 120 min. Considera-se que a falha de um elemento estrutural ocorre quando a carga atuante no elemento excede a capacidade resistiva do mesmo, que foi reduzida devido à exposição ao fogo.

Reduções de resistência e de rigidez da madeira diretamente adjacente à camada de carvão e o arredondamento nas bordas expostas são abordados usando-se uma profundidade efetiva do carvão que é considerado ser 20% maior do que a profundidade real do carvão. Adota-se uma taxa de carbonização não-linear estimada a partir de uma taxa de carbonização linear nominal de 1 h utilizando a Eq. (2.28),

$$\beta_t \cong \beta_n, \quad (2.28)$$

onde,

β_t = taxa de carbonização não-linear, por período de tempo, t, inches/hr^{0,813};

β_n = taxa de carbonização linear nominal de referência, por período de 1 hora, inches/hr.

A profundidade de carbonização, a_{char} é expressa em termos de β_t , conforme a Eq. (2.29),

$$a_{char} = \beta_t t^{0,813}, \quad (2.29)$$

onde,

t = tempo de exposição, h; a_{char} = profundidade de carbonização, inches.

Considera-se, portanto, para o cálculo estrutural, a profundidade de carbonização efetiva, a_{eff} , ser 20% maior do que a_{char} para considerar a redução na resistência e na rigidez da zona aquecida e o arredondamento dos cantos, conforme a Eq. (2.30).

$$a_{eff} = 1,2 a_{char} \quad (2.30)$$

Para madeira serrada, MLC, LVL e CLT assume-se uma taxa de carbonização nominal $\beta_n = 0,635$ mm/min (1,5 in/h), uma profundidade de carbonização a_{char} e uma profundidade de carbonização efetiva, a_{eff} , convertidos (em mm) conforme apresentado na Tab. (2.9).

Tabela 2.9 – Profundidade de carbonização e profundidade efetiva de carbonização segundo AWC-ANSI/NDS – 2018(a) (b).

Resistência requerida ao fogo (min)	Profundidade de carbonização a_{char} (mm), para $\beta_n = 0,635$ mm/min.	Profundidade efetiva de carbonização a_{eff} (mm)
60	38	46
90	53	64
120	66	81

Para o projeto de incêndio, segundo estas duas normativas, a capacidade última média estimada de um elemento é baseada na redução da seção transversal e das propriedades mecânicas como resultado da exposição ao fogo. As resistências últimas médias devem ser determinadas a partir de valores de referência (tensões admissíveis de projeto -ASD).

A capacidade última média de um elemento de madeira (na forma serrada) exposto ao fogo por um determinado tempo, t , é estimada usando as propriedades da seção transversal reduzidas e as resistências últimas médias aproximadamente determinadas pela multiplicação dos valores de referência ASD pelos fatores de ajuste na resistência (K). As resistências últimas médias não devem ser ajustadas para C_D (fator de duração da carga), C_M (fator de serviço madeira úmida), nem C_t (fator de temperatura), pois esses ajustes já são abordados nos fatores de ajuste na resistência (K), específicos para ajuste nas resistências, e na metodologia de projeto.

A Tab. (2.10) apresenta os fatores de ajuste para o projeto de incêndio segundo a AWC-ANSI/NDS – 2018(a) (b) para madeira na forma serrada¹³.

¹³ Para madeiras na forma de madeira engenheirada, madeira roliça, painel estrutural são propostos outros fatores de ajuste para o projeto de incêndio, que não serão apresentados neste trabalho.

Tabela 2.10 - Fatores de ajuste para o projeto de incêndio para madeira na forma serrada.

Propriedade de Resistência mecânica	ASD					
	Fator de ajuste na resistência K	Fator de tamanho ¹ C _F	Fator de volume ¹ C _V	Fator de utilização horizontal ¹ C _{FU}	Fator de estabilidade de viga ² C _L	Fator de estabilidade de coluna ² C _p
Flexão (F _b)	2,85	C _F	C _V	C _{FU}	C _L	-
Tração (F _t)	2,85	C _F	-	-	-	-
Compressão axial (F _c)	2,58	C _F	-	-	-	C _p
Flambagem em viga (F _{BE})	2,03	-	-	-	-	-
Flambagem em coluna (F _{CE})	2,03	-	-	-	-	-

¹ Com base nas dimensões da seção transversal inicial; ² Com base nas dimensões da seção transversal reduzida.

Fonte: AWC-ANSI/NDS – 2018(a) (b).

Portanto, verifica-se que os valores de taxa de carbonização da madeira são prescritos nas normas técnicas com vistas ao cálculo das profundidades efetivas de carbonização. Para o seu cálculo, adota-se a taxa de carbonização efetiva (B_{ef}) que por sua vez considera o arredondamento de quinas do elemento estrutural devido à ocorrência da taxa de carbonização bidimensional (B_n).

Apresenta-se na Tab. (2.11) os dados e modelos para predição de taxa de carbonização prescritos nas normas técnicas, a saber: EN 1995-1-2 (2004), AS 7120-4 (2006) e AWC-NDS(2018a), sendo: B_0 : taxa de carbonização unidimensional; B_n : taxa de carbonização bidimensional; B_{ef} : taxa de carbonização efetiva; P_0 : profundidade de carbonização unidimensional; P_n : profundidade de carbonização bidimensional; P_{ef} : profundidade de carbonização efetiva. Verifica-se que a norma EN 1995-1-2 (2004) prescreve um acréscimo de cerca de 10% (fator = 1,1) obtido a partir da relação entre as taxas B_n/B_0 para a consideração da carbonização nos cantos arredondados, enquanto a norma AWC-NDS(2018a) prescreve um acréscimo de 20% (fator = 1,2).

Tabela 2.11 – Modelos para predição de taxas de carbonização e profundidades de carbonização.

Referências	Espécies	B_0, B_n, B_{ef} (mm/min)	P_0, P_n, P_{ef} (mm)
EN 1995-1-2 (2004)	Madeira serrada e MLC de folhosas e coníferas com densidade aparente média $\geq 345 \text{ kg/m}^3$	$B_0 = 0,65 \text{ mm/min}$	$P_0 = B_0 \cdot t$
	Folhosas para madeira sem proteção, serrada e MLC, com densidade aparente média $\geq 529 \text{ kg/m}^3$.	$B_0 = 0,50 \text{ mm/min}$	$P_0 = B_0 \cdot t$
		$B_n = 0,55 \text{ mm/min}$ Relação: $B_n/B_0=1,1$	$P_n = B_n \cdot t$, com t em min. EN 1995-1-2 (P_{ef}) = $P_n + k_0 \cdot d$ $k_0 = 1$ ($t \geq 20 \text{ min}$) e $d = 7 \text{ mm}$.
AS 7120-4 (2006)	Folhosas/coníferas	$\beta_n = 0,4 + \left(\frac{280}{d_{12}}\right)^2$, onde B_n em mm/min e d_{12} , densidade aparente a 12% em kg/m^3 .	$P_n = B_n \cdot t$ (que considera o arredondamento das quinças do elemento estrutural). AS_ $P_{ef} = P_n + d$ para $d = 7,5 \text{ mm}$.
AWC-NDS (2018a)	Folhosas/coníferas	$B_0 = 0,53 \text{ mm/min}$	$P_0 = B_0 \cdot t$
		$B_n = 0,635 \text{ mm/min}$, Relação: $B_n/B_0=1,2$	$P_n = B_n \cdot t$, com t em min.
		$B_{ef} = \frac{1,2 B_n}{t^{0,187}}$ onde, β_{ef} = taxa de carbonização efetiva (in/h), ajustada para exposição ao tempo t; β_n = taxa de carbonização linear (in/h), baseada em exposição de 1 hora; t = tempo de exposição, (h).	$P_{ef} = B_{ef} \cdot t$

Fonte: Autoria própria.

2.3 Resistência mecânica da madeira submetida a temperaturas elevadas

Apresenta-se uma revisão acerca da redução nas propriedades mecânicas da madeira em temperaturas elevadas, desde o embasamento da teoria e o modelo de falha em função do tempo, apresentando-se propostas de modelos de redução da resistência mecânica. Também será

abordada a resistência mecânica após esfriamento do material e discutidos os fatores de modificação das propriedades mecânicas da madeira.

Para avaliar a resistência de um componente estrutural da madeira exposto ao fogo, dois efeitos importantes devem ser considerados: uma redução no tamanho eficaz devido à carbonização e uma redução na resistência e estabilidade devido à temperatura elevada (EN 1995-1-2 (2004), AWC-ANSI/NDS (2018a)). Esse tamanho eficaz, considerado um tamanho crítico, segundo Lie (1977), encontra-se diretamente dependente da taxa de carbonização, da carga aplicada, da resistência residual e da estabilidade da seção transversal não queimada. A redução da resistência pode ser avaliada em termos da extensão dos danos do fogo, a saber: a madeira carbonizada tem resistência efetiva nula; a madeira próxima da 'frente carbonizada' tem a sua resistência reduzida e a madeira mais afastada da frente carbonizada, pode ou não sofrer perda de resistência (VAN ZEELAND et al., 2005).

2.3.1 Formulações teóricas e empíricas

Para esclarecer os processos físico-químico-térmicos que ocorrem no elemento estrutural de madeira, exposto a altas temperaturas, diversos trabalhos foram desenvolvidos como vimos na seção anterior. Outros trabalhos desenvolvidos em Schaffer (1967), Lie (1977), Schaffer (1984), Bender et al. (1985) e Schaffer et al. (1986) resultaram em formulações teóricas e empíricas, fundamentadas em modelos de falha em função do tempo e modelos de redução de resistência mecânica. Revisões mais recentes são apresentadas em Schmid et al.(2014) e Schmid et al.(2014a) as quais analisam de forma crítica as metodologias adotadas nas normativas técnicas em vigor.

2.3.1.1 Modelo de falha em função do tempo de carbonização

Para prever a resistência ao fogo (ou o tempo de falha) de elementos estruturais de madeira expostos à elevadas temperaturas foram propostos dois métodos analíticos: **Método da seção crítica** desenvolvido em Lie (1977) e o **Método da seção transversal efetiva** desenvolvido em Bender et al. (1985). Juntos, constituem o embasamento teórico do cálculo da resistência mecânica de elementos estruturais em madeira em situação de incêndio propostos nas normas

NDS (2018a) e EN-1995-1-2, apresentadas no sub item 2.2.2 (não serão aprofundadas outras normas neste estudo).

Lie (1977) apresenta um método considerado semi-empírico para determinação da seção crítica de elemento estrutural (vigas e colunas) em função do tempo de falha, no qual para o cálculo do tempo de resistência às solicitações foram utilizados: dados experimentais de taxa de carbonização, a distribuição de temperatura na parte não carbonizada de elementos estruturais submetidos ao fogo e as respectivas propriedades de resistência e deformação do material em função da temperatura. A partir da consideração de taxa de carbonização para madeiras de baixa densidade de 0,80 mm/min e para madeiras de alta densidade, de 0,40 mm/min, adotou-se um valor médio de 0,60 mm/min e um fator de redução de 0,80 da resistência mecânica e do módulo de elasticidade determinado na flexão, na parte não carbonizada.

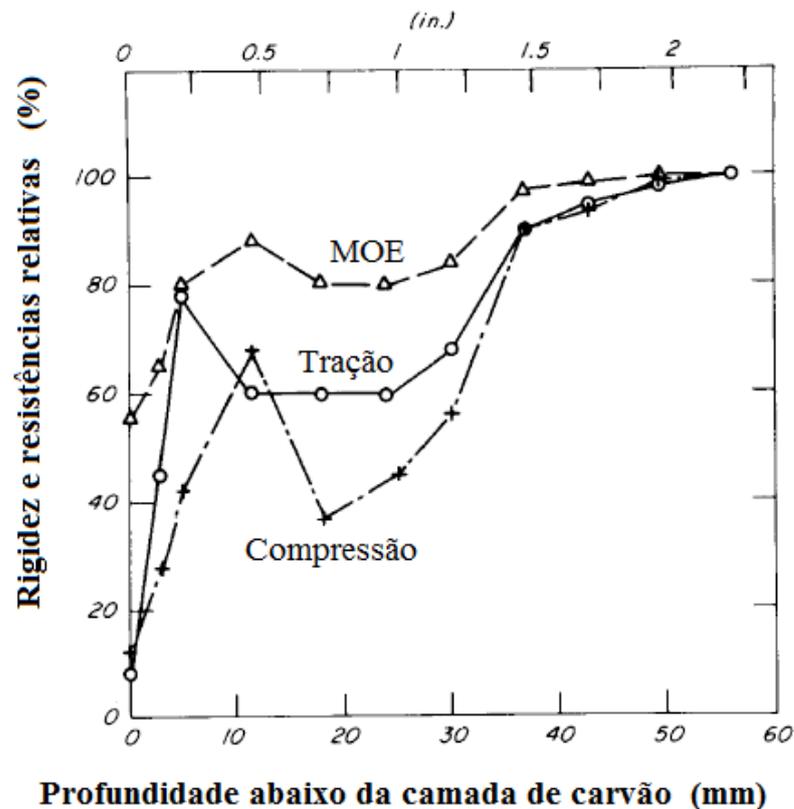
Posteriormente, a parte teórica foi ajustada com base em novos ensaios com elementos de vigas, colunas, lajes e *wood frames* realizados nos EUA e outros países embasado em resultados apresentados por: (Schaffer, 1967), (Schaffer, 1984), Bender et al. (1985) e Schaffer et al. (1986). A base experimental desse método consistiu na investigação da resistência ao fogo de uma amostra de vinte e uma vigas de madeira laminada colada de diferentes fabricantes, considerando o tempo de falha de resistência à tração sob exposição ao fogo padrão. A metodologia denominada “Seção transversal efetiva”, apresentada em Bender et al. (1985) e Schaffer et al. (1986), propõe uma equação para a predição da espessura da camada de carvão (R) denominada “camada de resistência zero” representada pela Eq. (2.31).

$$R = \beta \cdot t + d \quad (2.31)$$

Na Eq. (2.1), β = taxa de carbonização; t = tempo de exposição ao fogo; d = espessura finita de madeira residual enfraquecida pela elevação de temperatura e umidade. O termo d entra na equação como uma compensação pela perda de resistência na camada de madeira aquecida, mas não carbonizada. A taxa de carbonização adotada no modelo considera o arredondamento da seção transversal e vale $\beta = 0,625 \text{ mm/min}$, correspondendo à média adotada para a espécie conífera *Douglas-fir* (de clima temperado) sob ação da curva de incêndio padronizado segundo a ASTM E-119. Para a aplicação do modelo considera-se que a taxa de carbonização (β) e espessura residual (d) sejam constantes.

Segundo Bender et al. (1985) e Schaffer et al. (1986) tais pressupostos apresentam considerável suporte experimental¹⁴. A avaliação da redução da rigidez (módulo de elasticidade) e das resistências à tração e à compressão nas vigas fabricadas com a espécie conífera *Douglas-fir*, investigadas sob a influência das mudanças de temperatura sob exposição ao fogo para exposição maior do que 20 min e do teor de umidade, encontra-se graficamente na Fig. 2.11.

Figura 2.11 – Caracterização mecânica em seção transversal de espécie *Douglas-fir*.



Fonte: Adaptado de Schaffer et al. (1986).

Conforme Schaffer (1984) e Schaffer et al. (1986), o gráfico da Fig 2.11 apresenta o esquema de carbonização do elemento estrutural, sendo que à profundidade zero localiza-se a face do elemento estrutural, onde ocorre a incidência do fogo, e à profundidade de 38 mm (1,5 pol) localiza-se a interface carvão-madeira para um tempo, t , de 1 h (60 min). Devido ao aparecimento de fissuras no carvão, o modelo admite que o carvão não tenha capacidade

¹⁴ Schaffer, E. L. An approach to the mathematical production of temperature rise within a semi-infinite wood slab subjected to high-temperature conditions. *Pyrodynamics*, vol.2, pp. 117-132, 1965.

portante. A madeira abaixo da camada de carvão encontra-se aquecida e seca, enquanto a temperatura e a umidade permeiam-se pelas fissuras abertas distribuindo-se na interface madeira/carvão afetando a resistência e a rigidez da madeira aquecida. Foi verificada uma resistência à tração média efetiva correspondendo a 79,3% da resistência em temperatura ambiente (para $T = 25^{\circ}\text{C}$ e teor de umidade de 12%). Com base nessa informação, foi estimada uma camada de 7,6 mm de espessura (*0,3 pol*) correspondendo a 20,7% da espessura de 40 mm (*1,5 pol*) atribuindo-se à esta camada aquecida, abaixo da camada de carvão, todas as perdas de resistência à tração no interior da viga carbonizada.

O método apresentado em Lie (1977) ignorava o aumento da taxa de carbonização nos cantos dos elementos de viga que eram considerados de seção retangular. Posteriormente, White (1988a) introduz a carbonização em duas dimensões aprimorando o modelo desenvolvido em Lie (1977). Segundo White (1988b) a maioria dos modelos teóricos para carbonização da madeira não apenas define a taxa de carbonização, mas, também, fornece resultados para o gradiente de temperatura. Esse gradiente de temperatura é importante para a avaliação da capacidade de carga da madeira que permanece aquecida abaixo da camada de carvão.

Segundo König (2004), um perfil de temperatura estável é desenvolvido após 20 minutos quando a profundidade d da zona abaixo da camada de carvão, que é afetada pelo aumento da temperatura, é de cerca de 40 mm e não aumenta significativamente após esse período. Conforme Schmid et al. (2014), a zona aquecida dentro de um elemento de madeira atinge um gradiente de temperatura relativamente constante após uma fase inicial de cerca de 20 min de exposição ao fogo padrão devido ao efeito de isolamento favorável da camada de carvão que se desenvolve na superfície. A zona afetada pela temperatura, além da linha carbonizada, é de cerca de 40 mm de profundidade para elementos de madeira inicialmente desprotegidos.

2.3.1.2 Modelo de redução de resistência mecânica sob temperaturas elevadas

O “Método da seção transversal efetiva” desenvolvido em Bender et al. (1985) considera parte da camada aquecida (mas não carbonizada) como uma camada efetiva de resistência zero e o restante da camada remanescente como apresentando 100% da resistência inicial, sendo portanto uma forma simples de modelo de redução de resistência para elementos em madeira laminada colada. Este modelo tornou-se a base do método de projeto com base na resistência

mecânica que foi desenvolvido para permitir o cálculo da resistência ao fogo de elementos de madeira para outras condições de carregamento e exposição não consideradas em (Lie, 1977). Os modelos empíricos de porcentagem de redução de resistência mecânica em função da variação de temperatura apresentam-se como na Eq. (2.32).

$$P = q - r T, \quad (2.32)$$

onde, P é a porcentagem de resistência remanescente; q e r são coeficientes determinados empiricamente e T , a temperatura da madeira em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Kollmann (1940), investigou a redução de resistência à compressão acima de 160°C na madeira de espécies folhosas como *Fagus grandifolia* (beech) de 635 kg/m^3 e *Ochroma pyramidale* (balsa) de 133 kg/m^3 , à 12% de teor de umidade; a espécie beech foi selecionada por apresentar poros espalhados, nos quais a água livre pode se distribuir de maneira muito mais uniforme do que na madeira com poros anelares como observado na espécie balsa. Para a espécie *Fagus grandifolia* apresenta o modelo $P = 105 - 0,25T$ para intervalo de temperatura $20 \leq T \leq 220$. Foi investigada à compressão paralela às fibras a espécie *beech* pré-condicionada à condição seca ao ar e à condição seca em estufa. O estudo evidencia que a madeira seca em estufa apresenta maior resistência à compressão em relação à madeira seca ao ar e permite deduzir que a secagem em estufa promove um melhor comportamento mecânico das madeiras quando submetidas a temperaturas elevadas, confirmando a importância da secagem controlada.

Van Zeeland (2000) e Van Zeeland et al. (2005) desenvolveram um modelo para prever a resistência residual à compressão paralela às fibras em corpos de prova com dimensões de $4,88 \text{ m} \times 38 \text{ mm} \times 89 \text{ mm}$ submetido a cargas axiais em temperaturas elevadas de 25°C a 250°C de pinus (*Pinus contorta*), enquanto se preparou para evitar flambagem. Propuseram os modelos: $P = 115 - 0,75T$, para intervalo desde temperatura ambiente até 100°C e $P = 60 - 0,20T$ para intervalo desde temperatura 100°C à 300°C . Concluiu que com esse modelo e o conhecimento das propriedades dos materiais, seja possível prever o tempo de falha por esmagamento de elementos axialmente carregados expostos a temperaturas elevadas.

A literatura técnica nacional apresenta um número mais restrito de resultados acerca da redução da resistência mecânica de elementos estruturais de madeira devido a submissão ao fogo, de

forma geral, em especial com base em espécies folhosas nacionais. Portanto, serão apresentados resultados de pesquisas desenvolvidas, também, com espécies folhosas oriundas de reflorestamento.

Silva e Trugilho (2003) avaliaram o comportamento dimensional da madeira de cerne e de alburno de jatobá da espécie *Hymenaea courbaril* L. Os materiais foram submetidos à pirólise com as temperaturas finais de 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900 °C, com aquecimento médio de 1,3 °C/minuto. Os resultados alcançados permitem concluir que os comportamentos dimensionais das madeiras do alburno e do cerne foram semelhantes quando submetidos à elevadas temperaturas, porém, o alburno apresentou taxa de redução linear, seccional e volumétrica sempre maiores. Por volta de 450 °C, para o alburno, ocorreu uma redução volumétrica de 50% e para o cerne, este nível de redução aconteceu somente acima de 600 °C demonstrando que o cerne possui maior resistência à degradação térmica do que o alburno.

Carrasco et al. (2016) avaliaram as madeiras de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla* (Lyptus) quanto à influência da temperatura no intervalo de 20 a 240 °C nas suas propriedades físicas e mecânicas. Os ensaios foram monitorados por termopares tipo K em um corpo de prova adotado como testemunha. Foram avaliados 78 corpos de prova retirados de 6 vigas e apresentando seção transversal de 50 mm × 50 mm × 150 mm de comprimento no sentido paralelo às fibras segundo procedimentos prescritos pela NBR 7190:1997. A madeira apresentava massa específica aparente média de 671 kg/m³ e teor de umidade (TU) de 11,14%. Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras sob temperaturas de 80 °C e de 240 °C correspondem às porcentagens de 10% e 65% da resistência sob temperatura de 20 °C, respectivamente. Os valores médios de módulo de elasticidade (MOE) determinados nos ensaios de compressão paralela às fibras sob temperaturas de 120 °C e de 200 °C correspondem às porcentagens de 92% e de 63% do MOE sob temperatura de 20 °C, respectivamente.

Schneid (2017) avaliou a influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento da madeira das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna* entre as temperaturas de 25 e de 180 °C e propôs coeficientes de modificação da resistência ao embutimento como uma função contínua do ângulo da grã e da temperatura.

Martins et al. (2014) e Martins (2016) apresentam resultados sobre a investigação de amostras de espécies nativas plantadas de *Eucalyptus* e *Pinus* submetidas à temperaturas de incêndio padrão. Martins (2016) submeteu vigas de MLC de *Eucalyptus sp.* (de 743 kg/m³ a 12% de TU) e de *Pinus Oocarpa* (de 505 kg/m³ a 12% de TU) ao ensaio em fogo padrão segundo a ISO 834 e após resfriadas, as seções transversais residuais foram ensaiadas à flexão; em relação ao módulo de elasticidade determinado antes da exposição ao fogo, a viga de *Eucalyptus sp.* apresentou uma redução de 49,5% para 35 min de exposição ao fogo enquanto a viga de *Pinus Oocarpa* apresentou uma redução no módulo de elasticidade de 31% para 26 min de exposição.

Manriquez (2008), Manriquez e Moraes (2009) e Manriquez (2012) apresentam resultados acerca da investigação das espécies *Schizolobium amazonicum* (paricá) da floresta amazônica e das espécies plantadas *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* em temperaturas entre 20 e 230 °C determinando a influência da temperatura sobre as resistências à compressão, ao cisalhamento e embutimento (paralelo e longitudinal às fibras) e à flexão estática propondo fatores redutores das propriedades obtidas em relação à temperatura ambiente.

Modelos de porcentagem de redução de resistência mecânica são desenvolvidos em Manriquez (2012) para amostras das espécies *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*, de massas específicas de 778 e 372 kg/m³, respectivamente, submetidas a temperaturas entre 20 e 230 °C. São propostos coeficientes de modificação (CM) ajustados aos valores de resistências características normalizadas, obtidas experimentalmente em Manriquez (2008), para as seguintes propriedades: resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática. Equações normalizadas para o cálculo dos coeficientes de modificação ($k_{w0,T}$) das resistências características à compressão ($f_{c0,Tk}$) e cisalhamento ($f_{v0,Tk}$) paralelos às fibras, os respectivos coeficientes de correlação (R^2) e intervalos de temperatura, T (°C) encontram-se nas tabelas (2.12) e (2.13) elaboradas a partir de dados de valores característicos obtidos em Manriquez (2012).

Tabela 2.12 – Equações normalizadas para cálculo dos coeficientes de modificação ($k_{w0,T}$) das resistências características à compressão ($f_{c0,kT}$) e cisalhamento ($f_{v0,kT}$) paralelos às fibras de 20 a 230°C para *Eucalyptus saligna*.

CM	Equações	R^2	Intervalos de T (°C)
$k_{c0,T} = \frac{f_{c0,kT}}{f_{c0,k20°C}} =$	$1,08 - 6,30 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,98	20 – 100
	0,45	0,86	100 – 185
	$0,91 - 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,97	185 – 230
$k_{v0,T} = \frac{f_{v0,kT}}{f_{v0,k20°C}} =$	$1,16 - 8,59 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,98	20 – 70
	$0,51 + 4,37 \cdot 10^{-4} \cdot T$	0,41	70 – 150
	$1,38 - 5,48 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,96	150 – 230

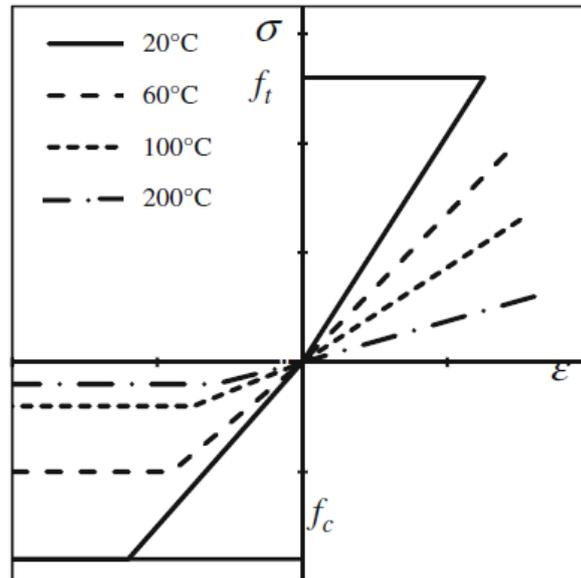
Tabela 2.13 – Equações normalizadas para cálculo dos coeficientes de modificação ($k_{w0,T}$) das resistências características à compressão ($f_{c0,kT}$) e cisalhamento ($f_{v0,kT}$) paralelos às fibras de 20 a 230°C para *Schizolobium amazonicum*.

CM	Equações	R^2	Intervalos de T (°C)
$k_{c0,T} = \frac{f_{c0,kT}}{f_{c0,k20°C}} =$	$1,08 - 4,93 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,91	20 – 64
	$0,66 + 1,60 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,92	64 – 166
	$2,61 - 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot T$	0,98	166 – 230
$k_{v0,T} = \frac{f_{v0,kT}}{f_{v0,k20°C}} =$	1,0	1,00	20 – 100
	$1,74 - 5,87 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,99	100 – 230

Nos ensaios realizados em Manriquez (2012), os coeficientes de variação nos ensaios de compressão paralela às fibras para o *Eucalyptus saligna* foi em média 11,3% e para o *Schizolobium amazonicum* foi de 7,7%. Nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o *Eucalyptus saligna* foi em média 15,45% e para o *Schizolobium amazonicum* foi de 11,1%. A espécie *Eucalyptus saligna* apresenta uma maior variabilidade (11,3% e 15,45%) em relação à sua média do que a espécie *Schizolobium amazonicum* (7,7% e 11,1%). Observou-se que o *Eucalyptus saligna* apresentou uma maior resistência mecânica à temperatura ambiente em todas as propriedades mecânicas estudadas e, no entanto, apresentou uma maior redução nas respectivas resistências mecânicas sob temperaturas elevadas, provavelmente devido às fendas que foram observadas no topo e faces dos corpos de prova, propiciando fluxo maior de calor.

Segundo Schmid et al. (2014), Schaffer (1984) desenvolveu uma abordagem para determinar a seção transversal efetiva para elementos de madeira expostos ao fogo, típica de materiais compostos. No entanto, ao contrário do aço, a madeira exposta ao fogo ainda irá mostrar na tração as propriedades dos materiais frágeis, enquanto algum comportamento plástico pode ser observado na compressão; além disso, a alteração no módulo de elasticidade (MOE) com a temperatura é diferente para a madeira em compressão e na tração, conforme a Fig. 2.12.

Figura 2.12 – Relação tensão-deformação (paralela às fibras da madeira) em diferentes temperaturas com plasticidade apenas na compressão.



Fonte: Schmid et al. (2014).

Outras limitações apontadas por Schmid et al. (2014) acerca da abordagem descrita em Schaffer (1984) são: quando transformando a seção transversal residual com a zona aquecida com resistência de 0 a 100% do valor da temperatura normal, numa seção transversal efetiva com resistências de temperatura normal ao longo da toda a seção transversal, a profundidade da camada de resistência zero depende do tempo de exposição ao fogo da seção. Para um tempo mais longo, o eixo neutro vai deslocar-se para cima. Além disso, o comportamento frágil da madeira na tração irá limitar o gradiente de distribuição de tensões na zona aquecida, influenciando a posição do eixo neutro.

O comportamento elasto-frágil na tração e elasto-plástico na compressão (como apresentado na Fig. 2.12) foi considerado para a madeira paralela às fibras: a redução da resistência à tração com a temperatura nas fibras inferiores da viga de madeira exposta inferior conduz a uma menor tensão máxima de tração. No entanto, as perdas são parcialmente compensadas pelo fluxo plástico na compressão no lado superior não exposto da viga. Como relatado na literatura, a camada de carvão não contribui para a capacidade resistente; nenhuma tensão pode ser observada no lado inferior da viga dentro da profundidade carbonizada.

Schmid et al. (2014a) recomendam a realização sistemática de ensaios em situação de incêndio, a fim de verificar ou melhorar as propriedades efetivas disponíveis dos materiais em uma

situação de incêndio e reduzir a dispersão dos resultados e melhorar a previsão das propriedades do material. Para os autores, a camada de resistência zero usada como parâmetro crucial no “Método de redução da seção transversal - MRST” e determinada em diferentes publicações não são considerados certos. Com base na análise de resultados de 153 diferentes ensaios de incêndio, sendo 117 elementos em flexão, 6 em compressão e 30 em tração) concluem que o MRST implementado na EN 1995-1-2 (2004) demonstra ser adequado apenas para elementos de tração, fornecendo resultados não conservadores para elementos de compressão, enquanto para elementos em flexão foi observada uma dispersão significativa, não descrevendo adequadamente o comportamento complexo dos elementos de madeira em flexão. Em outra publicação os autores Schmid et al (2014b) determinaram para elementos em flexão uma camada de resistência zero variando de 6 a 39 mm.

Lange et al. (2014) realizando um extenso programa de ensaios de 32 vigas de MLC de madeiras de baixa densidade (460 kg/m^3) à flexão sob exposição ao fogo padrão e fogos paramétricos conclui que uma camada de resistência zero de 7 mm para elementos de madeira expostos ao fogo padrão pode não ser conservadora e observa que a profundidade de camada de resistência zero varia em função da taxa de aquecimento. Ou seja, argumenta que como a espessura do material degradado pela temperatura depende da penetração do calor através de uma seção, parece lógico que a taxa de aquecimento tenha efeito sobre sua profundidade.

Sobre a questão da largura da camada de resistência zero, os trabalhos mais recentes vem concluindo sobre a necessidade de maiores investigações, pois como observam Klippel et al. (2012), vários parâmetros como tempo de exposição ao fogo, estado de tensão (compressão, tensão e flexão), forma e dimensões da seção transversal influenciam a espessura da camada com assumida resistência e módulo de elasticidade zero.

2.3.1.3 Resistência mecânica na madeira após arrefecimento das temperaturas

Existe uma distinção entre madeira tratada termicamente (madeira modificada) e madeira remanescente de incêndio. Sobre esta questão, segundo Leal (2010), nas primeiras, as alterações na estrutura química e nas propriedades mecânicas podem ter proporções maiores do que as verificadas na madeira modificada, uma vez que não é possível controlar a temperatura nem o tempo de exposição da madeira ao incêndio.

Em Leal (2010) foram avaliadas amostras de madeira de *Quercus faginea* (carvalho de densidade de 600 kg/m^3) de dimensões $6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1900 \text{ mm}$ provenientes de elemento estrutural remanescente de incêndio; demonstrou-se que a madeira apresentou-se mais rígida e quebradiça, tendo um efeito redutor em suas propriedades mecânicas; em média, de 40% na resistência à flexão e no módulo de elasticidade. Depois de resfriado (arrefecido) até à temperatura ambiente, o elemento estrutural de madeira apresenta uma resistência residual.

Em elementos de madeira que sofrem aumento de calor e mesmo chegam a carbonizar, observa-se uma mudança em sua estrutura anatômica mesmo após o arrefecimento das temperaturas. Figueiredo et al. (2011) avaliaram alterações na anatomia macro e microscópica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla* (Lyptus) após submissão à influência da temperatura no intervalo de 40 a 240 °C. O primeiro ponto de impacto do aquecimento na estrutura do lenho se dá ao nível dos raios parenquimáticos, fazendo com que essa desestruturação se aprofunde radialmente na madeira e leve a uma desorganização celular, criando espaços, permitindo uma maior aeração e ação progressiva do fogo.

A caracterização anatômica de madeira carbonizada foram revisadas nas publicações: Muñiz et al. (2012) que avaliaram a anatomia macro e microscópica do carvão de dez espécies florestais nacionais e concluíram que a estrutura anatômica da madeira, de maneira geral, se mantém durante o processo de carbonização em temperaturas de até 450 °C; Gonçalves et al. (2008) e Scheel-Ybert e Gonçalves (2017) apresentam amplo trabalho com identificação das características de carvão de 80 espécies de madeiras carbonizadas e concluem que existe uma excelente preservação da estrutura celular após carbonização e fragmentos de carvão conservam praticamente todos os caracteres diagnósticos da madeira.

2.4 Determinação das resistências características

Conforme Montgomery e Runger (2003), o tamanho da amostra (n) é geralmente pequeno na maioria dos problemas de engenharia sendo necessário empregar uma distribuição diferente e a Distribuição t Student atende a essa situação. Segundo Abreu (2007) a Distribuição t de Student é a designação de uma família de distribuições indexada pelo parâmetro v , que representa o número de graus de liberdade ($n-1$) e apresenta as seguintes características: a) a distribuição t de Student varia de acordo com a dimensão da amostra; b) a curva da distribuição t de Student tem a mesma forma em sino da distribuição Normal, porém reflete a maior

variabilidade (com curvas mais alargadas) que é de se esperar em amostras pequenas; c) a distribuição t de Student tem valor médio zero (tal como a distribuição Normal standard); d) o desvio padrão da distribuição t de Student varia de acordo com o tamanho da amostra sendo maior do que 1 (o que não acontece com a distribuição normal padrão, onde $\sigma = 1$; e) quanto maior a dimensão da amostra, mais a distribuição t de Student se aproxima da distribuição Normal.

Sobre a Distribuição t Student, Montgomery e Runger (2003) esclarecem que quando a variância da população σ^2 for desconhecida um procedimento lógico seria trocar o desvio padrão σ da população pelo desvio padrão (s) da amostra. Desta maneira, por definição, faça-se x_1, x_2, \dots, x_n ser uma amostra aleatória para uma distribuição normal, com média (μ) e variância (σ^2), desconhecidas. Considerando-se \bar{x} a média da amostra; μ a média da população; S , o desvio padrão da amostra e n , o tamanho da amostra, a grandeza apresentada na Eq. (2.33) representa uma distribuição t, com n-1 graus de liberdade.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (2.33)$$

Montgomery e Runger (2003) ainda aclaram que a aparência geral da distribuição t é similar à distribuição normal padrão, em que ambas as distribuições são simétricas e unimodais e o valor máximo da ordenada é alcançado quando a média $\mu = 0$. No entanto, a distribuição t apresenta mais probabilidade nas extremidades do que a distribuição normal e à medida em que o número de graus de liberdade tende à infinito a forma limite da distribuição t corresponderia à distribuição normal padrão. Portanto, a partir da Eq. (2.33) deduz-se a equação para a determinação da média populacional representada na Eq. (2.34).

$$\mu = \bar{x} - t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.34)$$

Schneid (2017) considerou para o cálculo da resistência característica ao embutimento na madeira de *Eucalyptus saligna*, espécie folhosa, a distribuição t Student com índice de confiança de 95%, adotando a Eq. (2.35).

$$f_{e,\alpha T,k} = f_{e,\alpha T,m} - t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.35)$$

Na Eq. (2.35), $f_{e,\alpha T,k}$, corresponde à resistência ao embutimento (e) característica em função e a inclinação da grã (α) e da variação da temperatura (T); $f_{e,\alpha T,m}$, a média da resistência ao embutimento; t , corresponde ao valor tabelado da distribuição t de Student; S , o desvio padrão; n , o número de corpos de prova da amostra, considerando $n-1$ graus de liberdade.

Manriquez (2012) na determinação da resistência característica ($f_{w0,k}$) da madeira de eucalipto da espécie folhosa *Eucalyptus saligna* (amostras com 10 elementos) e madeira de paricá da espécie *Schizolobium amazonicum*, (amostras com 7 elementos), submetidas a ensaios mecânicos sob variação de temperaturas de 20 a 230°C, considerou a distribuição t Student e a distribuição normal, conforme Eq. (2.36).

$$f_{w0,k} = f_{w0,m} - t \cdot s \quad (2.36)$$

Na Eq. (2.37) adotou-se a resistência média ($f_{w0,m}$), o valor t de Student e o desvio padrão da amostra (s). Considerando $n-1$ os graus de liberdade, com índice de confiança de 95%, foi adotado $t = 1,833$, para 9 graus de liberdade e $t = 1,943$, para 6 graus de liberdade.

2.5 Análise e tratamento de dados

Buscou-se na literatura informações sobre ferramentas que pudessem contribuir para as análises dos dados a serem obtidos nos programas experimentais. A análise de variáveis utilizando-se a estatística multivariada, conforme Vicini (2005), é aplicada para verificar como as amostras se relacionam ou o quanto são semelhantes, segundo as variáveis utilizadas na investigação. Destaca-se, também, a análise de agrupamento hierárquico que separa objetos em grupos similares baseando-se nas características que estes objetos possuem, servindo para extrair características escondidas dos dados e desenvolver as hipóteses a respeito de sua natureza (Linden 2009). Na literatura revisada, a análise de agrupamento foi considerada uma ferramenta eficaz para a reunião das espécies de madeiras a partir de suas similaridades.

Propostas de agrupamentos de espécies tropicais brasileiras foram avaliadas em distintos trabalhos (ARAÚJO, 2002), (DIAS LAHR, 2004), (ARAÚJO, 2007), (MARQUES, 2008), (LOBÃO et al., 2010), (MELO et al., 2013). Também foram avaliados em distintos trabalhos, o desenvolvimento de análise de regressão e o ajuste de equações que permitiram estimar as

relações funcionais existentes entre características anatômicas e químicas das madeiras e suas diferentes propriedades físicas e mecânicas. Nas análises de inter-relações entre as propriedades, a massa específica obteve o maior número de correlações significativas.

Nas análises de dados experimentais, as observações designadas por dados espúrios, também conhecidos como dados discordantes ou *outliers*, merecem atenção, especialmente quando se trabalha com materiais naturais anisotrópicos, como as madeiras. Figueira (1998) apresenta estudo sobre o tema e afirma que as principais causas que levam ao aparecimento dos dados discordantes relacionam-se a erros de medição, erros de execução e variabilidade inerente aos elementos da população. Conforme o estudo, as observações consideradas discordantes devem ser tratadas cuidadosamente, pois podem conter informações relevantes sobre características subjacentes aos dados e poderão ser decisivos no conhecimento da população à qual pertence a amostra em estudo. Segundo Montgomery e Runger (2003), os dados discordantes podem oferecer informações de interesse sobre circunstâncias não usuais. Deduz-se que os dados considerados espúrios devam ser analisados com cuidado e não devem ser descartados de forma indiscriminada.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta tese foi desenvolvido nas instalações da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Os ensaios e a preparação dos corpos de prova foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia: Centro de Pesquisa Avançada de Móveis, Madeira e novos Materiais (CPAM³) e no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), ambos no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia, contando com o apoio logístico da marcenaria do Departamento de Manutenção e Infraestrutura – DEMAI. Os ensaios de química da madeira foram realizados no Laboratório de Química do Instituto de Ciências Exatas, ICEX.

Para atingir os objetivos propostos e considerando-se que há fases distintas de aquecimento da madeira durante um evento de incêndio, buscou-se neste trabalho verificar-se o desempenho do material em relação a essas fases distintas de aquecimento. Sendo assim, o programa experimental desenvolveu-se em duas partes fundamentais. No item 3.1 encontram-se descritos os materiais e métodos adotados nos ensaios de carbonização de amostras de madeiras de 13 espécies folhosas selecionadas e as análises dos dados. No item 3.2 encontram-se descritos os materiais e métodos adotados nos ensaios de avaliação da influência da temperatura nas propriedades mecânicas e no módulo de elasticidade de amostras de madeira da espécie folhosa *Dinizia excelsa Ducke* assim como as análises dos dados.

3.1 Ensaios de carbonização

Neste item serão apresentados os dados da amostra, os equipamentos, os instrumentos e a metodologia aplicada na realização dos ensaios de carbonização da madeira. Com base nas referências: ASTM E-119 (1961), ASTM E-119 (1995), ASTM E 119 (2000), NBR

5628 (2001), NBR 14432 (2001), (SCHAFFER, 1967), (SCHAFFER, 1968), EN 1995-1-2 (2004) considerou-se diversos parâmetros (metodologias de ensaio, dimensões da seção transversal de corpos de prova, a disposição dos termopares, a exposição em forno vertical, temperatura na base da camada de carvão). Com base nessas informações, foram definidos os parâmetros de ensaio: a) Apenas uma face exposta ao fogo direto (unidimensional)¹⁵; b) Fogo incidindo perpendicularmente às fibras das madeiras; c) Corpos de prova condicionados em temperatura ambiente; d) Determinação da densidade aparente das espécies utilizando os próprios corpos de prova; e) Adotou-se a temperatura na base da camada de carvão sendo 300 °C.

3.1.1. Materiais

3.1.1.1 Madeiras

A amostra consiste de espécies encontradas em duas florestas tropicais brasileiras, a Amazônica e a Mata Atlântica. Para a caracterização das espécies, seus nomes comuns, sub-famílias e famílias, foram consultadas as fontes Alves et al. (2012), Zenid (2009) e o banco de dados virtual (https://www.ipt.br/informacoes_madeiras2.php) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Foram selecionadas as informações de maior interesse para o presente estudo, tais como, características sensoriais, sobre a presença e tipo de obstruções nos vasos (anatomia macroscópica) e a condição de permeabilidade às soluções preservativas. Os tipos de obstruções nos vasos: tilose comum (de parede fina), tilose esclerosada (de parede espessa), presença de gomas e depósitos, foram pesquisadas nas referências: Scheel-Ybert e Gonçalves (2017), Santini Jr (2013), Muñiz et al. (2012), Richter e Dallwitz (2009), Angialossy et al. (2005), InsideWood. (2004), Tomazello Filho et al. (1983) e Araújo (1965).

Apresenta-se, na sequência, a descrição da amostra relacionada por ordem alfabética de seus nomes comuns, seguidos de suas respectivas espécies, sub-famílias (quando

¹⁵ Orientação pessoal do Prof. Paulo César da Costa Pinheiro do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, com o objetivo de reduzir as variáveis do processo de carbonização, providência confirmada com a revisão bibliográfica.

necessário especificar), famílias, origem e características de maior interesse para a fase de análises:

angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke, Papilionoideae ou Faboideae, Leguminisae ou Fabaceae)

De origem amazônica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado claro ou escuro, com manchas castanhas mais escuras devido à exudação de óleo-resina, alburno castanho-pálido; brilho ausente; dura ao corte; grã direita a reversa; textura grossa, aspecto fibroso; vasos vazios ou com substâncias esbranquiçadas; o cerne não apresenta boas condições de permeabilidade e o alburno sim.

angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke, Mimosoideae)

De origem amazônica, apresenta o cerne e o alburno pouco distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado; brilho moderado; cheiro desagradável e gosto imperceptível; densidade alta; dura

ao corte; grã direita a irregular; textura média a grossa; superfície pouco lustrosa; vasos obstruídos por óleo-resina ou substâncias esbranquiçadas; o cerne não apresenta boas condições de permeabilidade.

castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K., Lecythidaceae)

De origem amazônica, apresenta o cerne castanho-claro levemente rosado; sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; macia ao corte; grã direita; textura média; vasos obstruídos por tiloses comuns; o cerne apresenta baixa permeabilidade às soluções preservativas. Sobre esta espécie, Zangiácomo (2003) afirma que a reduzida presença de vasos e a obstrução sistemática por tiloses, prejudica a sua permeabilidade.

cedro (*Cedrela spp.*, Meliaceae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno indistintos pela cor, bege-rosado; cheiro perceptível, desagradável quando a madeira está úmida e imperceptível depois da madeira seca; gosto indistinto; densidade baixa; grã ondulada; textura grossa; vasos obstruídos por óleo-resina ou substância branca; o cerne apresenta baixa permeabilidade às soluções preservativas enquanto o alburno é permeável.

cumaru (*Dipteryx odorata*, Papilionoideae)

De origem amazônica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne castanho-claro-amarelado; brilho moderado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã revessa; textura fina a média, aspecto fibroso atenuado; superfície pouco lustrosa; vasos obstruídos por óleo-resina; impermeável às soluções preservativas.

garapeira (*Apuleia leiocarpa*, Caesalpinioideae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne variando de bege-amarelado a castanho-amarelado; superfície lustrosa e lisa ao tato; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; dura ao corte; grã revessa; textura média; vasos obstruídos por óleo-resina; baixa permeabilidade às soluções preservativas.

ipê (*Tabebuia spp.*, Bignoniaceae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne pardo ou castanho com reflexos amarelados ou esverdeados, alburno branco-amarelado; superfície sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã irregular a revessa; textura fina; vasos obstruídos por tilose comum e substância de cor amarela-esverdeada (ipeína); impermeável às soluções preservativas.

louro-itaúba (*Mezilaurus itauba*, Lauraceae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne amarelo-esverdeado, quando recém serrado, tornando-se castanho-esverdeado-escuro; cheiro agradável, levemente adocicado, e gosto imperceptível; densidade alta; grã ondulada ou revessa; textura média; superfície irregularmente lustrosa; vasos obstruídos por tiloses esclerosadas e presença de gomas e depósitos; baixa permeabilidade às soluções preservativas.

muiracatiara (*Astronium lecointei Ducke*, Anacardiaceae)

De origem amazônica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne variável do bege-rosado ao castanho-escuro-avermelhado, com estrias mais escuras; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã irregular; textura média; vasos obstruídos por tiloses comuns; impermeável ou de muito baixa permeabilidade às soluções preservativas.

maçaranduba (*Manilkara spp.*, Sapotaceae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne vermelho-claro tornando-se vermelho-escuro com o tempo; sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã direita; textura fina; vasos obstruídos por tiloses esclerosadas e presença de gomas e depósitos; impermeável às soluções preservativas.

pequi (*Caryocar villosum*, Caryocaraceae)

De origem amazônica, apresenta o cerne esbranquiçado, levemente rosado, passando geralmente a amarelado-claro ou também pardo-claro-amarelado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; grã revessa; textura grossa; vasos obstruídos por tiloses comuns; baixa permeabilidade às soluções preservativas.

roxinho (*Peltogyne spp.*, Caesalpinioideae)

De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne roxo podendo escurecer com o tempo, alburno bege claro; brilho moderado a acentuado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã direita a irregular; textura fina a média; vasos obstruídos por óleo-resina; baixa permeabilidade a soluções preservativas.

vinhático (*Plathymania foliolosa Benth.*, Leguminosae)

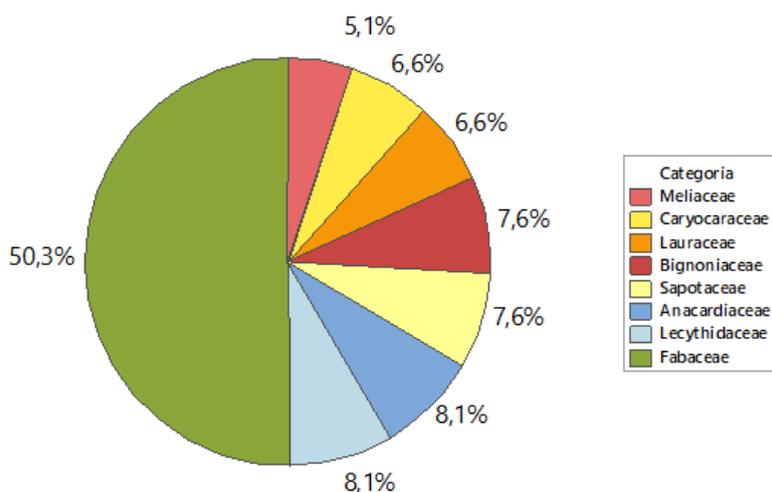
De origem amazônica e da Mata Atlântica, apresenta o cerne e o alburno distintos pela cor, cerne amarelado ou castanho-amarelado, com reflexos dourados; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade baixa; grã direita a irregular; textura média; vasos obstruídos por óleo-resina avermelhada; baixa permeabilidade às soluções preservativas. Para a avaliação da influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas foi escolhida, dentre as treze, uma espécie de alta densidade aparente, a *Dinizia excelsa Ducke* (angelim-vermelho).

A espécie angelim-vermelho (*Dinizia excelsa Ducke*), objeto de estudo para avaliação da influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas, apresenta segundo a NBR 7190 (1997) valores médios usuais de densidade aparente a 12% de teor de umidade, resistências à compressão, tração e cisalhamento e módulo de elasticidade paralelos às

fibras, respectivamente são $d_{ap(12\%)} = 1170 \text{ Kg/m}^3$; $f_{c0} = 76,7 \text{ MPa}$; $f_{t0} = 104,9 \text{ MPa}$; $f_v = 11,3 \text{ MPa}$ e $E_{c0} = 16694 \text{ MPa}$.

A amostra está distribuída em 8 famílias botânicas (ICN, 2012), conforme a Fig. 3.1, sendo: **Anacardiaceae**: muiracatiara; **Bignoniaceae**: ipê; **Caryocaraceae**: pequi; **Fabaceae**: angelim-pedra, angelim-vermelho, cumarú, garapeira, roxinho e vinhático; **Lauraceae**: louro-itaúba; **Meliáceae**: cedro; **Lecythidaceae**: castanheira; **Sapotaceae**: maçaranduba.

Figura 3.1 – Famílias de espécies madeireiras estudadas nesta tese.



Como visto na bibliografia, a Família das Fabaceae, nova denominação da antiga Família das Leguminosae, inclui três subfamílias: Caesalpinoideae, Mimosoideae e Papilionoideae, sendo a de maior contribuição para a amostra estudada, com 50,3%. As demais famílias contribuem com menos de 9% cada uma.

As madeiras das treze (13) espécies da classe das folhosas foram adquiridas no mercado de madeiras em Belo Horizonte, MG na forma de vigas com seção nominal de 150 mm × 150 mm e comprimentos de 750 mm ou de 2500 mm. Todas as peças foram armazenadas para estabilização da umidade no CPAM³ à temperatura ambiente por 12 meses antes da preparação dos corpos de prova.

Foram preparados 4 corpos de prova para cada espécie. Com base nos parâmetros

observados na literatura, foi definido um corpo de prova de forma cúbica de aresta nominal de 150 mm, como apresentado na Fig. 3.2.

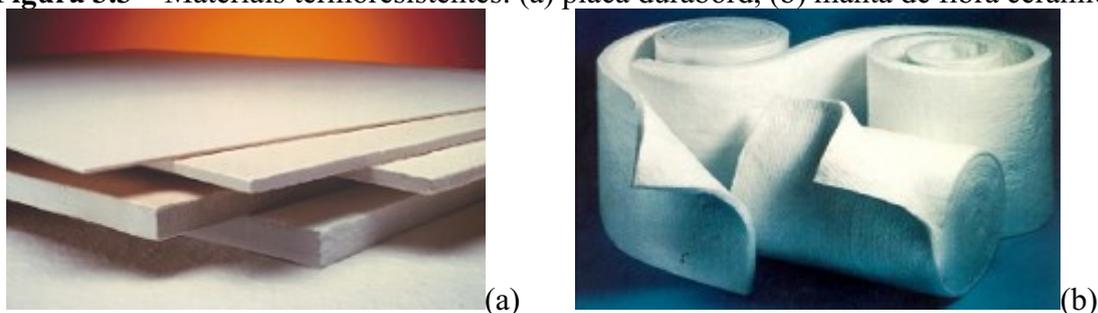
Figura 3.2 – Imagens dos corpos de prova de sete das treze espécies estudadas.



3.1.1.2 Material refratário e isolante térmico

Para isolamento dos corpos de prova para ensaio de taxa de carbonização da madeira foram utilizados os materiais resistentes ao calor, apresentados na Fig. 3.3.

Figura 3.3 – Materiais termoresistentes: (a) placa durabord, (b) manta de fibra cerâmica.



Fonte: Refratários Athenas.

Os materiais resistentes ao calor apresentam as seguintes especificações: a) a placa durabord, espessura de 12,7 mm, é rígida para aplicação em temperatura elevada até 1260 °C, feita com flocos de fibras cerâmicas ligadas com agentes orgânicos e inorgânicos, de densidade de 300 kg/m³ e condutividade térmica variando de 0,08 a 0,25 W/m °C; b) a manta de fibra cerâmica, espessura de 25,4 mm, resistente, leve a alta refratariedade, para aplicação em temperatura elevada até 1400 °C, de densidade de 128 kg/m³ e

condutividade térmica variando de 0,05 a 0,28 W/m °C; c) adesivo resistente a ambientes de temperaturas até 1100 °C, para fixação das placas duraboard sobre as superfícies dos corpos de prova de madeira.

3.1.1.3 Suporte para corpo de prova dentro do forno

Para conter o corpo de prova no ensaio de carbonização da madeira, garantir o alinhamento dos termopares e uma única frente de carbonização (carbonização unidimensional) foram projetadas duas caixas com dimensões de 252 mm × 201 mm × 252 mm. Adotou-se chapas de aço AISI-310¹⁶, soldadas com eletrodos 309, categoria E, cuja resistência à oxidação em temperaturas mais elevadas torna possível o seu uso em estufas de secagem e revestimentos de fornos e câmaras de combustão.

A primeira, apresenta cinco furos para condução de cinco termopares ao interior dos corpos de prova e uma aba lateral para alinhar um único termopar para captura da temperatura que chega ao corpo de prova, conforme a imagem na Fig. 3.4(a). A segunda, apresenta cinco furos para condução de cinco termopares ao interior dos corpos de prova e cinco abas frontais para alinhar cinco termopares próximos à superfície do corpo de prova (não se utilizando a aba lateral); para manter os termopares bem alinhados, foi providenciada uma barra, com furos para passagem das bainhas dos cinco termopares próximos à superfície do corpo de prova, conforme a Fig. 3.4b.

Figura 3.4 – Suporte: (a) com 5 furos e 1 aba lateral; (b) com 5 furos e 5 abas frontais.



¹⁶<http://www.acosporte.com.br/aco-inox-aisi-310>

A intenção ao realizar os furos inclinados foi a de possibilitar à cada termopar que registrasse toda a irradiação de calor projetada imediatamente à sua frente, sem a interferência de um outro termopar. Considerou-se, também, a proposta de um corpo de prova mais robusto (um cubo de 150 mm de aresta) com área disponível para a disposição dos termopares inclinados.

A movimentação do fogo no interior do forno durante o ensaio é circular e muito acelerada. A melhor opção para garantir a condição de queima unidimensional foi o uso desta caixa de inox. Foram testados outros modelos, sendo um de cerâmica e outro de refratários, mas não funcionaram. Após avaliações iniciais, as caixas metálicas, com alça na parte superior, demonstraram maior robustez para suportar a dinâmica do fogo e a adequação à logística de acessar o interior do forno vertical, que apresenta abertura na parte superior, posicionar o corpo de prova na base interna do forno para o início do ensaio de carbonização e retirá-lo, após o término do ensaio.

Um dispositivo metálico semelhante não foi identificado na literatura. A evidência da efetividade do isolamento térmico (providenciado pelos materiais refratários e isolantes térmicos envolvendo os corpos de prova de madeira) e da carbonização unidimensional foi verificada por intermédio de uma análise numérica (Apêndice A).

3.1.2 Instrumentos e equipamentos

3.1.2.1 Termopares

O termopar escolhido para o ensaio de carbonização da madeira foi do tipo K (cromel-alumel), Fig. 3.5, com especificação: Microbell 3 × 1000 mm com pote de aço inox AISI-310 e rabicho 1500 mm singelo PVC, que atende a faixa de temperatura até 1200°C. Apresenta precisão de $\pm 2,2$ °C até 375 °C e $\pm 1,1$ °C acima de 375 °C (Limite de Erro baseado na Norma ASTM E230) conforme o fabricante Analógica Instrumentação e Controle.

Figura 3.5 – Sensores de temperatura, termopar tipo K.



Fonte: Analógica Instrumentação e Controle.

3.1.2.2 Sistema de aquisição de dados ADS 0500

Equipamento para monitoração e para o registro dos sinais recebidos pelos termopares com capacidade de comunicação em rede utilizado com um microcomputador. O ADS 0500 é um sistema integrado e compacto de aquisição de dados com a seguinte especificação: 8 ou 16 amplificadores configuráveis, adequados a uma vasta gama de sensores; um sensor de temperatura incorporado; um conversor analógico-digital com 16 canais multiplexados (A/D); 16 entradas e 16 saídas digitais (I/O); um contador de pulsos; dois conversores digital-analógicos (opcionais) e um sistema de comunicação em rede *ETHERNET*, 10 Mbits/s, com protocolo IP. Com o ADS 0500 utilizou-se os programas AqDados7 e AqDAnalysis para aquisição e análise de dados, respectivamente.

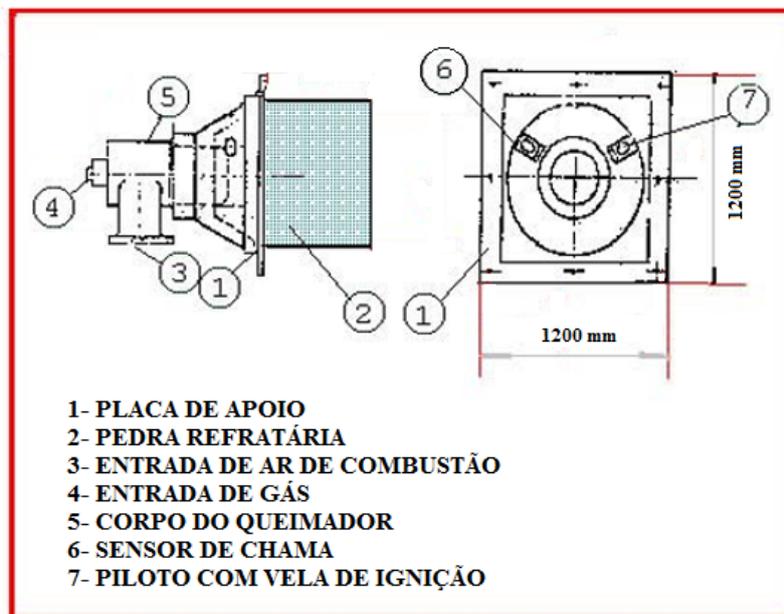
3.1.2.3 Paquímetro digital e balança eletrônica

Foram utilizados medidores das marcas Starrett e Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm, para medidas radiais, tangenciais e longitudinais dos corpos de prova. Para medidas de massa utilizou-se uma balança eletrônica AL 500 com capacidade de 500 g e precisão de 0,01g, modelo da marca Marte Balanças.

3.1.2.4 Forno a gás para ensaios de carbonização

O forno a gás, especialmente construído para ensaios em situação de incêndio, foi projetado a partir da revisão bibliográfica (ASTM E-119 e NBR 5628). Fabricado pela Grion Fornos industriais Ltda, conforme a Fig. 3.6 (para mais detalhes ver o Anexo 3).

Figura 3.6 – Esquema do forno a gás GLP para ensaios de carbonização.



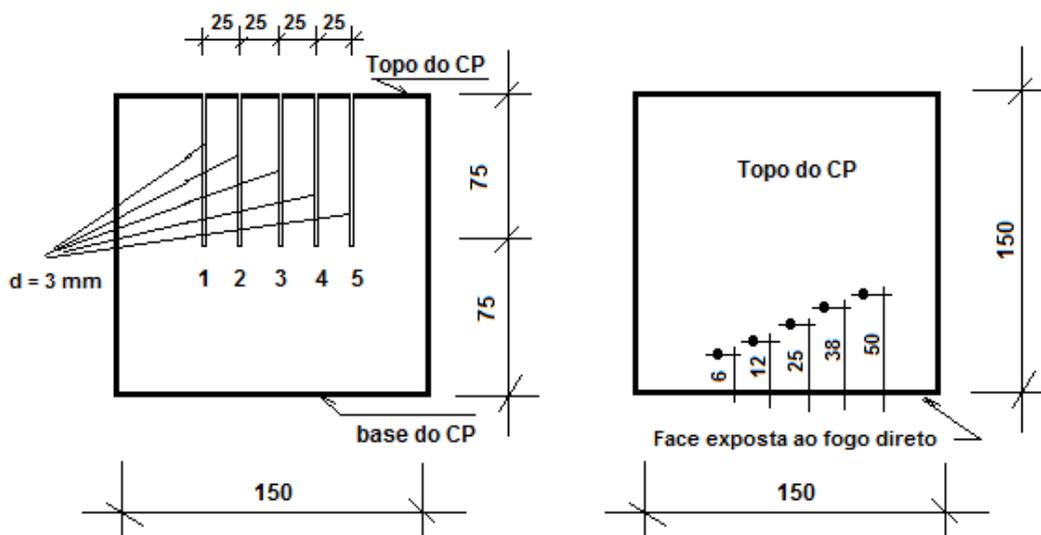
Fonte: Grion Fornos industriais Ltda.

3.1.3 Métodos

3.1.3.1 Preparação dos corpos de prova de carbonização

Primeiramente foram realizados furos de 3 mm de diâmetro na face superior do CP (não exposta ao fogo direto) atingindo o centro geométrico do mesmo seguindo o esquema mostrado na Fig. 3.7.

Figura 3.7 – Esquema dos corpos de prova para ensaio de carbonização. Unid.: (mm).



Após a furação, foram determinadas as massas dos mesmos utilizando a balança digital assim como foram medidas as respectivas dimensões com o paquímetro digital para cálculo dos volumes e determinação das massas específicas aparentes.

3.1.3.2 Caracterização física

Por apresentarem seção estrutural, cada corpo de prova preparado para o ensaio de carbonização de dimensões de 150 × 150 × 150 (mm) teve a sua umidade de equilíbrio (UE, %) estimada adotando-se a Eq. (3.1) desenvolvida em Simpson (1973).

$$UE = \frac{18}{M_p} \left(\frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right) \cdot 100, \quad (3.1)$$

sendo: h, pressão relativa de vapor d'água = UR/100 (decimal); UR, umidade relativa; T, a temperatura em °C; sendo 18, o peso molecular da água (g).

Os valores de umidade relativa (UR) e de temperatura (T) foram obtidas no site do INMET-MG tendo por base as datas dos ensaios de carbonização para cada corpo de prova considerando que os corpos de prova estavam em equilíbrio com o ambiente (12 meses). Para o cálculo dos parâmetros dependentes da temperatura, M_p , K, K_1 e K_2 , aplicou-se as equações (3.2) a (3.5) propostas na Wood Handbook (2010):

$$Mp = 349 + 1,29.T + 0,0135.T^2 \quad (3.2)$$

$$K = 0,805 + 0,000736.T - 0,00000273.T^2 \quad (3.3)$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938.T - 0,000303.T^2 \quad (3.4)$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407.T - 0,000293.T^2 \quad (3.5)$$

A determinação da massa específica aparente das madeiras das treze (13) espécies realizou-se, também, a partir dos corpos de prova de carbonização de $150 \times 150 \times 150$ (mm). A densidade aparente (d_{ap}) de cada CP foi determinada conforme Eq. (3.6):

$$d_{ap} = \frac{m_U}{V_U}, \quad (3.6)$$

onde: d_{ap} é a densidade aparente; m_U é a massa da madeira com U% de umidade, em quilogramas; V_U é o volume da madeira com U% de umidade, em metros cúbicos.

Todos os valores foram reportados à umidade de 12% utilizando-se a equação proposta em Soares (2014), Eq. (3.7).

$$d_{12\%} = d_{U\%} \frac{\left(1 + \frac{12}{100}\right)}{\left(1 + \frac{U\%}{100}\right)}, \quad (3.7)$$

onde: $d_{12\%}$ representa a densidade aparente ao teor de umidade de 12%, em kg/m^3 ; $d_{U\%}$ representa a massa específica aparente ao teor de umidade de U%, em kg/m^3 ; U% representa o teor de umidade da madeira, no instante do ensaio, em %.

3.1.3.3 Isolamento térmico dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados de forma que somente uma face ficaria exposta ao fogo direto. As placas duraboard foram cortadas e coladas diretamente em 5 faces. A placa superior foi pré-furada para passagem dos termopares, seguindo o alinhamento dos furos na madeira, cuidando para se evitar que fragmentos da placa penetrassem nos furos. Sobre a placa isolante foi sobreposta uma camada de manta térmica. A sequência da preparação dos corpos de prova encontra-se na Fig. 3.8.

Figura 3.8– Modo de preparação e isolamento dos corpos de prova.

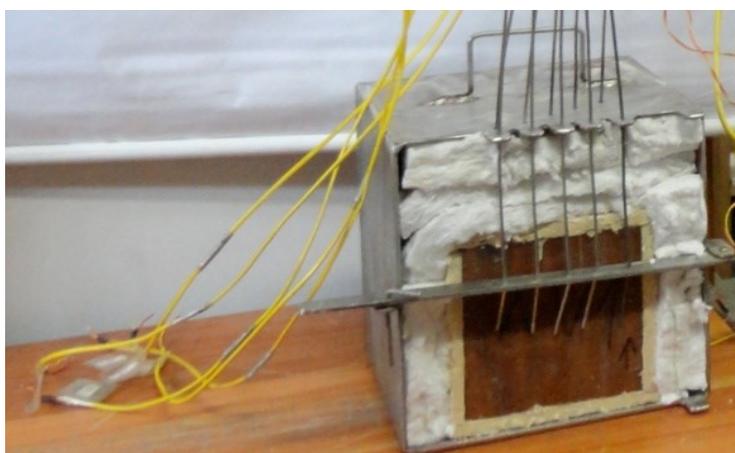


3.1.3.4 Instrumentação dos corpos de prova

Uma parte da amostra composta de corpos de prova das espécies: cedro, cumarú, ipê, louro-itaúba, parajú, roxinho e vinhático foram instrumentadas com 6 termopares tipo k, sendo 5 alocados no interior dos corpos de prova e um posicionado à frente do corpo de prova. Para estas amostras utilizou-se a caixa de aço versão 1.

Outra parte da amostra composta de corpos de prova das espécies: angelim-pedra, angelim-vermelho, castanheira, garapeira, muiracatiara, pequi e roxinho foram instrumentadas com 10 termopares tipo k, sendo 5 alocados no interior dos corpos de prova e 5 posicionados à frente do corpo de prova. Para estas amostras utilizou-se a caixa de aço versão 2, que possibilitou um melhor controle da temperatura que chegava na superfície, pois as bainhas dos termopares ficavam contidas na mesma posição sem deslocamento lateral, como ilustrado na Fig. 3.9.

Figura 3.9 – Corpo de prova instrumentado para o ensaio de carbonização.



3.1.3.5 Passos para a execução do ensaio de carbonização

Após instrumentado, cada corpo de prova foi inserido no forno. Para monitoramento do calor adotou-se um regime de aquecimento transiente com a curva padronizada proposta na ISO 834 representada pela Eq. (3.8):

$$T - T_0 = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1), \quad (3.8)$$

sendo: t , o tempo de exposição ao fogo expresso em minutos; T_0 , a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, neste trabalho tomada igual a 27 °C; e T , a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t .

Como a curva de incêndio padrão simula a ignição súbita generalizada (*flashover*), as temperaturas nos primeiros minutos são muito elevadas. Foi importante observar a calibração do forno no início de cada ensaio de carbonização, pois a madeira ao queimar libera gases que queimam e acrescentam calor ao ambiente interno do forno acarretando um aumento na velocidade de queima. Este fato exigiu a regulagem constante do forno com a verificação da quantidade de oxigênio (abertura da tampa do forno) e o fluxo de GLP, para a manutenção da curva-padrão adotada (mais detalhes no Apêndice G).

3.1.3.6 Determinação da taxa de carbonização e análise de dados

Seguindo o critério da isoterma de 300 °C, o forno foi desligado assim que o termopar no furo mais distante da frente de carbonização (50 mm de distância) atingisse essa marca. Em seguida desligava-se o SAD. Para capturar os dados de saída – registro captado por cada termopar dos tempos de avanço do calor no interior de cada corpo de prova - utilizou-se o programa AqDAnalysis. Posteriormente, os dados foram extraídos do SAD e exportados para uma planilha Excel para tratamento. Os dados experimentais de taxa de carbonização para cada corpo de prova foram determinados conforme a Eq. (3.9).

$$\beta = \frac{x}{t}, \quad (3.9)$$

sendo: x , profundidade de carbonização, que corresponde às distâncias nominais (6, 12, 25, 38 e 50 mm) entre a superfície mais exterior do elemento original e a posição da linha de carbonização, em milímetros (mm); t , tempo de exposição ao fogo, em minutos (min) quando a isoterma capturada pelos termopares indica a temperatura de carbonização da madeira de 300 °C.

Os dados espúrios (discordantes) foram analisados considerando-se, principalmente, a variabilidade inerente das madeiras folhosas brasileiras, as características da anatomia (presença de obstruções nos vasos) próprias à cada espécie e a sua influência no processo de carbonização. Realizou-se o Teste de Grubbs para verificação de distribuição normal na amostra de dados de taxa de carbonização e identificação de dados discordantes à um nível de significância $\alpha = 0,05$. Aplicou-se o Teste Games-Howell, via método One-way ANOVA, para verificação da igualdade das médias de taxa de carbonização para variâncias desiguais, adotando-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

3.1.3.7 Modelos de avanço de profundidade de carbonização

Foram avaliados modelos de avanço de profundidade de carbonização adotando-se os procedimentos propostos em Montgomery e Runger (2003). As análises multivariadas foram implementadas para identificação das relações entre as variáveis profundidade de carbonização, tempo de exposição ao fogo padrão e massa específica. Os testes de hipótese para avaliação da significância da regressão dos modelos de equações consideraram a alternativa unilateral (com $\alpha = 0,05$) nos testes F (Fisher-Snedecor) nos quais a estatística F calculada deverá ser maior do que a estatística F crítica para rejeitar-se a hipótese nula, pois trata-se de uma medida da qualidade de ajuste do modelo, segundo Biaggi et al (2017). Os testes de hipótese para avaliação da significância dos coeficientes individuais de regressão consideraram a alternativa bilateral (com $\alpha/2 = 0,05/2 = 0,025$ ou $\alpha/2 = 0,01/2 = 0,005$) nos testes T nos quais a estatística T calculada deverá ser maior do que a estatística T crítica para rejeitar-se a hipótese nula.

A estatística de Durbin-Watson (DW) foi utilizada para testar a presença de autocorrelação nos erros dos modelos de regressão. Determinou-se a diferença $D = 4 -$

DW e adotando-se parâmetros DL e DU tabelados¹⁷ pelo Minitab (2007), buscou-se identificar as seguintes previsões: se $D > DU$, não existe correlação; se $D < DL$, existe uma correlação positiva; se D estiver entre os dois limites, o teste é inconclusivo. Foi verificada a autocorrelação positiva de primeira ordem. O nível de significância adotado para o teste foi $\alpha = 0,05$ adotando-se modelos com um intercepto no eixo Y.

Nas análises dos modelos foram considerados os conceitos de R^2 , R^2 ajustado e R^2 predito. O valor R^2 corresponde à porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo e será considerado para determinar se o modelo ajusta bem os dados experimentais. Por sua vez, o R^2 ajustado é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. O valor do R^2 ajustado foi utilizado para comparar modelos que têm diferentes números de preditores. Já o valor R^2 predito contribuiu na determinação do modelo que melhor prediz as respostas para novas observações, ou seja, modelos que têm valores de R^2 predito mais elevado têm melhor capacidade preditiva. Um R^2 predito que de maneira substancial seja menor que o R^2 pode indicar que o modelo está com excesso de ajuste apresentando termos que não são importantes na população. Toda a análise de variância para a estimativa de modelos de profundidade de carbonização encontra-se desenvolvida no Apêndice B.

Para a verificação dos modelos de profundidade de carbonização, foram realizados três estudos de casos nos quais foram confrontados dados experimentais de profundidade de carbonização obtidos na literatura, com as previsões de profundidade de carbonização.

Foram investigados dados de temperaturas versus profundidades determinados para todos os corpos de prova das treze espécies. Adotou-se a função exponencial natural (e^x) para o melhor ajuste aos dados experimentais e tempos, t de 20, 30 e 60 min visando identificar os modelos que melhor representem os gradientes de temperatura para as espécies distribuídas sob Agrupamentos A1 e A2. Os modelos permitiram identificar as

¹⁷<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/model-assumptions/test-for-autocorrelation-by-using-the-durbin-watson-statistic/>

profundidades de estabilização da temperatura em função dos agrupamentos e tempos de exposição ao fogo padronizado (20, 30 e 60 min).

,03.2 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e elásticas da espécie *Dinizia excelsa* Ducke

Este sub item trata da investigação da estabilidade térmica da madeira da espécie *Dinizia excelsa*, descrita no capítulo 2. São descritos os instrumentos e equipamentos adotados, as metodologias aplicadas para a amostragem, a preparação e o aquecimento dos corpos de prova da madeira. São descritos os ensaios de compressão, de tração e de cisalhamento paralelos às fibras e a metodologia para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinal na compressão e na tração paralelas às fibras.

Apresenta-se a metodologia adotada para a correção dos valores de resistências médias e características para a umidade padrão e a determinação dos fatores de modificação das resistências e do módulo de elasticidade longitudinal em temperaturas elevadas.

3.2.1 Instrumentos e equipamentos

3.2.1.1 Termopares

Para o ensaio de aquecimento até 240 °C foi adotado o termopar tipo T com bainha em aço inox 304, diâmetro 3 mm e comprimento útil 1000 mm, com pote, para uso em temperatura de até 400 °C, rabicho flexível 2 x 20 AWG com isolamento dupla teflon (Analógica Instrumentação e Controle).

3.2.1.2 Sistema de aquisição de dados

Adotou-se o sistema de aquisição de dados (SAD) ADS 0500 para a aquisição de dados de temperatura. O SAD foi conectado a um microcomputador e adotou-se os programas AqDados7 e AqDAnalysis para aquisição e análise de dados, respectivamente.

3.2.1.3 Paquímetro digital e balança eletrônica

Foram adotados medidores das marcas Starrett e Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm, para medidas radiais, tangenciais e longitudinais dos corpos de prova. Para medidas de massa foi adotada uma balança eletrônica (AL 500) com capacidade de 500 g e precisão de 0,01 g, da marca Marte Balanças.

3.2.1.4 Câmaras de aquecimento

Para os ensaios de caracterização da madeira, foram utilizados dois tipos de câmaras de aquecimento: 1) forno mufla AN1221, com capacidade de temperatura até 1200 °C e isolamento térmico feito com fibra de baixa densidade, alta capacidade de isolamento e ótima resistência a agentes químicos (Análogica Instrumentação e Controle); 2) duas estufas de 100 litros e capacidade de temperatura até 200 °C, com circulação forçada de ar para perfeita homogeneização de temperatura (Nova Ética).

3.2.2 Métodos

O programa experimental foi desenvolvido visando identificar a influência da temperatura nas propriedades físicas, mecânicas, elásticas e térmicas da espécie *Dinizia excelsa* Ducke.

3.2.2.1 Amostragem e destinação dos corpos de prova

A amostragem seguiu os padrões da NBR 7190 (1997). Foram avaliadas sete 07 vigas de dimensões nominais de 150 mm × 150 mm × 2500 mm. Todas as peças estiveram armazenadas para estabilização da umidade no CPAM³ à temperatura ambiente por 12 meses antes da preparação dos corpos de prova. Foi, portanto, utilizado um lote homogêneo de 0,4 m³ (< 12 m³).

Os corpos de prova foram retirados aleatoriamente das sete vigas sendo que cada viga forneceu um corpo de prova para cada ensaio, sendo um para cada condição de temperatura. Foi realizada uma análise visual para seleção de CP sem defeitos e afastados nas bordas das vigas. Como *Dinizia excelsa* é uma espécie conhecida, foram preparados 07 corpos de prova para cada ensaio de caracterização. Também, foram preparados corpos de prova denominados testemunhas cuja função foi receber um termopar do tipo T em

seu interior para monitorar a temperatura de cada conjunto inserido em câmara de aquecimento, em tempo real. Em seguida foram acondicionados sob três condições: (1) natural; (2) quente e (3) arrefecida, assim descritas:

Natural (N): acondicionamento em temperatura ambiente (20 °C). Os dados dos ensaios realizados em corpos de prova sob este condicionamento são específicos para se determinar as propriedades de referência, tais como: a) físicas (teor de umidade e densidade aparente); b) mecânicas (resistências à compressão, à tração e respectivos módulos de elasticidade e resistência ao cisalhamento paralelos às fibras).

Quente (Q): acondicionamento em estufas de aquecimento em cada uma das temperaturas: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240 °C. Os dados dos ensaios realizados em corpos de prova sob estas temperaturas são específicos para se determinar a variação de massa, a densidade aparente e a caracterização mecânica de amostras nessas condições de aquecimento.

Arrefecido (A): acondicionamento em temperatura ambiente após passarem pelo aquecimento sob temperaturas: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240 °C. Os ensaios são específicos para se determinar a variação de massa, a densidade aparente e a caracterização mecânica de amostras nessas condições.

3.2.2.2 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e elásticas da espécie *Dinizia excelsa* Ducke

Propos-se realizar os seguintes ensaios para caracterização mecânica: resistências à compressão, tração e respectivos módulos de elasticidade e cisalhamento paralelos às fibras. Os mesmos corpos de prova adotados nos ensaios de caracterização mecânica (especificamente compressão e cisalhamento paralelo às fibras) tiveram suas dimensões (radiais, tangenciais e longitudinais) e massas determinadas antes e depois do condicionamento térmico para aferição das variações de teores de umidade, variações de massa, determinação dos volumes e das densidades aparentes (ρ_{apa}) em kg/m³ dos corpos de prova. O teor de umidade das amostras secas no forno foi determinado por medidas de perda de massa, conforme adotado em Collier (1992).

3.2.2.2.1 Corpos de prova para ensaio de compressão paralelo às fibras

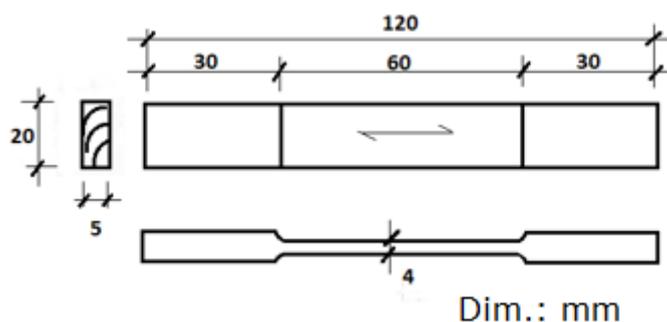
Para agilizar o processo de aquecimento e considerando-se que os corpos de prova aquecidos estariam em contato direto com equipamentos e instrumentos de ensaio (máquinas universais de ensaio, paquímetros, balanças digitais) definiu-se pela utilização de corpos de prova de tamanhos mais reduzidos do que aqueles adotados na NBR 7190 (1997). Definiu-se pela preparação dos corpos de prova de compressão com seção transversal de 30 mm × 30 mm e comprimento de 90 mm na direção das fibras.

A quantidade de corpos de prova foi definida da seguinte maneira: um (01) corpo de prova de cada uma das sete vigas para caracterização à temperatura ambiente (20° C) e dois (02) corpo de prova de cada viga para as temperaturas seguintes: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240° C, para as condições quente e arrefecida. Foram, também, preparados onze (11) corpos de prova para servirem de testemunhas da temperatura no interior dos corpos de prova totalizando-se cento e setenta e dois (172).

3.2.2.2.2 Corpos de prova para ensaio de tração paralelo às fibras

Pelos mesmos motivos esclarecidos para a definição das dimensões dos corpos de prova de compressão, os de tração paralela às fibras foram, também, preparados com dimensões reduzidas. Adotou-se o modelo proposto na NBR 7190 (1997) com dimensões proporcionalmente reduzidas, conforme a Fig. 3.10.

Figura 3.10 – Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras.



A quantidade de corpos de prova foi definida conforme descrito para o ensaio de compressão, totalizando-se cento e setenta e dois (172) corpos de prova.

3.2.2.2.3 Corpos de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Para o ensaio de cisalhamento decidiu-se pela adoção de corpos de prova com dimensões 50 mm × 50 mm × 50 mm conforme a norma BS 373 (1957). Considerou-se o mesmo raciocínio descrito em 3.2.3.3.1 assim como uma maior simplificação na execução dos corpos de prova. A quantidade foi definida da mesma maneira como foi descrito em 3.2.3.3.1 totalizando-se cento e setenta e dois (172) corpos de prova.

3.2.2.2.4 Chave de identificação dos corpos de prova

Foi adotada a seguinte regra: iniciais da madeira que representa a espécie *Dinizia excelsa Ducke (angelim-vermelho)* sendo AV, seguida do número do corpo de prova representativo de cada viga (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7), da temperatura (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240). Para a condição de ensaio no dia seguinte, acrescentar a letra (a) em minúsculo. Um exemplo de identificação para temperatura natural (20 °C), quente à 80°C e dia seguinte à 80°C para corpo de prova da viga 1 será: AV1-20, AV1-80, AV1-80a.

3.2.2.2.5 Instrumentação dos corpos de prova e aquisição de dados

Para a aquisição de dados de temperatura, o corpo de prova denominado testemunha foi instrumentado com um termopar tipo T. Também foi colocado um termopar de mesma categoria para monitorar a temperatura no interior das câmaras de aquecimento, simultaneamente ao controle de temperatura dentro dos corpos de prova. O interior das câmaras térmicas apresentou uma média de aquecimento de 3,54 °C/min, com desvio padrão de 0,97°C/min e um coeficiente de variação de 27,28%. A taxa média de aquecimento das amostras foi 3,87 °C/min.

3.2.2.2.6 Preparação dos corpos de prova para ensaios de caracterização mecânica em altas temperaturas

Os corpos de prova receberam uma camada de fita isolante nas faces transversais às fibras visando isolar e diminuir o acesso de calor pelas extremidades e evitar fendas de topo. Esse material foi indicado por membro do corpo técnico da Analógica Instrumentação e Controle. Antes de receberem os isolamentos nas extremidades, os corpos de prova passaram pela aferição das medidas nas três direções e das massas. Em ensaio de carbonização, Collier (1992) adotou uma fita de alumínio.

Para os ensaios de compressão, tração e cisalhamento, visando o aquecimento em cada uma das temperaturas: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240 °C foram introduzidos nas câmaras de aquecimento (forno mufla ou estufa) 14 corpos de prova, sendo 7 para ensaio à quente e 7 para ensaios no dia seguinte após arrefecimento das temperaturas, e um corpo de prova denominado testemunha. Dentro do corpo de prova testemunha foi inserido um termopar tipo T em um furo aberto com uma broca de 3 mm de forma que o sensor estivesse no centro geométrico dos corpos de prova. Para cada temperatura, quando o termopar do corpo de prova testemunha acusava a temperatura de ensaio, a série “arrefecida” era retirada da câmara de aquecimento e acondicionada em câmara à temperatura ambiente para esfriar e ser ensaiada após 24 horas.

Os corpos de prova para ensaio à quente permaneceram na câmara de aquecimento. Primeiramente, foram ensaiados os corpos de prova acondicionados em temperatura ambiente e, depois, foram ensaiados seguindo a seqüência do aquecimento: de temperatura a 40 °C até 240 °C, alternando os dias de ensaios entre corpos de prova aquecidos e corpos de prova arrefecidos (dia seguinte). Os corpos de prova aquecidos ao saírem da câmara de aquecimento, um de cada vez, tinham as suas massas e dimensões medidas antes de serem levados para rompimento na máquina universal.

3.2.2.2.7 Aquecimento e ensaio de compressão paralela às fibras

Para este ensaio foi preparado um isolamento térmico, com material refratário, com o objetivo de acomodar o corpo de prova assim que saísse da câmara de aquecimento e evitar a perda de calor durante o ensaio.

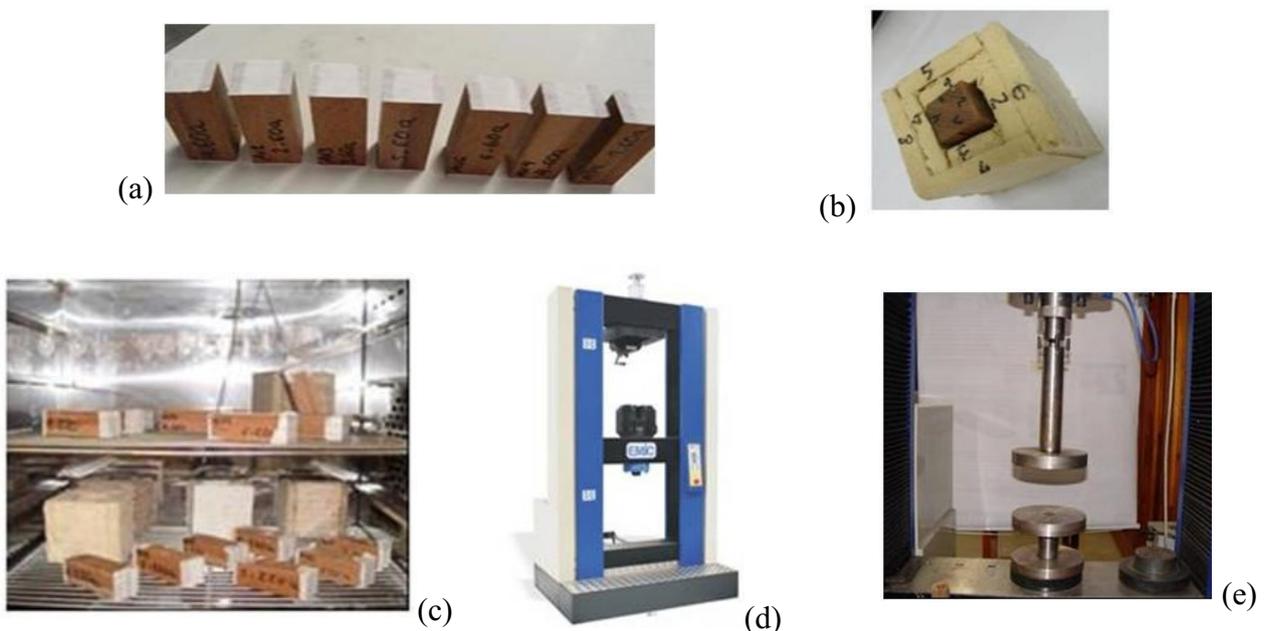
Para a determinação do módulo de elasticidade optou-se pela não utilização dos transdutores de deslocamento externos. Considerou-se que, na situação com corpos de prova aquecidos, o calor poderia afetar a integridade desses instrumentos sensíveis e na

condição de ensaio no dia seguinte, os corpos de prova estariam mais secos e a ruptura frágil poderia ocorrer muito antes do momento estimado causando algum tipo de acidente.

Portanto, a medida das deformações foi realizada de forma indireta, utilizando o transdutor de medição de deslocamento da máquina (embutido) que controla o deslocamento da viga de sustentação da célula de carga. Foi necessário realizar uma calibração utilizando-se um corpo de prova instrumentado com extensômetros elétricos, conforme descrita no Apêndice C. A taxa de incremento de carga foi de 10 MPa/min conforme procedimentos da NBR 7190 (1997). Dados de tensão de ruptura máxima foram registrados para cada corpo de prova.

O registro fotográfico sobre o preparo para o ensaio de compressão encontra-se na Fig. 3.11, na qual tem-se: (a) corpos de prova preparados e identificados; (b) o isolamento térmico; (c) as duas amostras dentro da estufa, juntamente com o corpo de prova testemunha; (d) e (e) máquina universal. DL 30000 e acessórios.

Figura 3.11 – Preparação para o ensaio de compressão paralela às fibras.



3.2.2.2.8 Aquecimento e ensaio de tração paralela às fibras

Apresenta-se nas imagens da Fig.3.12 as duas séries de corpos de prova de tração, sendo em (a) na estufa (a) e em (b) no forno mufla observando-se as camadas de isolamento nas extremidades de cada elemento.

Figura 3.12 – Aquecimento de corpos de prova de tração: (a) na estufa e (b) no mufla.



Ao atingir a temperatura de ensaio, os corpos de prova de tração eram retirados das câmaras de aquecimento e envolvidos, imediatamente, em um tecido refratário para serem encaminhados para rompimento na máquina universal DL 3000 da marca EMIC.

Assim como no ensaio de compressão paralela, a determinação do módulo de elasticidade foi realizada sem a utilização do transdutor de deslocamento externo pelos mesmos motivos mencionados no item 3.2.2.2.7. As medidas das deformações foram realizadas de forma indireta utilizando-se o transdutor de deslocamento da máquina que controla o deslocamento da viga de sustentação da célula de carga. Apresenta-se o procedimento de calibração desta medida no Apêndice D.

A taxa de incremento de carga de 10 MPa/min conforme NBR 7190 (1997) foi dividida por três para que o ensaio tivesse uma duração entre 8 a 10 min e o módulo de elasticidade pudesse ser determinado no segundo ciclo entre 10% e 50%. Dados de tensão de ruptura máxima foram registrados para cada corpo de prova.

3.2.2.2.9 Aquecimento e ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Neste ensaio, as amostras foram aquecidas em forno mufla. As faces transversais às fibras dos corpos de prova foram isoladas do aquecimento direto. Adotou-se a proteção por outra peça de madeira na parte superior e na parte inferior, o material refratário do próprio forno. O corpo de prova testemunha recebeu placas de material refratário coladas nas duas extremidades transversais às fibras.

Adotou-se um carregamento monotônico crescente à uma taxa de 2,5 MPa/min utilizando-se o dispositivo da máquina universal DL30000. Os resultados dos ensaios de resistências mecânicas à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras ($f_{w0,T}$) e os valores de módulos de elasticidade longitudinal ($E_{w0,T}$) nas diferentes condições de temperatura, (T) de 20 a 240 °C, foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, conforme a metodologia da NBR 7190 (1997). O registro fotográfico sobre o preparo para o ensaio de cisalhamento encontra-se na Fig. 3.13, sendo: (a) preparação e identificação das amostras; (b) as duas amostras dentro do mufla, juntamente com o corpo de prova testemunha; (c) e (d) o corpo de prova na máquina universal.

Figura 3.13 – Preparação para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



3.2.2.3 Correção dos valores médios e característicos para a umidade padrão

Os resultados dos ensaios de resistências mecânicas à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras ($f_{w0,T}$) e os valores de módulos de elasticidade longitudinal ($E_{w0,T}$) nas diferentes condições de temperatura, (T) de 20 a 240 °C, foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, conforme a metodologia da NBR 7190 (1997).

3.2.2.4 Determinação das resistências características

Para a determinação da resistência mecânica característica nas temperaturas (T) de 20 a 240 °C, considerou-se a Distribuição t de Student e a Eq. (3.10):

$$f_{w0,Tk} = f_{w0,Tm} - t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.10)$$

sendo: $f_{w0,Tk}$, resistência mecânica característica na temperatura T; $f_{w0,Tm}$, resistência mecânica média da amostra na temperatura T; t, valor tabelado da porcentagem da distribuição t; S, o desvio padrão da amostra.

3.2.2.5 Determinação dos módulos de elasticidade longitudinal característicos

Os valores dos módulos de elasticidade característico ($E_{w0,Tk}$), nas temperaturas (T) de 20 a 240 °C, foram determinados considerando-se a Distribuição t de Student e aplicando a Eq. (3.11):

$$E_{w0,Tk} = E_{w0,Tm} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.11)$$

sendo: $E_{w0,Tk}$, o valor do módulo de elasticidade característico da amostra na temperatura T; $E_{w0,Tm}$, o valor do módulo de elasticidade médio da amostra na temperatura T; t, valor tabelado da porcentagem da distribuição t; S, o desvio padrão da amostra (n).

Os dados de resistência e módulos de elasticidade determinados para a espécie *Dinizia excelsa Ducke*, nas condições natural, à quente a após o arrefecimento, valores médios e característicos, determinados com a aplicação da Distribuição t de Student, encontram-se tabelados no Apêndice E.

3.2.2.6 Determinação dos modelos de fatores de modificação das características mecânicas

Os valores característicos normalizados, representados por $k_{mod,fi}$, são considerados nesta Tese correspondentes aos fatores de modificação da resistência e da rigidez da madeira da espécie angelim-vermelho devido à elevação da temperatura, ou seja, $k_{mod,fi} = k_{w0,T}$.

Os valores característicos das propriedades de resistência mecânica (compressão, tração e cisalhamento) e rigidez (módulos de elasticidade na compressão e na tração) paralelos às fibras foram normalizados em relação aos valores obtidos nos ensaios de corpos de prova sob a condição natural (20 °C). Os fatores de modificação das resistências foram, portanto, calculados utilizando-se a Eq. (3.12).

$$k_{mod,fi}(f_{w0,T}) = k_{w0,T} = \frac{f_{w0,kT}}{f_{w0,k,20^{\circ}C}}, \quad (3.12)$$

sendo $f_{w0,kT}$ correspondente à resistência característica da madeira (na compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras) para cada temperatura (T) em (°C) e $f_{w0,k,20^{\circ}C}$, correspondente à resistência característica da madeira (na compressão, tração e cisalhamento paralela) em temperatura natural (20 °C).

Enquanto os fatores de modificação dos módulos de elasticidade em função da elevação da temperatura ($k_{w0,T}$) foram calculados utilizando-se a Eq. (3.13):

$$k_{mod,fi}(E_{w0,T}) = k_{w0,T} = \frac{E_{w0,kT}}{E_{w0,k,20^{\circ}C}}, \quad (3.13)$$

sendo, $E_{w0,kT}$ correspondente ao módulo de elasticidade característico da madeira (na compressão e tração paralelos às fibras) para cada temperatura (T) em (°C); $E_{w0,k,20}$ correspondente ao módulo de elasticidade característico da madeira (na compressão e tração paralelos às fibras) em temperatura.

Foram realizadas análises de regressão para modelar o relacionamento entre as variáveis respostas e a variável preditora (temperatura, T, em °C) nos fatores de modificação da resistência e da rigidez para a madeira de angelim-vermelho, sob temperaturas no intervalo de 20 °C a 240 °C, nas condições quente (Q) e arrefecida (A). As análises completas, com todas as etapas e estatísticas aplicadas (F e T) encontram-se desenvolvidas no Apêndice F.

3.2.2.7 Análise da estabilidade térmica da espécie *Dinizia excelsa* Ducke

Utilizando-se a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), amostras da madeira da espécie *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) foram submetidas à temperaturas crescentes desde temperatura ambiente até 250 °C. O objetivo foi analisar a estabilidade térmica da madeira e investigar as mudanças de fases e identificar a temperatura de

transição vítrea (T_g). Utilizou-se o equipamento Calorímetro Diferencial Shimadzu – DSC60. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Térmica do Departamento de Química do ICEX da UFMG.

Foram selecionados fragmentos de madeira das sete vigas de angelim-vermelho que passaram pelo moinho de pedra e por duas peneiras com malhas 200 e 270, nesta ordem. Para cada viga foram coletadas cerca de 10 g de fragmentos. A metodologia do ensaio DSC foi aplicada em duas fases de aquecimento, nas quais ocorreu uma programação controlada de temperatura, para cada uma das 7 amostras. Na 1º fase, denominada como Aquecimento A, considerou-se a temperatura (T) desde a temperatura ambiente até a temperatura de 200 °C, adotando-se uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. Na 2º fase, denominada como Aquecimento B, considerou-se a temperatura (T) desde a temperatura ambiente até temperatura de 250 °C, adotando-se uma taxa de aquecimento de 5 °C/min.

A 1º fase, também denominada primeira corrida, disponibiliza informações externas das amostras. Após atingir a temperatura escolhida, o aparelho resfria até um dada temperatura e então realiza-se a 2º fase, também denominada segunda corrida, que disponibiliza as informações internas das amostras, sendo primeiro, informado a T_g . Com estas informações foram realizadas expansões das curvas DSC ao redor da temperatura de transição vítrea (T_g), representadas pelas temperaturas médias (*Mid Point*). A transição vítrea aparece como um degrau na curva base.

Para as sete amostras, o primeiro aquecimento (1ª corrida) apresenta duas regiões de eventos térmicos. A primeira região, de 30 a 80 °C, está caracterizada por um pico endotérmico à 50 °C. A segunda região, de 90 a 209,58 °C é devido à transição vítrea do material sendo observada com mais nitidez após o segundo aquecimento (2ª corrida) que apresentam uma ou duas mudanças de linha base que correspondem à temperaturas de transição vítrea. O segundo aquecimento ampliado, apresenta os dados para as regiões de transição vítrea. Foram elaborados gráficos termogramas de taxa de calor (mW) versus temperatura (°C), obtidos a partir do DSC, para as sete amostras de angelim-vermelho.

3.2.2.8 Espessura da camada de resistência zero

Considerando que o processo de decomposição térmica da madeira tem o primeiro pico próximo a 200 °C e que a partir deste ponto começa uma pronunciada degradação dos constituintes da madeira, fato, também, observado em Oliveira (2003);

considerando que a temperatura de transição vítrea é a temperatura na qual um polímero amorfo começa a amolecer e que esta temperatura de transição vítrea tem repercussões em muitas propriedades, especialmente no módulo de elasticidade (Canevarolo Jr 2006, Antoniow et al 2012);

Considerando-se que o corpo de prova adotado para os ensaios de carbonização apresenta forma e dimensões robustas de 150 × 150 × 150 mm assim como uma seção compatível com um elemento estrutural em dimensões reais e que foi condicionado em temperatura em equilíbrio com o ambiente;

Propõe-se uma metodologia para a determinação da espessura da camada de resistência zero relacionando-se a segunda temperatura de transição vítrea (T_g) à perda de massa devido à degradação dos componentes amorfos (lignina e hemicelulose) e à redução irreversível das características mecânicas da madeira de angelim-vermelho nas condições quente e arrefecida.

Adotou-se um modelo para representar os gradientes de temperatura de carbonização das espécies dos agrupamentos A1 e o modelo específico para a espécie angelim-vermelho (AV) e aplicou-se a logística inversa para a determinação das profundidades de resistência zero, correspondente à segunda temperatura vítrea determinada no ensaio DSC descontando-se a espessura da camada de carvão sob temperatura de 300 °C, conforme a Eq. (3.14).

$$d_0 = d_{T_g} - d_{300} \quad (3.14)$$

4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será sub-dividido em duas partes. O item 4.1 apresenta a caracterização física da amostra constituída das madeiras de treze espécies folhosas e trata dos resultados dos ensaios de carbonização desse material. O item 4.2 trata dos resultados dos ensaios para avaliação da influência da temperatura nas propriedades mecânicas e no módulo de elasticidade de amostras de madeira da espécie *Dinizia excelsa.Ducke*.

4.1 ENSAIOS DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

4.1.1 Caracterização física da amostra

Apresenta-se na Tab. (4.1) os dados de umidade de equilíbrio (U_E , %) e valores médios de massas específicas reportados à umidade de 12%, por ordem crescente. A amostra de 13 espécies apresentou uma média de umidade de equilíbrio de 11,10%, um desvio padrão de 1,39% e um CV de 12,57%. Tais estatísticas atendem à NBR 5628 (1980) que prescreve que, no início do ensaio, a amostra deve apresentar um teor de umidade próximo daquele previsto para as condições normais de uso.

Tabela 4.1 – Caracterização física da amostra ensaiada.

Amostra Sigla/Nome comum/ Espécie	U _E (%)	$d_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	Teste Tukey 95% IC ⁽⁶⁾
Ce-cedro, <i>Cedrela spp.</i>	9,91 ⁽¹⁾ (9,07-11,18) ⁽²⁾ (1,12) ⁽³⁾ (11,26) ⁽⁴⁾ (3) ⁽⁵⁾	609,59 ⁽¹⁾ (601,67 - 614,31) ⁽²⁾ (6,90) ⁽³⁾ (1,13) ⁽⁴⁾ (3) ⁽⁵⁾	G
V-vinhático, <i>Plathymenia foliolosa Benth</i>	11,60 (* (* (1)	638,47 (* (* (1)	FG
Ca-castanheira, <i>Bertholletia excelsa</i>	11,90 (8,69-13,51) (2,19) (18,42) (4)	759,68 (724,56 - 791,53) (27,65) (3,64) (4)	EF
AP-angelim-pedra, <i>Hymenolobium petraeum</i> <i>Ducke</i>	11,44 10,90-11,88 (0,50) (3,69) (3)	804,95 (795,32 - 814,93) (9,81) (1,22) (3)	EF
P-pequi, <i>Caryocar villosum</i>	11,39 10,23-12,51 (1,14) (9,98) (3)	833,47 797,73 - 859,75 (32,08) (3,85) (3)	E
M-muiracatiara, <i>Astronium lecointei Ducke</i>	10,64 8,79-12,35 (1,78) (16,76) (3)	854,04 730,45 - 970,20 (120,05) (14,06) (3)	E
R-roxinho, (b) <i>Peltogyne spp</i>	12,85 12,54-13,12 (0,29) (2,24) (3)	976,81 949,48 - 1017,47 (35,90) (3,68) (3)	D
G-garapeira, <i>Apuleia leiocarpa</i>	13,30 11,95-14,10 (1,18) (8,84) (3)	995,73 986,51 - 1010,90 (13,24) (1,33) (3)	C, D
Ip-ipê, <i>Tabebuia spp.</i>	8,35 6,23-9,86 (1,89) (22,59) (3)	1071,02 1060,57 - 1077,75 (9,17) (0,86) (3)	B,C,D

C-cumarú, <i>Dipteryx odorata</i>	8,92 7,22-10,86 (1,83) (20,55) (3)	1113,63 1089,39 - 1147,60 (30,30) (2,72) (3)	A,B,C
Ma-maçaranduba, <i>Manilkara spp.</i>	10,19 9,64-10,83 (0,60) (5,90) (3)	1142,01 1139,55 - 1145,76 (3,30) (0,29) (3)	A, B
R-roxinho, (a) <i>Peltogyne spp</i>	11,90 11,27-12,91 (0,74) (6,19) (4)	1164,60 1150,07 - 1172,51 (10,18) (0,87) (4)	A, B
AV-angelim-vermelho, <i>Dinizia excelsa Ducke</i>	10,92 10,37-11,48 (0,48) (4,40) (4)	1219,23 1203,17 - 1229,87 (12,34) (1,01) (4)	A
Li-louro-itaúba, <i>Mezilaurus itauba</i>	12,02 10,32-14,82 (2,45) (20,35) (3)	1221,96 1196,15 - 1265,31 (37,77) (3,09) (3)	A

Sendo: ⁽¹⁾ média; ⁽²⁾ intervalo; ⁽³⁾ desvio padrão; ⁽⁴⁾ coeficiente de variação; ⁽⁵⁾ número de dados; ^(*) Não foi medido. ⁽⁶⁾ Médias que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes, pelo Teste de Tukey, com 95% de intervalo de confiança.

Apresenta-se na Tab. (4.2) a caracterização da amostra quanto à presença de obstruções nos vasos, por tiloses (de parede fina comum ou esclerosada) e/ou presença de gomas e de depósitos. A amostra foi classificada em dois grupos: agrupamento 1 (A1), que inclui espécies que apresentam obstruções do tipo gomas e depósitos associadas ou não à tiloses; agrupamento 2 (A2), que inclui espécies que apresentam obstruções do tipo tiloses.

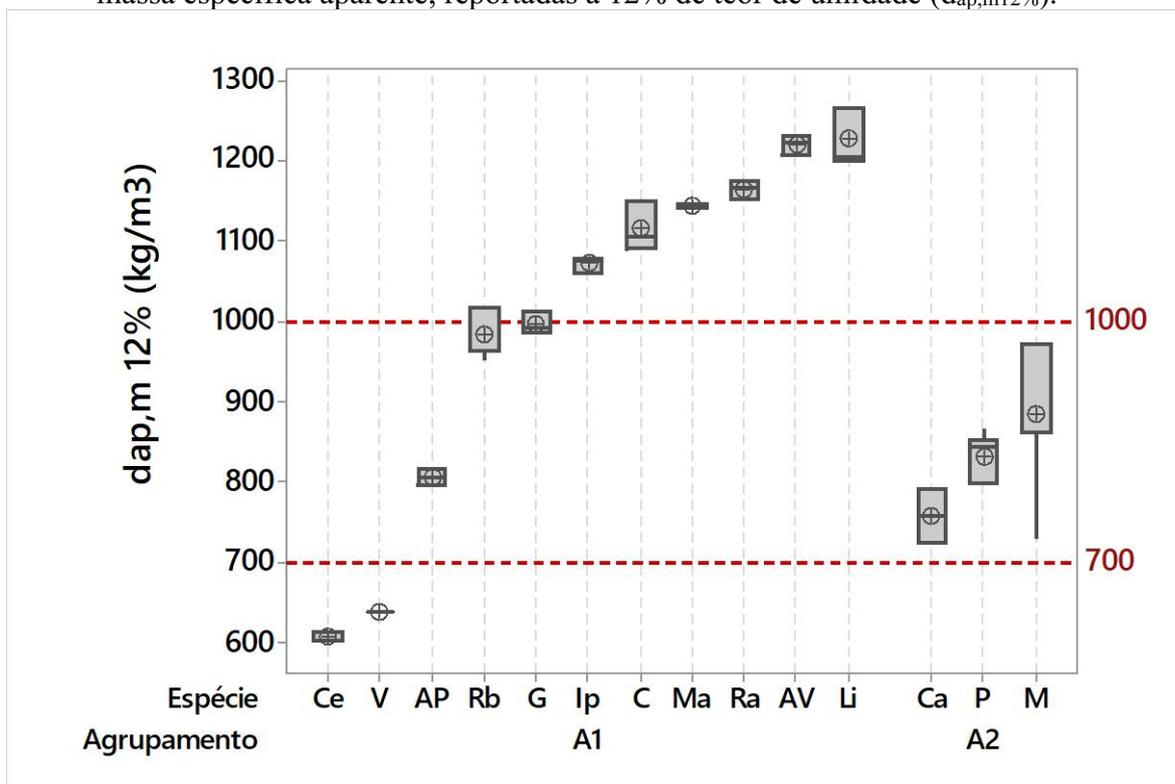
Tabela 4.2 – Classificação da amostra quanto às obstruções nos vasos.

Amostras Sigla/Nome comum/Espécie	Tipo de obstrução nos vasos	A
AP-angelim-pedra, <i>Hymenolobium petraeum</i> <i>Ducke</i>	Gomas e depósitos	A1
AV-angelim-vermelho, <i>Dinizia excelsa</i> <i>Ducke</i>		
C-cumarú, <i>Dipteryx odorata</i>		
Ce-cedro, <i>Cedrela spp.</i>		
G-garapeira, <i>Apuleia leiocarpa</i>		
Ip-ipê, <i>Tabebuia spp.</i>		
R-roxinho, <i>Peltogyne spp</i> (a)		
R-roxinho, <i>Peltogyne spp</i> (b)		
Li-louro-itaúba, <i>Mezilaurus itauba</i>	Gomas e depósitos + Tilose esclerosada	
Ma-maçaranduba, <i>Manilkara spp.</i>		
Ca-castanheira, <i>Bertholletia excelsa</i>	Tilose comum	A2
P-pequi, <i>Caryocar villosum</i>		
M-muiracatiara, <i>Astronium lecointei</i> <i>Ducke</i>		

Sendo: A - Agrupamentos.

A amostra distribuída em dois agrupamentos pode ser visualizada no gráfico da Fig. 4.1 no qual encontra-se relacionada em ordem crescente dos valores médios de densidade aparente reportados a 12%.

Figura 4.1 – Relacionamento entre os agrupamentos A1 e A2 e os valores médios de massa específica aparente, reportadas a 12% de teor de umidade ($d_{ap,m12\%}$).

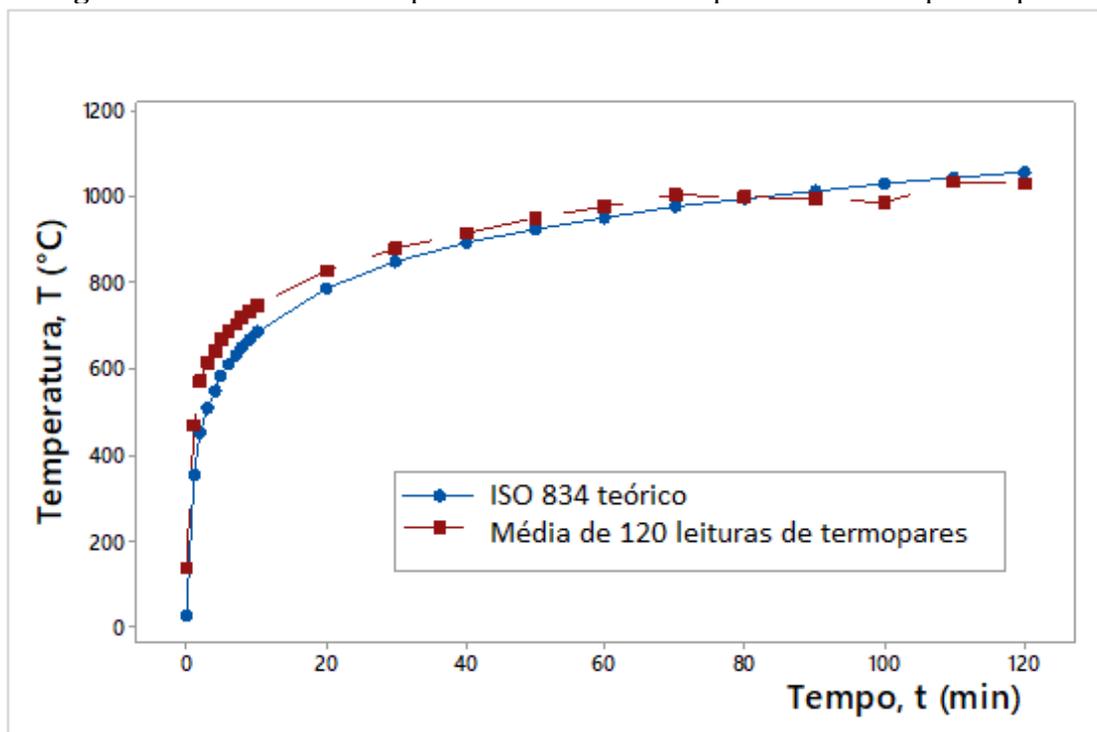


Desta amostra de 13 folhosas, apresentada no gráfico da Fig. 4.1, um percentual de 77% encontra-se no agrupamento A1 que abriga espécies da família das Leguminosae (ou Fabaceae), produtora de grande número de madeiras de Lei, dentre elas: AP (angelim-pedra), AV (angelim-vermelho), C (cumarú), G (garapeira), R (roxinho) e V (vinhático). No agrupamento A1, a massa específica apresentou grande variação, de 608 kg/m³ à 1265 kg/m³ enquanto no agrupamento A2, observou-se uma variação de 724 a 970 kg/m³.

4.1.2 Monitoramento da temperatura nas superfícies dos corpos de prova

A partir de dados fornecidos por 120 termopares posicionados próximos às superfícies dos corpos de prova determinou-se a temperatura média. Verificou-se que o calor efetivo que atingiu as superfícies seguiu com precisão a curva padrão da ISO 834, como pode ser observado no gráfico apresentado na Fig. 4.2.

Figura 4.2 – Análise da temperatura atuando nas superfícies dos corpos de prova.



Observa-se na Fig. 4.2 que a temperatura atuante na superfície seguiu a curva padrão teórica e as tolerâncias admitidas no controle da temperatura do forno foram atendidas. As estatísticas básicas dos dados de temperatura indicam um desvio médio de 27,91 °C, menor do que o admitido de até 100 °C (conforme NBR 5628, 2001), obtendo-se um valor máximo de 60,73 °C e mínimo de 1,40 °C.

4.1.3 Transferência de calor unidimensional

A hipótese de transferência de calor unidimensional foi validada em análise numérica desenvolvida via Método de Elementos Finitos. Os resultados numéricos foram confrontados aos resultados experimentais, captados pelos termopares, acerca da elevação de temperatura no interior da madeira da espécie *Plathymenia foliolosa Benth* - vinhático. Detalhes dessa análise numérica encontram-se registrados no artigo intitulado: *Análise numérica da transferência de calor em madeira brasileira em situação de incêndio*, desenvolvido pela autora e outros pesquisadores. O artigo foi publicado na revista *Cerne* e encontra-se disponibilizado no Apêndice A .

Atestou-se uma correlação positiva entre os resultados experimentais e os resultados numéricos para a distribuição de temperatura no elemento de madeira pela transferência de calor unidimensional. Os resultados obtidos via MEF demonstrou que o arranjo experimental e a preparação do corpo de prova com placas de gesso acartonado e mantas utilizadas para a promoção do isolamento térmico das superfícies não expostas ao incêndio padrão, durante o ensaio, promoveu uma condição de transferência de calor bem próxima do unidimensional. Após o ensaio, o período de resfriamento do corpo de prova e a retirada das placas observou-se o grau de proteção do material isolante, por período de 15 minutos como apresentado nas imagens (a), (b) e (c) da Fig. 4.3.

Figura 4.3 – Resultados do isolamento dos corpos de prova da espécie vinhático.



Observa-se nas imagens da Fig. 4.3 que as placas que isolam o corpo de prova (a) encontram-se bem aderidas às superfícies da madeira; em (b) e (c) após a retirada das placas pode-se visualizar um leve arredondamento nos cantos devido à retração do carvão que possibilita a passagem do calor para as superfícies laterais, superior e inferior; em Fig. 4.3 (c) observa-se as fendas abertas na direção dos raios do lenho. Conforme Schaffer (1966), as fissuras no carvão governam tanto a liberação de voláteis quanto a transferência de calor e, portanto, afetam a taxa de degradação da madeira e a formação do carvão.

A madeira de *vinhático* apresenta baixa densidade aparente a 12%, sendo 638 kg/m^3 e presença de gomas e depósitos nos vasos o que pode explicar o seu comportamento sob exposição ao fogo quanto à retração do carvão. A partir dos 30 min e até 60 min, a retração do carvão foi maior e o avanço do calor nas laterais aumentou como pode-se visualizar nas imagens dos corpos de prova presentes na Fig. 4.4. Após resfriados, os corpos de

prova foram seccados para melhor observação interna do processo de carbonização, em vista lateral (VL), vista superior (VS) e corte longitudinal (CL). Complementando esta análise, apresenta-se o gradiente de temperatura \times tempo, na Fig. 4.4.

Figura 4.4 – Corpos de prova da espécie vinhático após exposição ao fogo padrão por períodos de 15 min (a) e (b); 30 min (c) e (d); 60 min (e) e (f).



(a) VL 15 min.



(b) CL 15 min.



(c) VS 30 min.



(d) CL 30 min.



(e) VS 60 min.

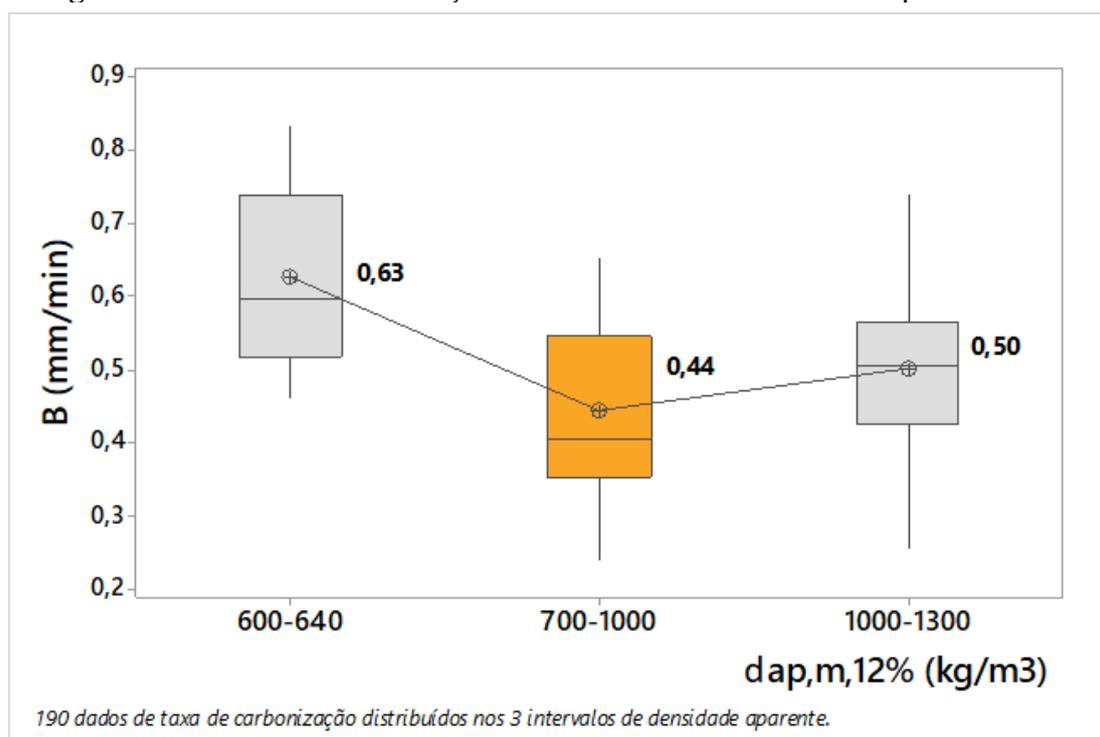


(f) CL 60 min.

4.1.4 Análise dos dados de taxa de carbonização

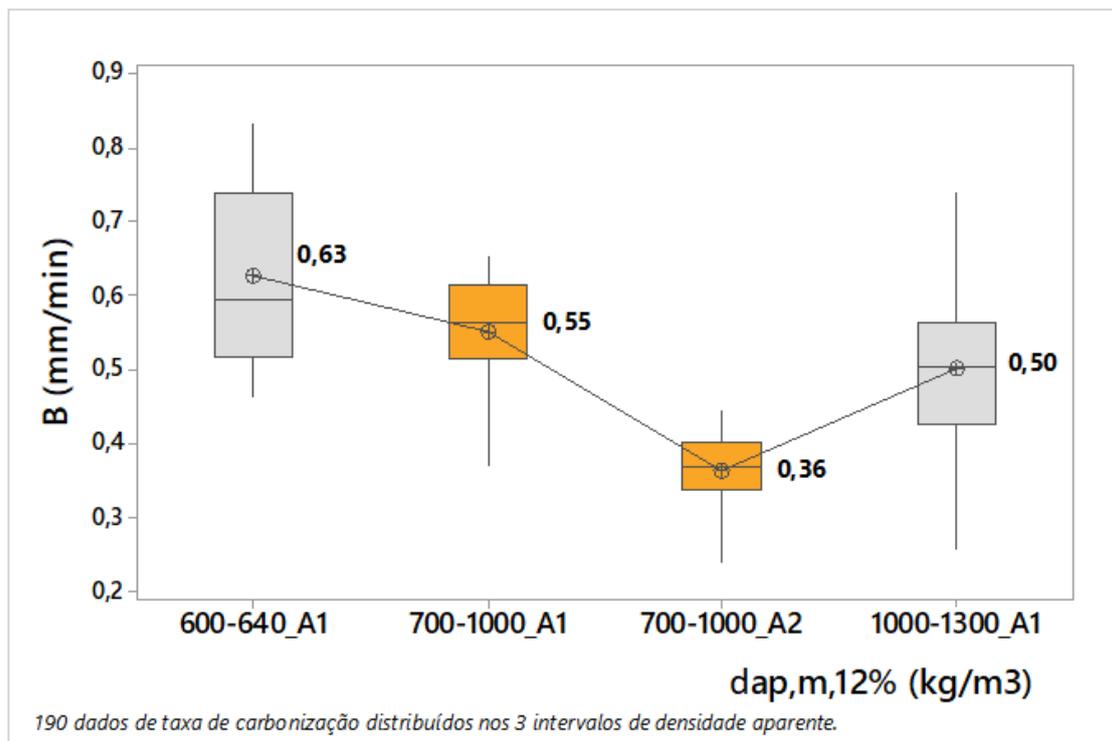
Foram contabilizados 190 conjuntos de dados experimentais para tempo (t) máximo de 120 min. Segundo Teste de Grubbs, uma análise global destes 190 dados de taxa de carbonização identificou uma distribuição normal sem dados discordantes à um nível de significância de 5%, apresentando uma média de 0,49 mm/min, um mínimo de 0,24 mm/min e um máximo de 0,84 mm/min. Esse valor médio vai de encontro às prescrições da EN 1995-1-2 (2004) que prescreve taxa de 0,50 mm/min para espécies folhosas com densidade aparente média $\geq 529 \text{ kg/m}^3$ e a NDS (2018a,b) que prescreve o valor de 0,53 mm/min para todas as madeiras de espécies mais utilizadas. No entanto, traçando-se o gráfico taxa de carbonização em relação aos intervalos de densidade aparente observa-se uma não linearidade, conforme atesta a Fig. 4.5.

Figura 4.5 – Taxa de carbonização *versus* intervalos de densidade para amostras.



Considerando-se que no intervalo de 700 a 1000 kg/m^3 concentram-se espécies tanto do agrupamento A1 quanto do agrupamento A2, apresenta-se novo gráfico separando-se esses dados, conforme a Fig. 4.6.

Figura 4.6 – Taxa de carbonização *versus* intervalos de densidade aparente com destaque para intervalo de 700 -1000 kg/m³.



Verifica-se na Fig. 4.6 que os dados do agrupamento A2 são responsáveis por essa não linearidade. Os intervalos de 600-640 (A1), 700-1000 (A1), 700-1000 (A2) e 1000-1300 (A1) apresentam, respectivamente, um número N de dados iguais à 14, 30, 41 e 105. Os respectivos valores médios de taxa de carbonização, como apresentado na Fig. 4.6, são 0,63; 0,55; 0,36 e 0,50 mm/min.

Observa-se que a amostra do agrupamento A2, cuja característica é a presença de tilose nos vasos, apresenta as menores taxas de carbonização. Para a verificação da igualdade das médias de taxa de carbonização, aplicou-se o Método Games-Howell e um nível de confiança de 95%, via método One-way ANOVA. Adotou-se para os quatro intervalos um número N = 14 itens, um nível de significância $\alpha = 0,05$ e a consideração de variâncias desiguais. As informações levantadas encontram-se na Tab. (4.3).

Tabela 4.3 – Informações sobre as médias nos 4 intervalos de densidade aparente.

Intervalos	N	Média	Desvio padrão	Intervalo de Confiança 95%
600-640 (A1)	14	0,6268	0,1213	(0,5567; 0,6968)
1000-1300 (A1)	14	0,5653	0,1943	(0,4531; 0,6775)
700-1000 (A1)	14	0,5466	0,1003	(0,4887; 0,6045)
700-1000 (A2)	14	0,3497	0,0523	(0,3194; 0,3799)

Os resultados do teste simultâneo Games-Howell para verificação de diferenças de médias emparelhadas, com intervalo de confiança, IC, de 95%, encontram-se nas tabelas (4.4) e (4.5) no gráfico na Fig. 4.7.

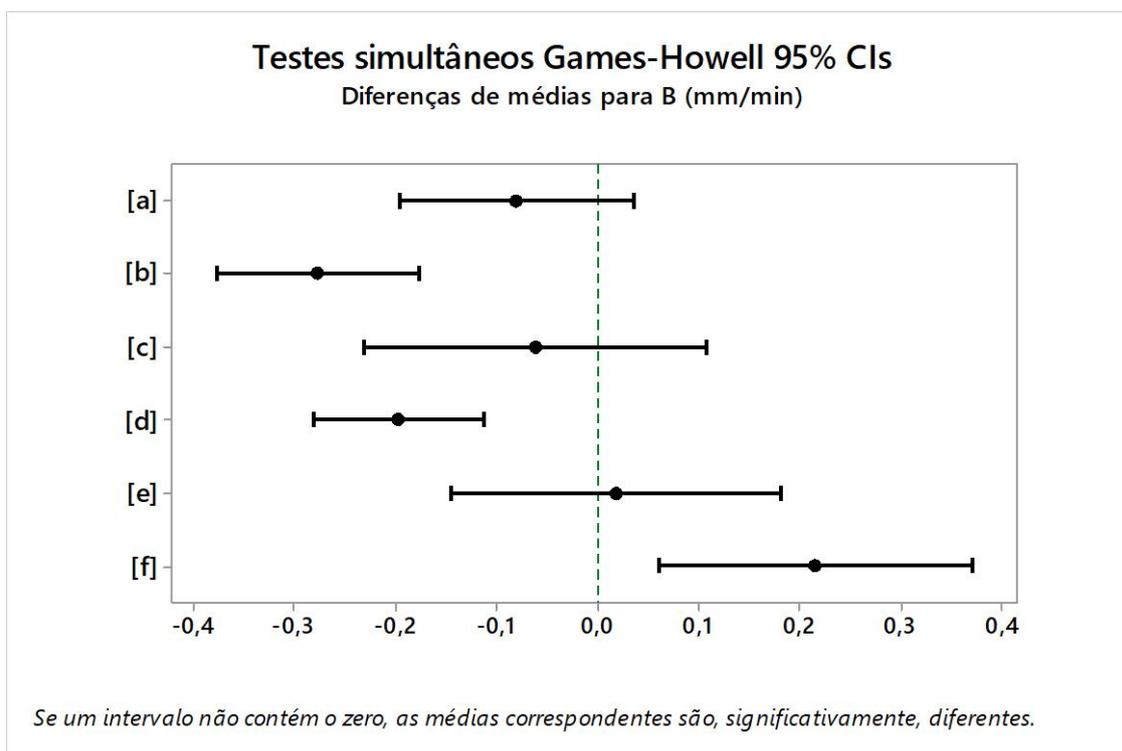
Tabela 4.4 – Diferenças de médias nos 4 intervalos de densidade, teste Games-Howell.

Intervalos	N	Média	Grupo
600-640 (A1)	14	0,6268	A
1000-1300 (A1)	14	0,5653	A
700-1000 (A1)	14	0,5466	A
700-1000 (A2)	14	0,3497	B

Tabela 4.5 – Diferença de níveis e de médias nos 4 intervalos de densidade, teste Games-Howell.

Diferença de níveis	Diferença de Médias	Diferença de Desvio padrão	Intervalo de Confiança 95%	T valor	P valor ajustado
[a] 700-1000 (A1) - 600-640 (A1)	-0,0802	0,0421	(-0,1959; 0,0355)	- 1,91	0,251
[b] 700-1000 (A2) - 600-640 (A1)	-0,2771	0,0353	(-0,3770; - 0,1772)	- 7,85	0,000
[c] 1000-1300 (A1) - 600-640 (A1)	-0,0615	0,0612	(-0,2316; 0,1087)	- 1,00	0,749
[d] 700-1000 (A2) - 700-1000 (A1)	-0,1969	0,0302	(-0,2818; - 0,1120)	- 6,51	0,000
[e] 1000-1300 (A1)-700-1000 (A1)	0,0187	0,0584	(-0,1453; 0,1828)	0,32	0,988
[f] 1000-1300 (A1)- 700-1000 (A2)	0,2156	0,0538	(0,0605; 0,3708)	4,01	0,006

Figura 4.7 - Teste simultâneo Games-Howell para avaliar diferenças de médias.



A análise dos dados das tabelas 4.4 e 4.5 e do gráfico na Fig. 4.7 permite constatar-se que a taxa de carbonização das espécies que participam do agrupamento 2 é significativamente diferente das taxas de carbonização das espécies que participam do agrupamento 1.

4.1.5 Modelos para predição da profundidade de carbonização

Para ambos agrupamentos (A1 e A2) serão apresentados os modelos propostos para a predição da profundidade de carbonização unidimensional da madeira.

Foi aplicada a análise de regressão para investigar e modelar o relacionamento entre a variável resposta (profundidade, P , em mm) e as variáveis preditoras (tempo, t , em min e densidade aparente média reportada a 12% de teor de umidade, d_{ap} , em kg/m^3). As análises completas, com todas as etapas e estatísticas aplicadas (F e T) encontram-se desenvolvidas no A0 C. Os modelos de regressão obtidos e os respectivos coeficientes de explicação da regressão múltipla (R^2) encontram-se na Tab. (4.6).

Tabela 4.6 – Modelos para predição da profundidade de carbonização unidimensional para Agrupamento 1 (P_{A1}) e Agrupamento 2 (P_{A2}).

Modelos de Regressão	R^2 (%)	Eq.
$P_{A1} = 0,8593 \cdot t - 0,000324 \cdot t \cdot d_{ap}$	97,42	(4.1)
$P_{A2} = 0,39032 \cdot t$	98,91	(4.2)

Na Tab. (4.6) tem-se: P_{A1} = modelo para predição de profundidade de carbonização (mm) para o Agrupamento (1); P_{A2} = modelo para predição de profundidade de carbonização (mm) para o Agrupamento (2); t = tempo de exposição ao fogo, (min); d_{ap} = densidade aparente reportada a 12% de teor de umidade (kg/m^3). Os modelos desenvolvidos não apresentam um intercepto y (o termo constante) garantindo-se que para o tempo inicial, $t = 0$, a profundidade de carbonização, também, seja zero, melhorando o ajuste do modelo e a precisão dos valores preditos. Os valores significativos de R^2 (97,42 e 98,91%) explicam com um nível de confiabilidade de 95% o avanço da profundidade de carbonização para as 13 espécies analisadas nesta tese.

4.1.6 Modelo para predição da taxa de carbonização

Confirmando-se que os modelos para predição da profundidade de carbonização (P_{A1} e P_{A2}) apresentam nível de confiabilidade de 95%, determinou-se a partir da derivação (dP/dt), como previsto na Metodologia, os respectivos modelos para predição da taxa de carbonização (B_{A1} e B_{A2}), conforme a Tab. (4.7).

Tabela 4.7 – Modelos para predição da taxa de carbonização unidimensional.

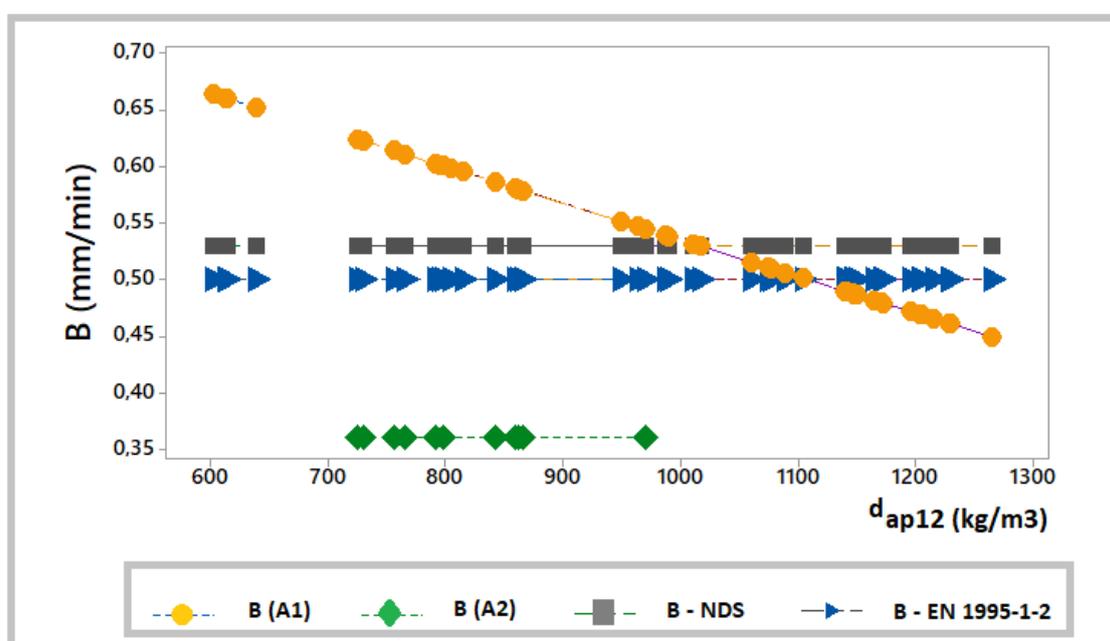
$B_{A1} = \frac{dP}{dt} = 0,8593 - 0,000324 \cdot d_{ap}$	(4.3)
$B_{A2} = \frac{dP}{dt} = 0,39$	(4.4)

Na Tab. (4.7) tem-se: B_{A1} = modelo para predição da taxa de carbonização (mm/min) para o Agrupamento (1); B_{A2} = modelo para predição da taxa de carbonização (mm/min) para o Agrupamento (2); $d_{ap,12}$ = densidade aparente reportada a 12% de teor de umidade, (kg/m^3). Observa-se que o modelo proposto para madeiras do Agrupamento 1 está em função da densidade aparente a 12% de teor de umidade.

A EN 1995-1-2 (2004) prescreve o valor de 0,50 mm/min para madeiras de espécies folhosas europeias, sem proteção, na forma serrada, com densidade aparente média ≥ 529 kg/m³. A NDS (2018a,b) prescreve o valor de 0,53 mm/min para espécies coníferas e folhosas, indistintamente.

Para a verificação dos modelos presentes na Tab. (4.7), apresenta-se no gráfico da Fig. 4.8 os valores propostos de taxa de carbonização unidimensional para as densidades de espécies folhosas analisadas na presente Tese confrontados com os valores prescritos na EN 1995-1-2 e na NDS.

Figura 4.8 – Modelos de taxa de carbonização propostos versus prescrições normativas.



Observa-se na Fig. 4.8 que o modelo proposto nesta Tese para as espécies do agrupamento 1 (B_{A1}) atende de maneira mais abrangente as espécies brasileiras de densidades aparentes variando de 600 a 1300 kg/m³ e diferentes obstruções nos vasos. As taxas de carbonização para as espécies do agrupamento A1 são inversamente proporcionais às densidades. Por outro lado, as normas EN 1995-1-2 (2004) e NDS (2018a) fornecem dados de taxa de carbonização restritos e não fazem distinção entre as densidades das diferentes espécies.

Com relação ao modelo proposto para madeiras do Agrupamento 2, observa-se que o modelo encontra-se representado por uma constante (0,39 mm/min). As madeiras do

Agrupamento 2 ensaiadas nesta tese foram pequi (de 778 kg/m³); castanheira (de 699 kg/m³) e muiracatiara (de 778 kg/m³) com valores médios de taxa de carbonização de 0,36; 0,43 e 0,35 mm/min, respectivamente, apresentando média de 0,38 mm/min verificando-se, portanto, que o modelo proposto atende a estas espécies que apresentam vasos obstruídos por tiloses. Desta forma, demonstra-se que os modelos propostos B_{A1} e B_{A2} apresentam capacidade de predição de valores de taxas de carbonização para madeiras brasileiras.

A adoção da prescrição da norma EN 1995-1-2 (2004) de uma taxa de carbonização unidimensional constante de 0,50 mm/min para todas as espécies folhosas, com densidade média ≥ 529 kg/m³ (à 12% de umidade) na forma serrada, seria conservadora, mas à favor da segurança, para as espécies consideradas do agrupamento 2 (com presença de tiloses nos vasos). Porém, para as espécies do agrupamento 1 (com presença de gomas e outros depósitos nos vasos) poderia ser contrária à segurança.

Hugi et al (2006) e Hugi e Weber (2012) investigaram a substituição de espécies de madeiras com base apenas na densidade de espécies de clima temperado e tropicais (variando de 350 a 1033 kg/m³) e concluíram que 60% das substituições foram consideradas errôneas constatadas após a realização dos ensaios de carbonização. Portanto, a adoção de um critério de seleção de espécies para a fabricação de portas de madeira que considere, além da densidade aparente, também, a presença de obstruções nos vasos por tiloses será favorável à segurança em caso de incêndio.

4.1.7 Validação dos modelos para prescrição das profundidades de carbonização

Este item trata de estudos de casos onde são comparadas as profundidades de carbonização determinadas experimentalmente com valores preditos adotando-se os modelos propostos nesta tese. No Brasil ainda são bastante restritos os trabalhos experimentais envolvendo elementos estruturais em madeira e/ou produtos de madeira engenheirada em situação de incêndio. Portanto, para permitir a realização desta validação dos modelos, foram adotados os resultados de três trabalhos sendo eles: Pinto e Calil Jr (2008), que investigaram a madeira de espécie folhosa nativa, cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) da família Goupiaceae e Pinto (2005) e Martins (2016) que investigaram

madeiras de duas espécies de *Eucalyptus sp*, folhosas de florestas plantadas da família das Myrtaceae. A seguir serão apresentados os três estudos de casos.

4.1.7.1 Estudo de Caso 1

Pinto e Calil Jr (2008) investigaram experimentalmente a madeira de cupiúba (*Goupia glaba Aubl.*) da família Goupiaceae de densidade aparente de 890 kg/m^3 a 34,4% de teor de umidade. A amostra apresentou 13,66% de teor de extrativos. Foram utilizadas peças de seção comercial de $60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 2350 \text{ mm}$ sob ensaio segundo a curva padrão da ISO 834, utilizando-se forno a gás, sem aplicação de esforços. Para tempo, $t = 72,5 \text{ min}$, as previsões de profundidades de carbonização encontram-se na Tab. (4.8).

Tabela 4.8 – Profundidades de carbonização para cupiúba (*Goupia glaba Aubl.*).

Referências	P (mm) para $t = 72,5 \text{ min}$
Dados experimentais médios (Pinto, 2008)	20,00
Aplicando a Eq. (4.1) para P_{A1}	41.39
Aplicando a Eq. (4.2) para P_{A2}	28.30

Ao se analisar os resultados apresentados na Tab. (4.8) verificou-se que o valor experimental (20,00 mm) determinado para a cupiúba foi 0,48 vezes o valor determinado com a equação proposta PA1 (menos da metade) e 0,71 vezes o valor determinado com a equação proposta PA2. Deve-se considerar que a Eq. (4.1) P_{A1} foi obtida em base a corpos de prova cúbicos de 150 mm de lado e em equilíbrio com o ambiente (12% de TU) enquanto o perfil de cupiúba apresentava seção de $60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, associada a elevado teor de umidade (34,4%) fatores que, juntos, poderiam atrasar o processo de combustão.

Em uma circunstância como essa, como identificado em Pinto (2008), o vapor d'água resultante diminui a temperatura na área de combustão, resfriando a madeira que cede energia para a evaporação da água; ocorre redução na quantidade de oxigênio enquanto os espaços vazios são ocupados com vapor d'água, tornando necessário maior quantidade de calor para que ocorra a ignição. Observa-se, em consequência nesse caso experimental, um tempo maior (72,5 min) mas uma camada menor de carbonização (20 mm) contra valores preditos de profundidade iguais a 41,39 e 28,30 mm.

4.1.7.2 Estudo de Caso 2

Pinto (2005) apresenta resultados de ensaio de carbonização em 6 vigas de *Eucalyptus citriodora* e 6 vigas de *Eucalyptus grandis* com dimensões nominais de 160 mm × 260 mm × 2000 mm. As vigas foram expostas ao gradiente de temperatura segundo ASTM E 119 (2000), com exposição nas quatro faces, sem aplicação de esforços. O *Eucalyptus citriodora* apresentou densidade aparente de 1050 kg/m³ com 30,6% de teor de umidade e o *Eucalyptus grandis* apresentou densidade aparente de 830 kg/m³ com 35,7% de teor de umidade. Para tempos, t = 55,56 min e 54,54 min, as previsões de profundidades de carbonização encontram-se na Tab. (4.9).

Tabela 4.9– Profundidades de carbonização para *Eucalyptus*.

Referências	E. citriodora (1050 kg/m ³)	E. grandis (830 kg/m ³)
	t = 55,56 min	t = 54,54 min
	P (mm)	
Dados experimentais médios (Pinto, 2005)	30,00	30,00
Aplicando a Eq. (4.1) para P _{A1}	28,84	32,20
Aplicando a Eq. (4.2) para P _{A2}	21,69	21,29

Ao se analisar os resultados apresentados na Tab. (4.9) verificou-se que os valores experimentais para o *Eucalyptus citriodora* (30,00 mm) e *Eucalyptus grandis* (30,00 mm) foram, respectivamente, 1,04 e 0,93 vezes os valores determinados com a equação proposta PA1 (sendo muito aproximados) e 1,38 e 1,41 vezes os valores determinados com a equação proposta PA2. Deve-se considerar que as espécies de *Eucalyptus* analisadas neste estudo de caso são originadas de regiões de climas temperados (temperatura média anual de 17°C), apresentam tiloses (verificado no Inside wood, 2004) e apresentam, também, altos teores de extrativos (sendo 15,03% para *E. citriodora* e 10,83% para o *E. grandis*) determinados em Pinto (2005). Altos teores de umidade (30,6 e 35,7%, respectivamente) iriam alargar o tempo de carbonização como verificado em Pinto e Calil Jr (2008).

A presença de altos teores de extrativos permite aproximar o comportamento destas duas espécies de *eucalyptus* ao comportamento das espécies do Agrupamento 1, o que poderia justificar a adequação à Eq. (4.1) do modelo PA1 que foi desenvolvida a partir de dados

oriundos de ensaio de madeiras de espécies folhosas tropicais, com teor de umidade em equilíbrio com o ambiente de 12%. Outra ponderação seria considerar que o valor experimental (30 mm) corresponde ao valor médio e a viga estava sujeita ao calor em três faces caracterizando a influência de uma taxa bi-dimensional de carbonização justificando uma profundidade superior aos valores preditos a partir de modelos unidimensionais para prescrição de profundidade de carbonização.

4.1.7.3 Estudo de Caso 3

Martins (2016) realiza ensaios de carbonização de vigas de MLC de *Eucalyptus sp* (Lyptus) de seção transversal 150×420 mm, com lamelas de 30 mm utilizando adesivo estrutural a base de poliuretano monocomponente. O *Eucalyptus* em estudo apresentou densidade aparente de 743 kg/m^3 a 12% de teor de umidade. As vigas foram submetidas a temperaturas segundo a curva padrão ISO 834. Os valores experimentais médios de espessura de carbonização variaram de 19,6 a 24,6 mm, no sentido da largura das vigas, para as amostras L5 e L6. Imagens de seções de *Eucalyptus sp* antes e após períodos de exposição ao fogo de 30 min encontram-se na Fig. 4.9.

Figura 4.9 - Seções de MLC de *Eucalyptus sp* (Lyptus) antes e após exposição.



Pode-se observar, primeiramente, que as dimensões da viga de MLC analisada de seção transversal 150×420 mm encontram-se conforme as propostas de dimensões mínimas para vigas em MLC com 3 faces sob exposição ao fogo por período de 1 hora, em APA (2005). Esta normativa apresenta como sugestões de seções resistentes: 130×310 mm;

170 × 340 mm e 220 × 190 mm. Observa-se na Fig. 4.10 que após 30 min de ensaio as lâminas coladas que formam a seção de MLC apresentam-se arredondadas nas interfaces. Para tempos, $t = 32$ min e $t = 40$ min, as previsões de profundidades de carbonização encontram-se na Tab. (4.10).

Tabela 4.10 – Profundidades de carbonização para *Eucalyptus sp.* (MLC de Lyptus).

Referências	P (mm)			
	t = 32 min		t = 40 min	
Dados experimentais de (Martins, 2016)	22,6	19,6	24,6	23,9
Aplicando a Eq. (4.1) para P_{A1}	19.79		24.74	
Aplicando a Eq. (4.2) para P_{A2}	12.49		15.61	

Analisando-se os resultados obtidos na Tab. (4.10) observa-se que os valores medidos experimentalmente (22,6; 19,6; 24,6 e 23,9 mm) estão mais aproximados aos valores preditos com a adoção da Eq.(4.1) para P_{A1} . Como justificativa pode-se explicar este resultado da seguinte forma: os modelos de predição de profundidade foram desenvolvidos a partir de dados obtidos com exposição ao fogo unidimensional e a viga de Lyptus deste estudo de caso 3, apesar de ser de espécie de madeira com presença de tiloses, foi submetida a fogo em três faces o que potencializa a carbonização; ao ser transformada em madeira engenheirada na forma de MLC poderá, também, sofrer a influência da carbonização na linha de adesão devido à oxidação dos compostos poliméricos do adesivo sob o calor de incêndio.

4.1.8 Profundidades de estabilização da temperatura

Apresenta-se os dados de temperatura versus tempo de carbonização (à 300 °C) durante exposição à curva de incêndio padrão para duas espécies do agrupamento A1 (angelim-vermelho, AV e angelim-pedra, AP) e duas espécies do agrupamento A2 (muiracatiara, M e pequi, P). Apresenta-se os gráficos nas Fig. 4.10 à 4.13 e a indicação das temperaturas nas superfícies (que seguem a curva padrão) e à cinco profundidades dos termopares (F1: 6mm, F2: 12 mm, F3: 25 mm, F4: 38 e F5: 50 mm) e indicação das densidades aparentes a 12% das espécies selecionadas.

Figura 4.10 – Tempo de carbonização para *Dinizia excelsa* Ducke - angelim-vermelho (corpo de prova AV5).

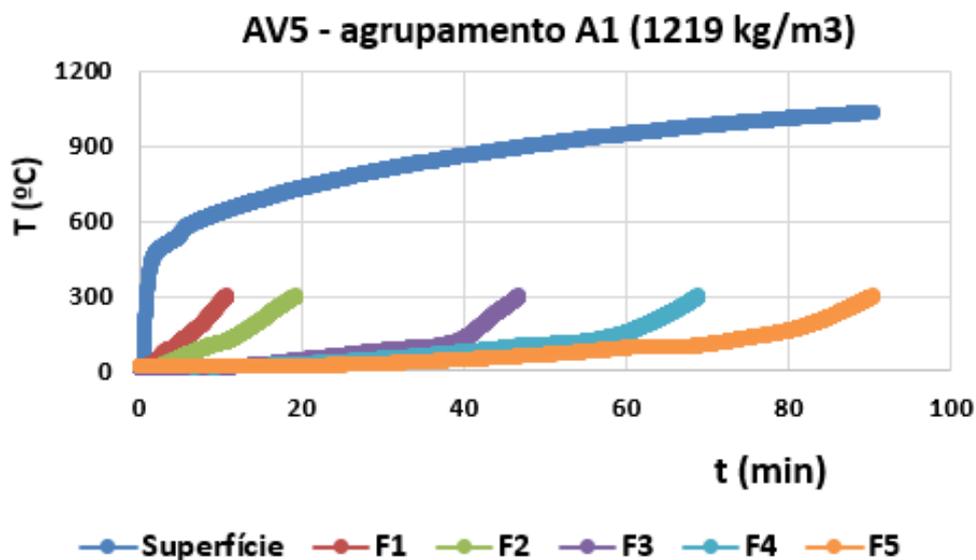


Figura 4.11 – Tempo de carbonização para *Hymenolobium petraeum* Ducke - angelim-pedra (corpo de prova AP1).

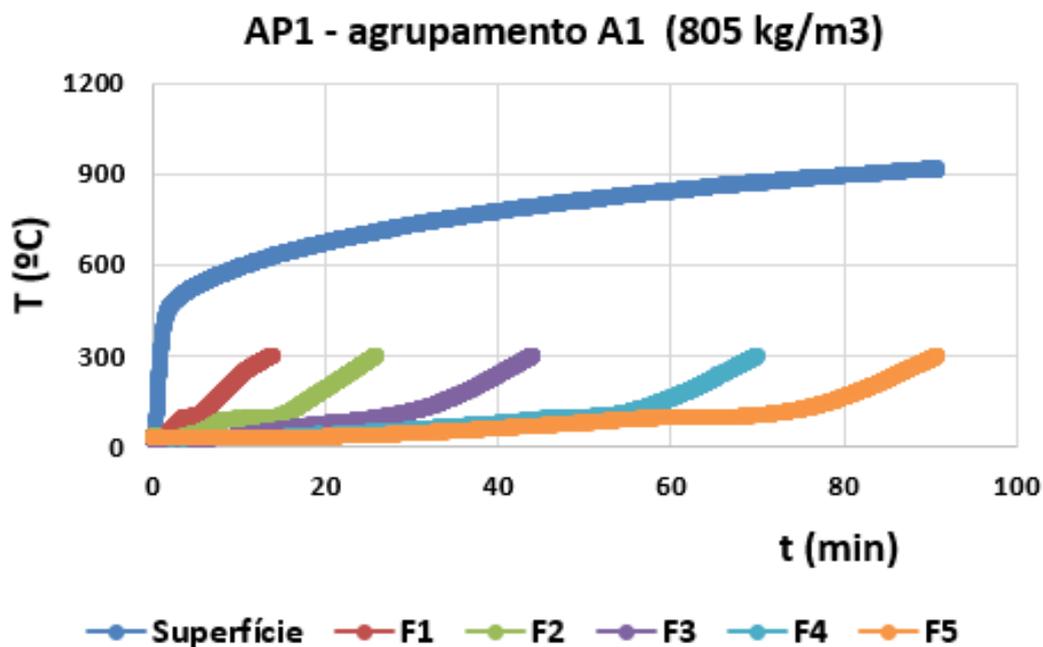


Figura 4.12 – Tempo de carbonização para *Astronium lecointei* - muiracatiara (corpo de prova M2).

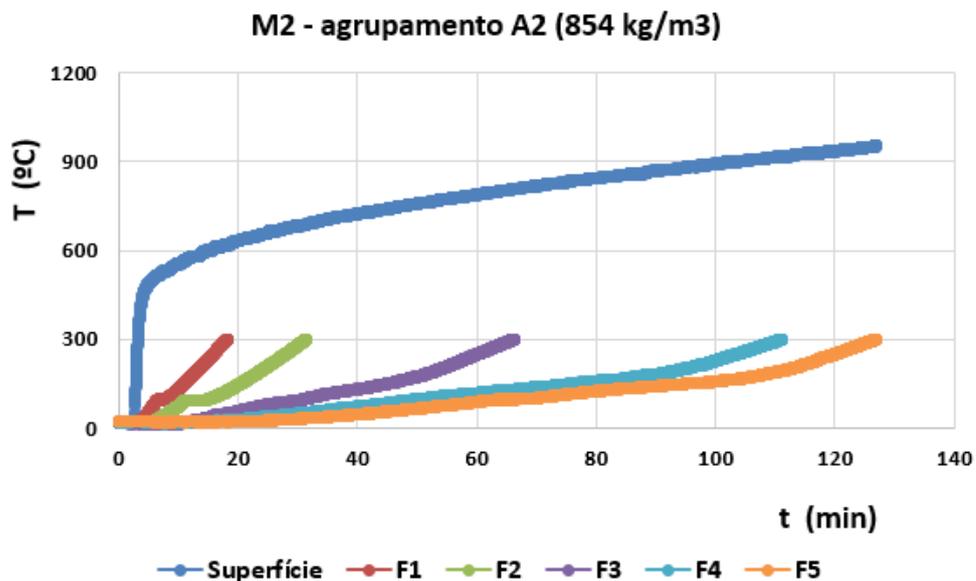
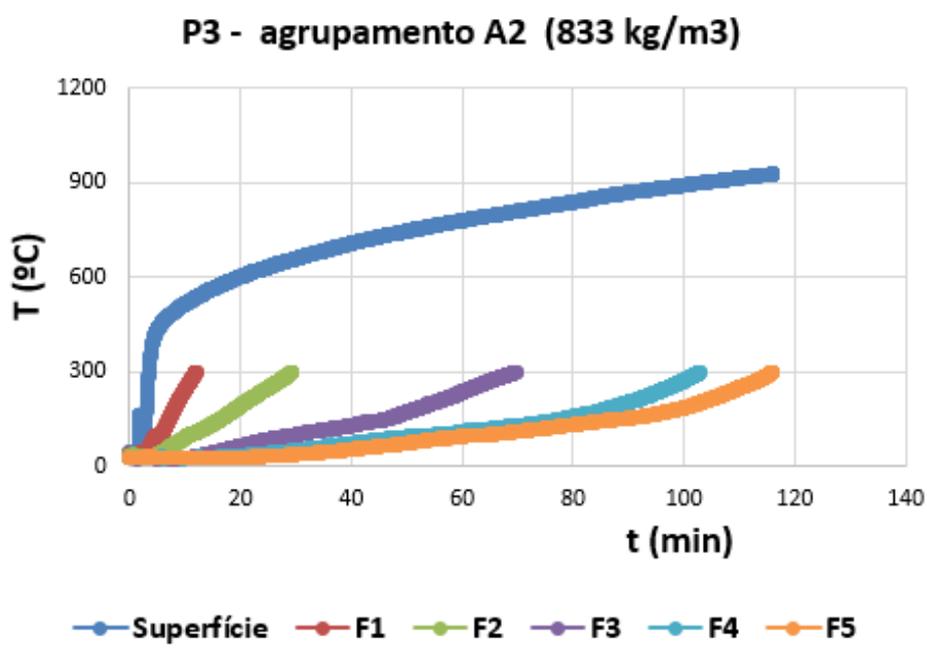


Figura 4.13 – Tempo de carbonização *Caryocar brasiliense* Cambess - para pequi (corpo de prova P3).



Comparando-se os tempos de carbonização (sob temperatura de 300 °C) na profundidade de 50 mm, para os dois agrupamentos, comprova-se que as madeiras do A1 (AV e AP) apresentam tempo menor de carbonização (90 min) enquanto as do A2 apresentam tempo de carbonização em torno de 120 min.

Comparando-se as duas espécies de mesma densidade e agrupamentos diferentes (angelim-pedra e muiracatiara), demonstra-se que a espécie muiracatiara à profundidade de 50 mm carboniza-se acima de 120 min e angelim-pedra, à 90 min. Demonstra-se que as espécies do agrupamento A2 apresentam maior estabilidade térmica.

Também, foram analisados os dados de temperaturas *versus* profundidades determinados para todos os corpos de prova das treze espécies, distribuídos sob Agrupamentos 1 e 2 cujos resultados serão a seguir discutidos.

A função exponencial natural (e^x) adotada para a modelagem de fenômenos naturais e físicos, com o Número de Euler, $e = 2,7183$, ofereceu o melhor ajuste aos dados experimentais. Gráficos de Temperatura \times Profundidade para tempos: t de 20, 30 e 60 min encontram-se nas figuras 4.14 e 4.15, para os Agrupamentos 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.14 – Gradientes de temperatura para tempos de 20, 30 e 60 min relacionados com a profundidade para espécies folhosas do Agrupamento 1.

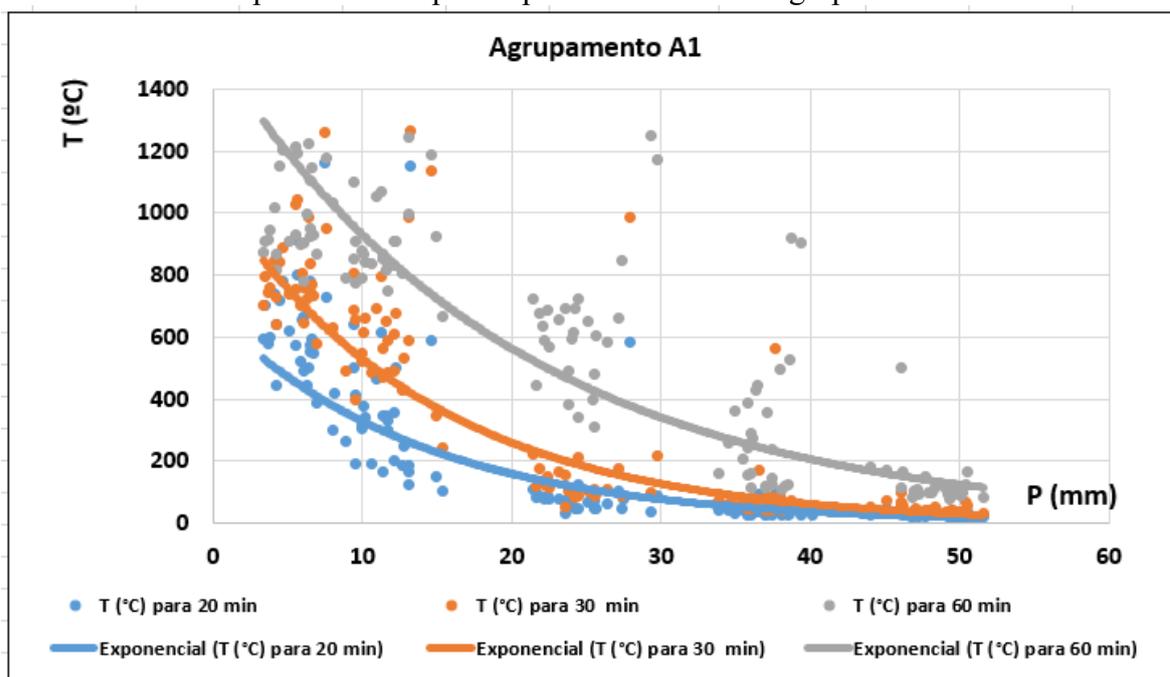
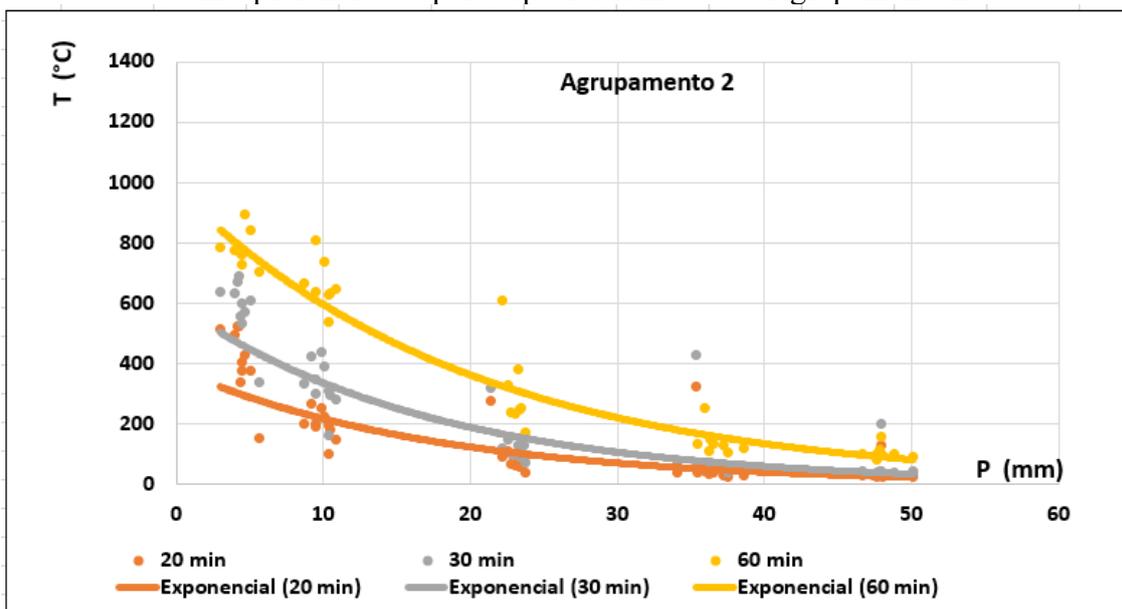


Figura 4.15 – Gradientes de temperatura para tempos de 20, 30 e 60 min relacionados com a profundidade para espécies folhosas do Agrupamento 2.



Observa-se nos gráficos das Figs. 4.14 e 4.15 que desde $P = 0$ mm (superfície) até $P = 20$ mm ocorre uma maior dispersão, especialmente para dados relativos ao Agrupamento 1 que apresenta espécies com presença de gomas e depósitos nos vasos (material sujeito à volatilização e ignição sob altas temperaturas).

Apresenta-se na Tab. (4.11) os modelos de regressão que representam os gradientes de temperatura para ambos agrupamentos para tempos de 20, 30 e 60 min e as respectivas correlações (R^2) que demonstram a significância dos modelos obtidos.

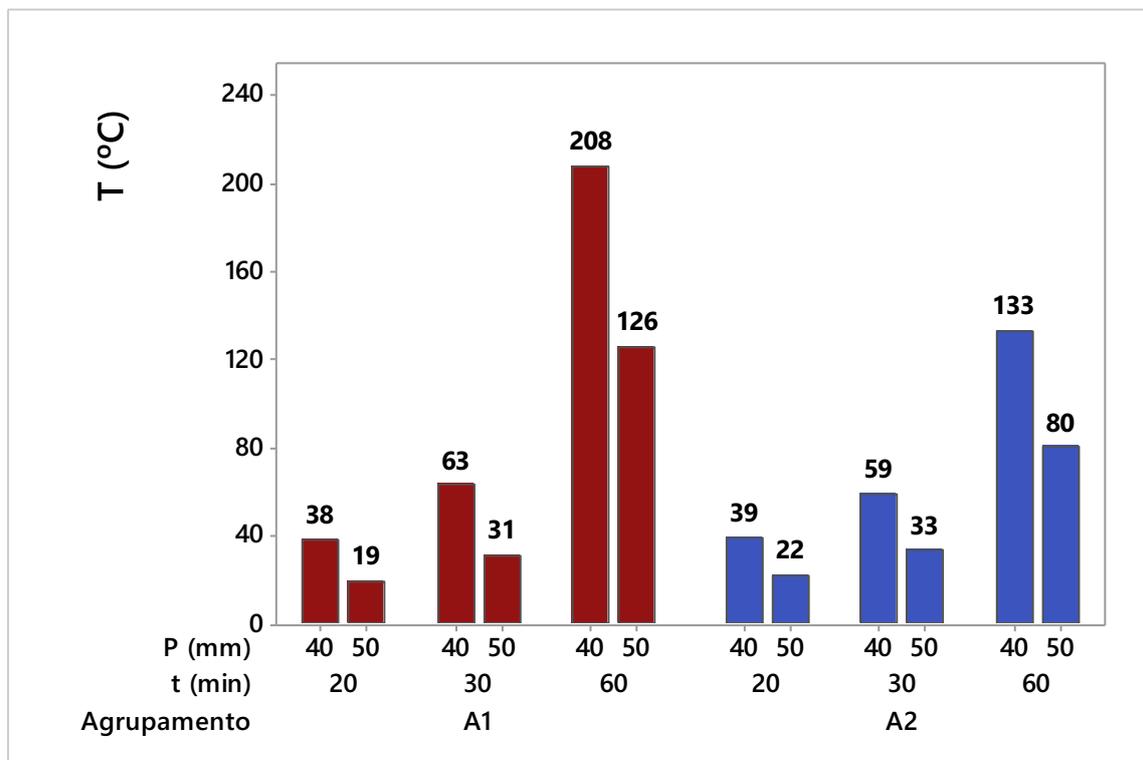
Tabela 4.11 – Modelos para gradientes de temperatura relacionados com a profundidade (P) para espécies folhosas dos Agrupamentos A1 e A2.

Tempo, t (min)	Agrupamento	Modelo	R^2 (%)
20	A1	$T_{20,A1} = 677,85e^{-0,072P}$	83,95
	A2	$T_{20,A2} = 381,6e^{-0,057P}$	77,11
30	A1	$T_{30,A1} = 1079,2e^{-0,071P}$	85,41
	A2	$T_{30,A2} = 597,24e^{-0,058P}$	81,65
60	A1	$T_{60,A1} = 1535,2e^{-0,05P}$	78,42
	A2	$T_{60,A2} = 979,76e^{-0,05P}$	92,20

No entanto, verificou-se nos gráficos das Figs. 4.14 e 4.15 a tendência à estabilização à profundidades de 50 mm para as espécies folhosas neste estudo, foram investigadas, a

partir destas equações, as temperaturas de estabilização para tempos de 20, 30 e 60 min e à 40 e 50 mm, respectivamente, conforme o gráfico na Fig. 4.16.

Figura 4.16 - Estabilização das temperaturas no interior das amostras de folhosas.



Analisando-se os dados no gráfico da Fig. 4.16 pode-se concluir que para as 13 espécies folhosas ensaiadas, considerar a profundidade de 50 mm seria mais adequado. Portanto, para $t = 20$ min, tem-se as temperaturas de 19 e 22 °C, para os agrupamentos A1 e A2, respectivamente. Para $t = 30$ min, tem-se as temperaturas de 31 e 33 °C, respectivamente.

Para tempo de 60 min, à 50 mm de profundidade, as temperaturas previstas estão bastante elevadas, sendo de 126 °C para agrupamento A1 e de 80 °C para o agrupamento A2. Portanto, não observa-se uma estabilização de temperatura no interior dos corpos de prova a 60 min de exposição ao fogo padrão. A explicação para esse fato encontra-se no processo de pirólise das madeiras: com a ação do calor, ocorre a remoção de oxigênio e de hidrogênio do sólido ficando um produto enriquecido de carbono. a camada de carvão aumenta em espessura enquanto haja polímero que ainda não reagiu abaixo dessa camada de carvão. Segundo Oliveira (2003), quanto maior a liberação de gases voláteis tanto maior será a energia liberada.

Visando análises e correlações com a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da espécie *Dinizia excelsa Ducke* – angelim vermelho, apresenta-se na Tab. (4.12) os modelos de regressão que representam os gradientes de temperatura para tempos de 20, 30 e 60 min para essa espécie. Os modelos apresentados na Tab. (4.12) serão adotados para o cálculo da espessura de resistência zero no item 4.2.

Tabela 4.12 – Modelos para gradientes de temperatura relacionados com a profundidade (P) para espécie *Dinizia excelsa Ducke* – angelim vermelho (AV).

Tempo, t (min)	Modelo	R ² (%)
20	$T_{20,AV} = 591,41e^{-0,075P}$	91,32
30	$T_{30,AV} = 911,54e^{-0,074P}$	93,90
60	$T_{60,AV} = 1390,4e^{-0,057P}$	93,59

4.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Este item apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados para a avaliação da influência da temperatura nas propriedades mecânicas da espécie folhosa *Dinizia excelsa Ducke*. São considerados dados de transição vítrea, a variação nos teores médios de umidade e de massa, dados de resistência à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras e módulos de elasticidade na compressão e na tração paralelas.

4.2.1 Estabilidade térmica da espécie *Dinizia excelsa Ducke* - angelim-vermelho

Para as sete amostras, o primeiro aquecimento (1ª corrida) apresenta duas regiões de eventos térmicos. A primeira, de 30 a 80 °C, está caracterizada por um pico endotérmico à 50 °C que pode ser atribuída à liberação de água pela madeira. Conforme Pereira et al (2013), a perda da água de adesão presente na parede celular necessita de energia para ser retirada da madeira. A segunda, de 90 a 209,58 °C é devido à transição vítrea do material sendo observada com mais nitidez após o segundo aquecimento (2ª corrida) onde ocorrem uma ou duas mudanças de linha base. Os termogramas de taxa de calor (mW) versus temperatura (°C), obtidos a partir do DSC, estão em detalhes nas figuras de 4.17 à 4.20.

Figura 4.17 – Termogramas DSC para amostras de angelim-vermelho AV1 e AV2.

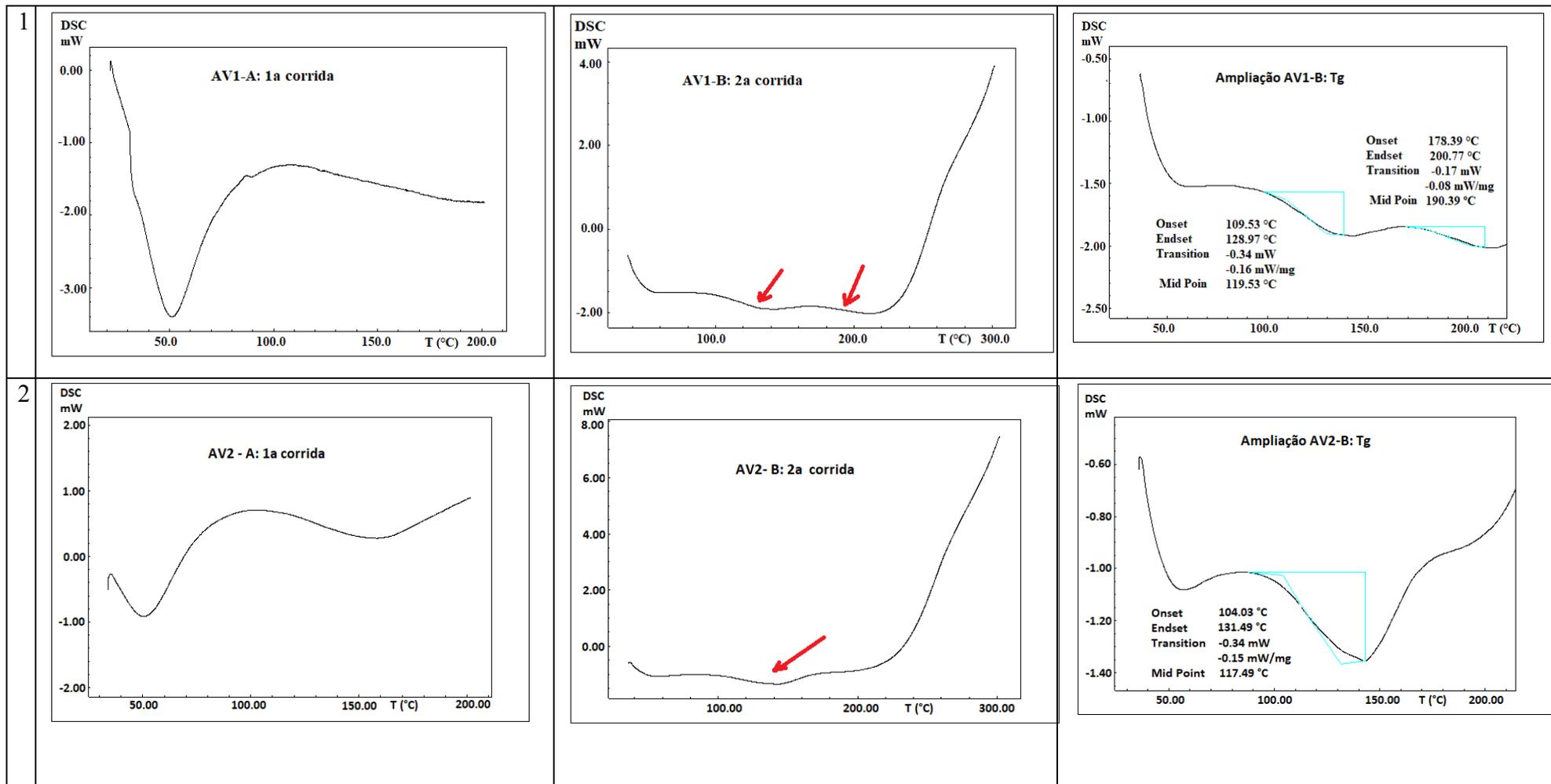


Figura 4.18 - Termogramas DSC para amostras de angelim-vermelho AV3 e AV4.

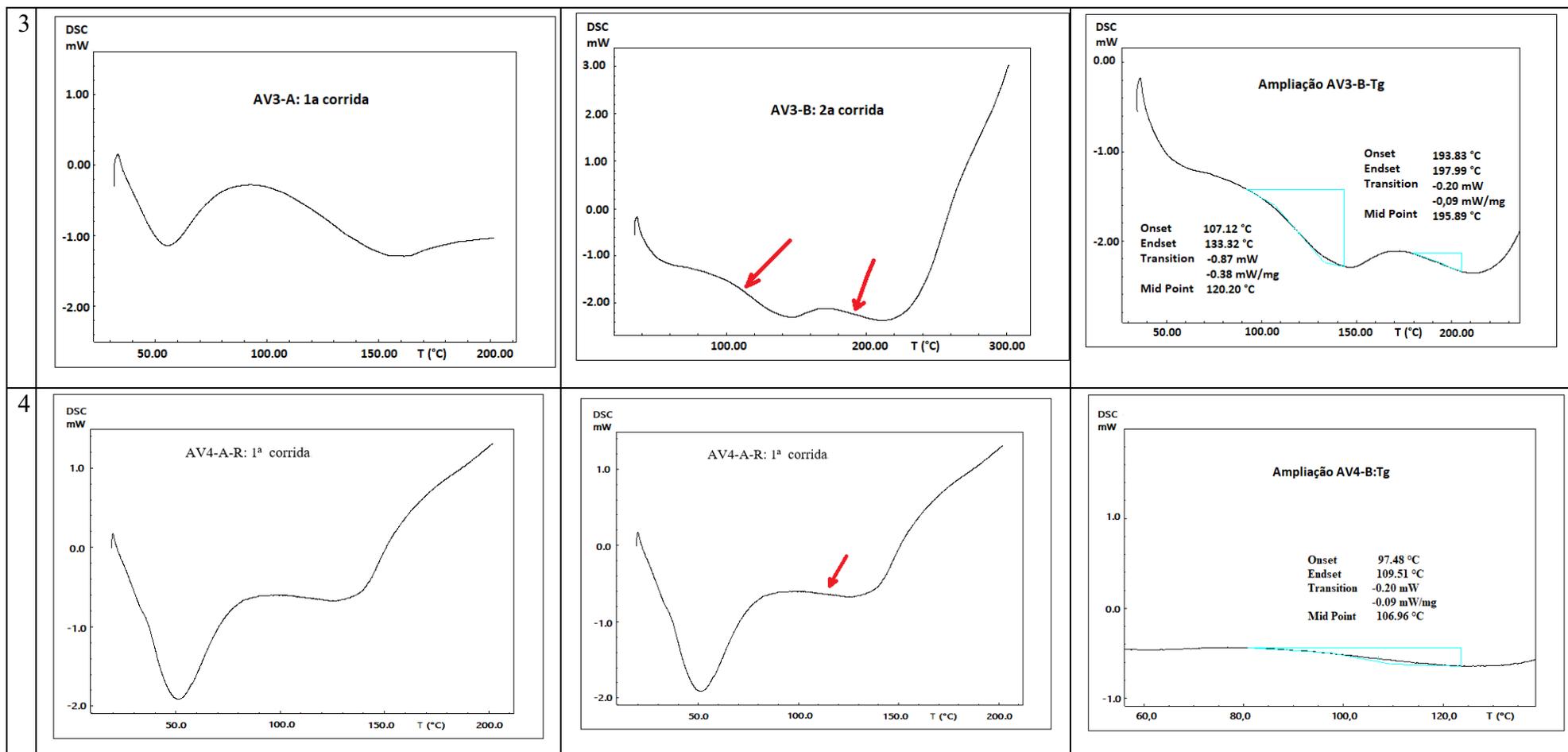


Figura 4.19 - Termogramas DSC para amostras de angelim-vermelho AV5 e AV6.

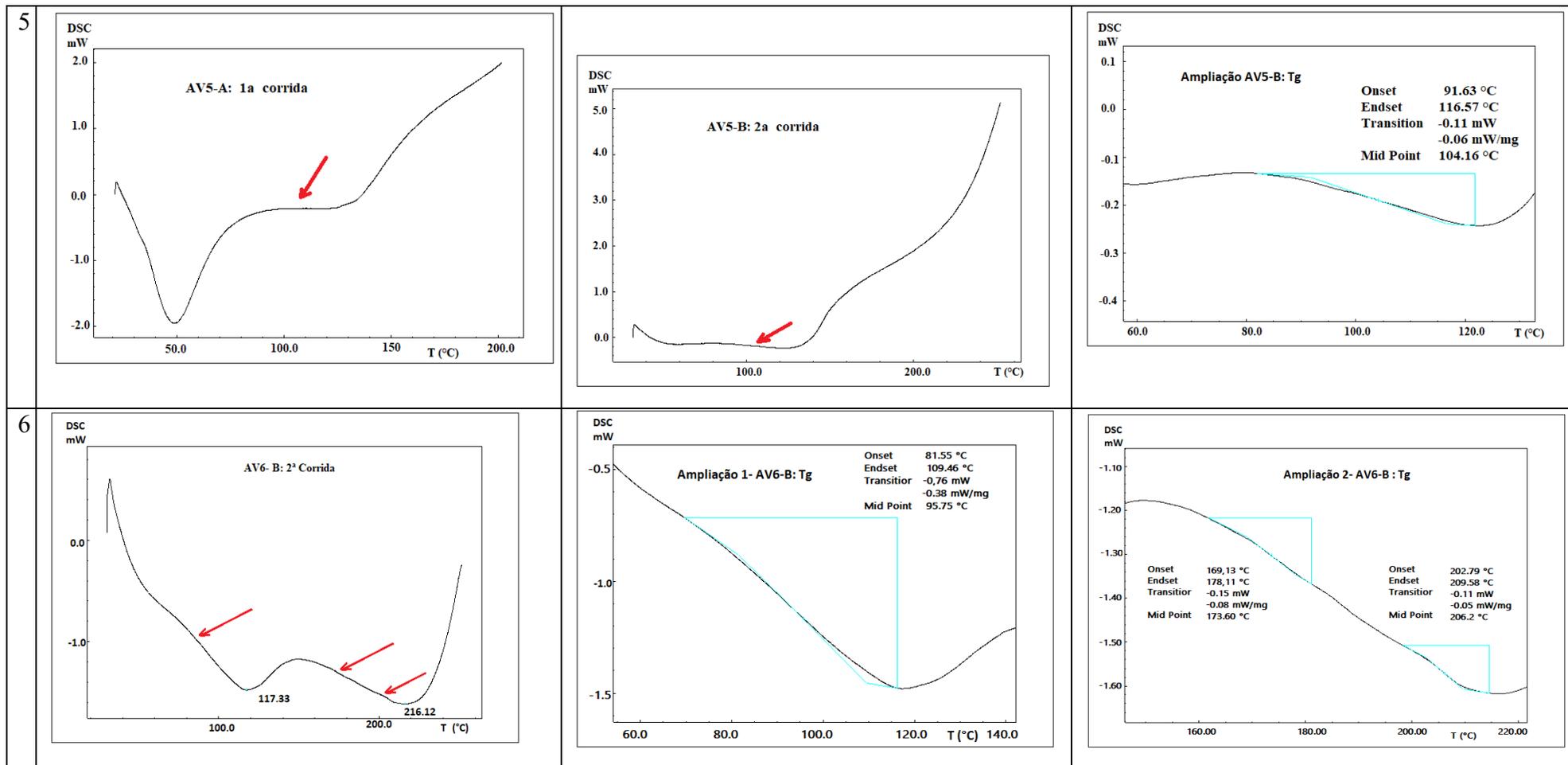
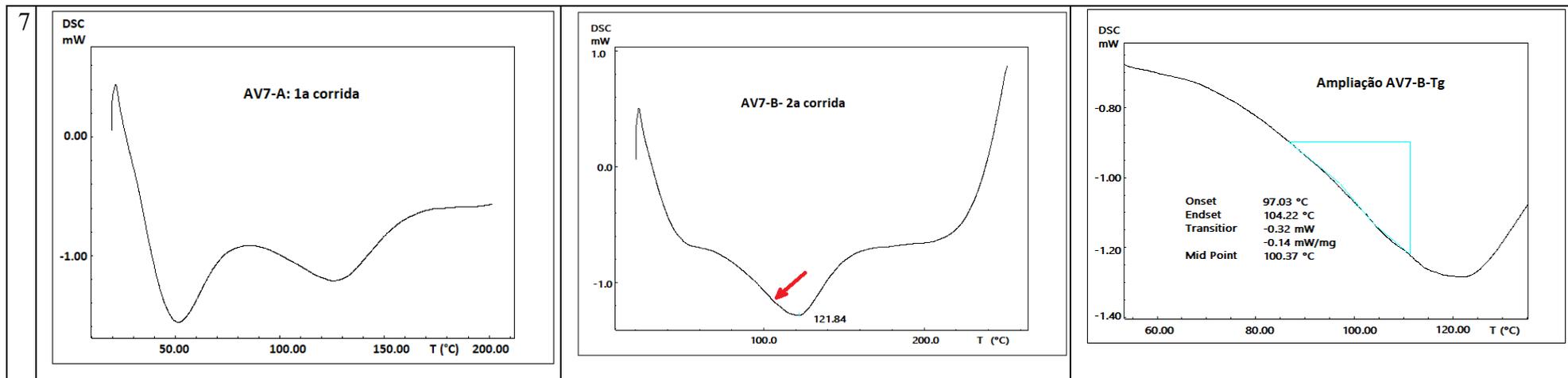
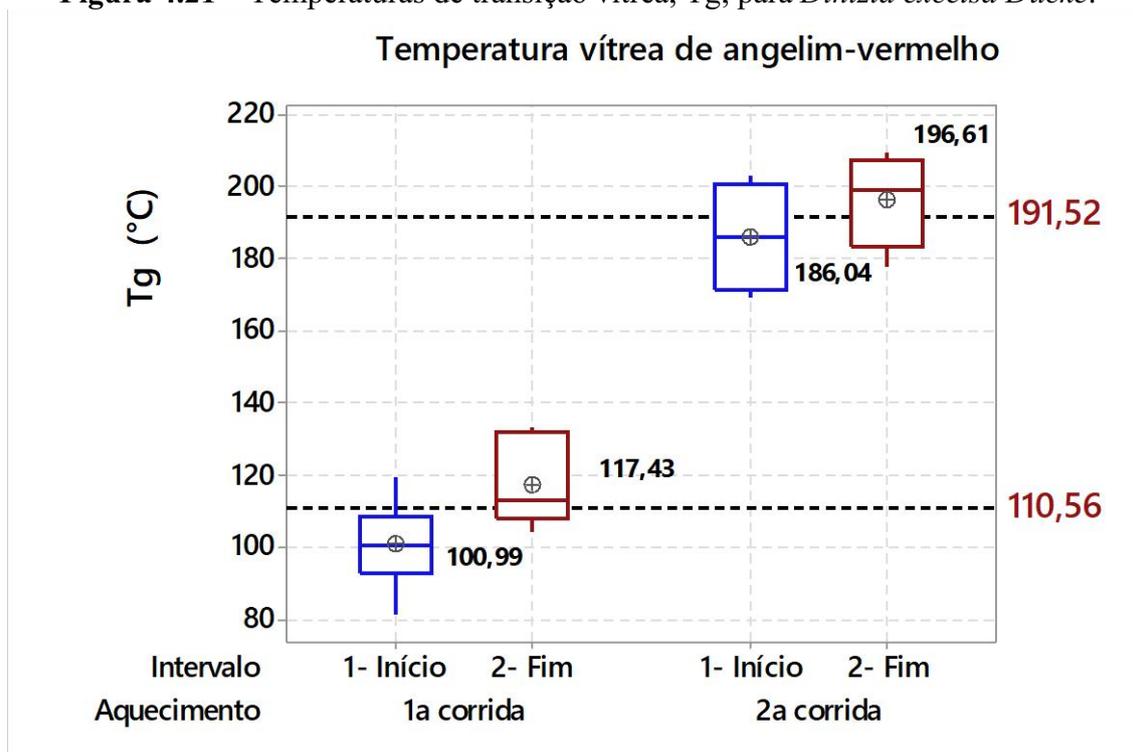


Figura 4.20 - Termogramas DSC para amostras AV7.



A partir das ampliações das curvas DSC foram identificadas as temperaturas de transição vítrea (T_g). O intervalo de temperaturas para a 1ª corrida, correspondendo à primeira T_g variou de 81,55 °C a 133,32 °C e para a segunda T_g variou de 169,13 °C a 209,58 °C. A temperatura média adotada para a primeira T_g é 110,56 °C e para a segunda, é 191,52 °C e encontram-se representadas no gráfico da Fig. 4.21.

Figura 4.21 – Temperaturas de transição vítrea, T_g , para *Dinizia excelsa* Ducke.

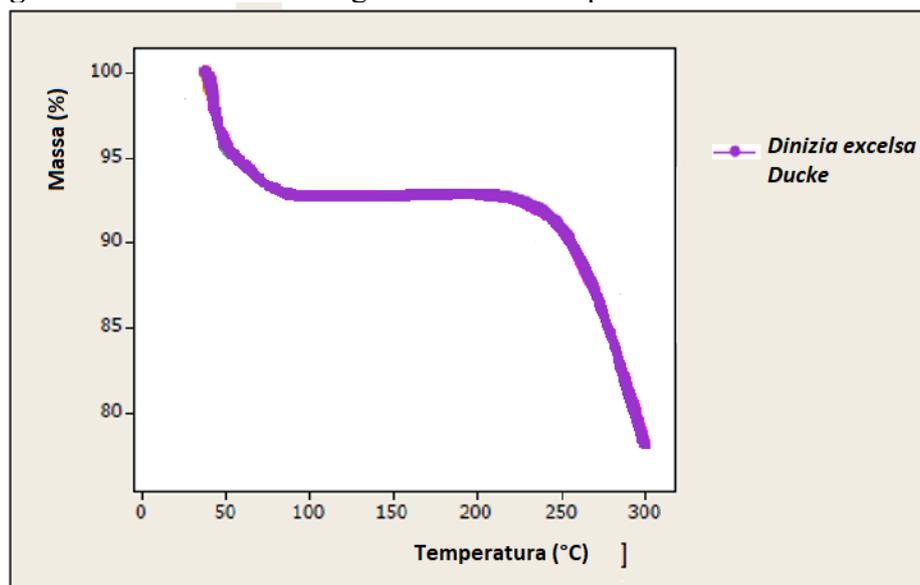


Antoniow et al (2012) mapeando os efeitos da variação de temperatura de 20 a 250 °C demonstram que o perfil da temperatura de transição vítrea corresponde à mobilidade dos polímeros lignocelulósicos que têm um papel na organização das estruturas da parede celular. Segundo Oliveira (2009), a celulose, sendo uma estrutura ordenada e cristalina, é responsável pela estabilidade térmica e a baixa reatividade da madeira. A lignina por sua vez, quando aquecida em temperaturas maiores do que 140 °C e exposta a efeitos de umidade, passa pelo processo de plastificação possibilitando a entrada de moléculas de água que abrem a sua estrutura. Por outro lado, a hemicelulose, pela presença de agrupamentos hidroxilas conectados à sua cadeia principal e devido à sua condição amorfa e de natureza viscoelástica, é mais susceptível às reações químicas de degradação e menos tolerante à ação do calor. Zhan et al. (2015) investigaram as propriedades viscoelásticas da madeira conífera abeto chinês (*Cunninghamia lancaolata*) de 310 kg/m³

identificando a temperatura de transição vítrea da hemicelulose à 50 °C e da lignina, entre 70 e 90 °C. Lenth (1999) identificou para a madeira juvenil e madura das espécies *Liriodendron tulipifera*, *Pinus taeda* e *Populus tremuloides* a temperatura de transição vítrea entre 60 e 200 °C observando que a degradação térmica da madeira à 160 °C com perda de peso era muito mais severa em alta umidade relativa. Oliveira (2003) estudou a carbonização de 3 espécies do semi-árido (*Croton sonderianus*, *Mimosa tenuiflora* e *Aspidospema pyriformium*) de densidade aparente variando de 860 a 1170 kg/m³ além da espécie *Eucalyptus grandis* de 704 kg/m³ e relata que, para as 4 espécies, a degradação térmica tem início a 150 °C e a partir de 200 °C começa uma pronunciada degradação dos constituintes da madeira.

Alves (2017) analisa a curva de (%) de massa de amostra da espécie *Dinizia excelsa* Ducke (angelim-vermelho) em função da temperatura, T (°C) com a representação de três fases. Na fase de secagem da madeira, ocorre uma redução de massa em cerca de 7% com perda da água de adesão presente na parede celular. Na segunda fase ocorre, provavelmente, a degradação de hemiceluloses (material amorfo) e menores proporções de lignina (material amorfo muito diversificado), com início em 180 °C (transição vítrea, T_g) e término em 275 °C. A terceira faixa de degradação iniciou-se nesta última temperatura e a 300 °C a taxa de perda de massa é de 22,5%, conforme a Fig. 4.22.

Figura 4.22 – Análise termogravimétrica da espécie *Dinizia excelsa* Ducke.



Pereira et al. (2013) utilizaram análises TG/DTG para estudo da madeira de seis clones de *Eucalyptus spp* identificando que entre 278 e 280 °C ocorre a degradação de hemiceluloses associadas a menores proporções de celulose e lignina, registrando-se perda de massa média de 17,42%; podendo-se inferir que a maior parte dessa massa perdida seja atribuída à degradação das hemiceluloses.

4.2.2 Caracterização física da espécie *Dinizia excelsa* Ducke - angelim-vermelho

Este item apresenta os resultados acerca do teor de umidade, de massa e a densidade aparente dos corpos de prova nas condições: quente (Q), após submetidos a temperaturas de 40 a 240 °C e após arrefecidos (A), ou seja, resfriados.

4.2.2.1 Variação nos teores médios de umidade e de massa

Apresenta-se a análise da variação nos teores médios de umidade nos corpos de prova de compressão paralela às fibras, fc_0 (Fig. 4.23) e de cisalhamento paralelo às fibras, fv_0 (Fig. 4.24). Pelo Teste Tukey, as médias das duas amostras foram consideradas significativamente iguais, com um nível de confiança de 95% observando-se que as reduções nos teores médios de umidade verificam-se em consonância com as temperaturas de transição vítrea (110,56 °C e 191,52 °C) determinadas para a espécie *Dinizia excelsa*. Os corpos de prova de compressão de dimensões de 30 × 30 × 90 (mm) encontram-se anidros (0% de teor de umidade) à 170 °C enquanto os corpos de prova de cisalhamento de dimensões 50 × 50 × 50 (mm) o teor de umidade a 0% só vai ocorrer à 150 °C. Nos dois gráficos observa-se que abaixo da linha tracejada as médias negativas refletem uma perda de massa. Esta variação negativa corresponde à eliminação de parte da chamada água de constituição ao ocorrer a decomposição dos constituintes celulares acompanhada por uma degradação irreversível dos grupos hidroxílicos da madeira, conforme Brito et al (2006). Segundo Lenth (1999) e Lenth e Kamke (2001), a perda de material da madeira depende da combinação de diferentes fatores, dentre eles, a temperatura, o teor de umidade e o tempo de exposição.

Figura 4.23 – Teores médios de umidade e de massa em corpos de prova de compressão paralela às fibras sob gradientes de 20 a 240 °C.

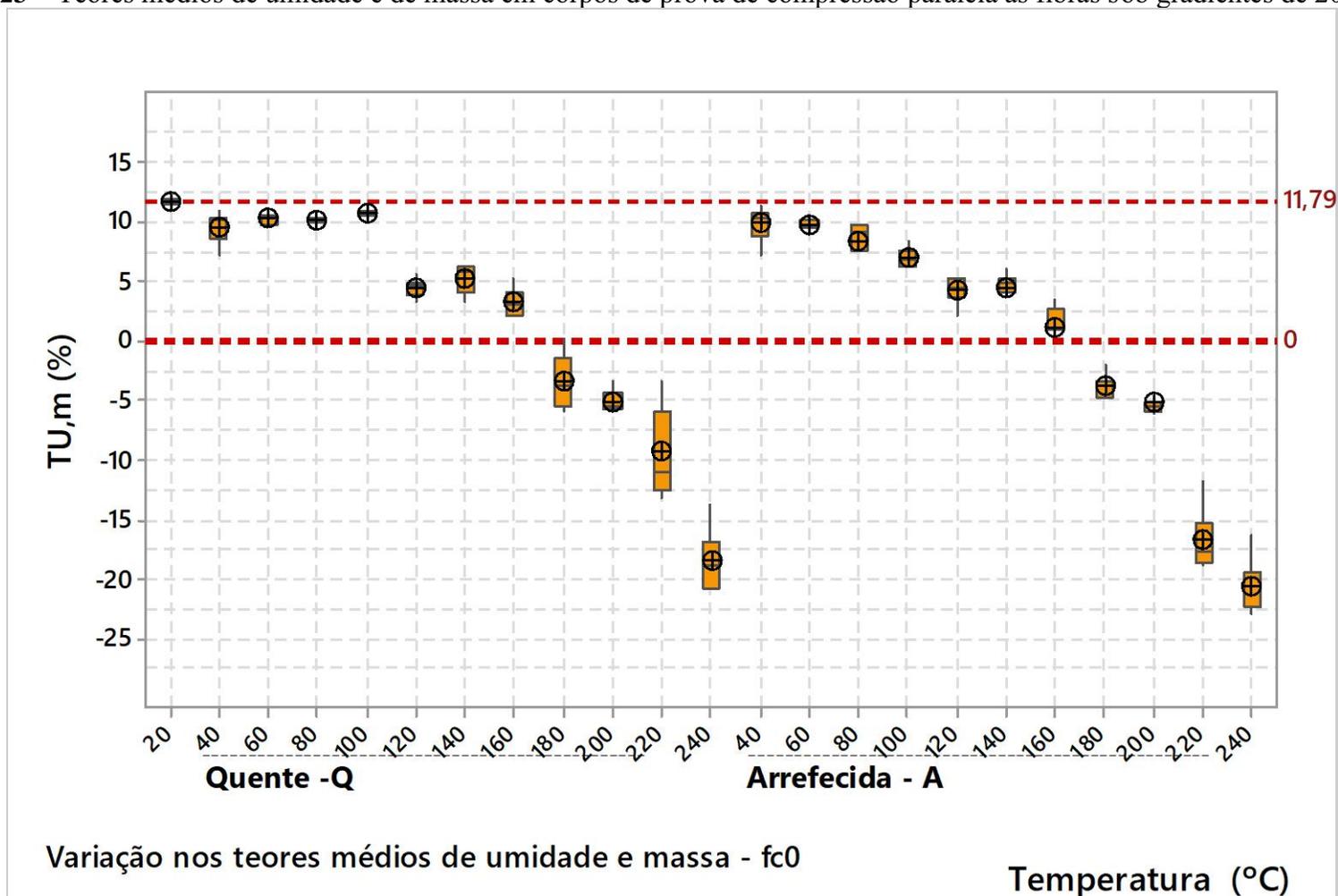
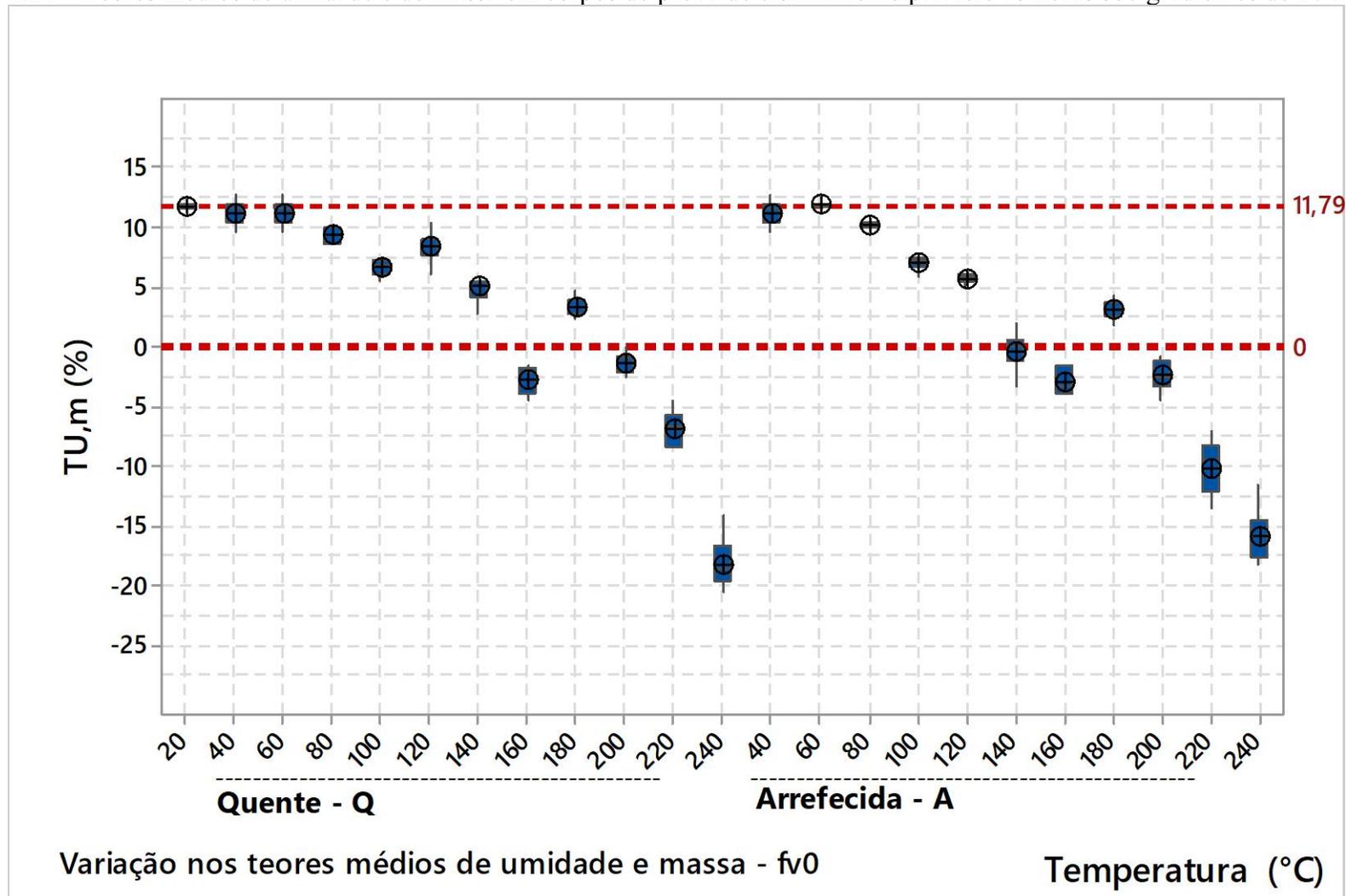
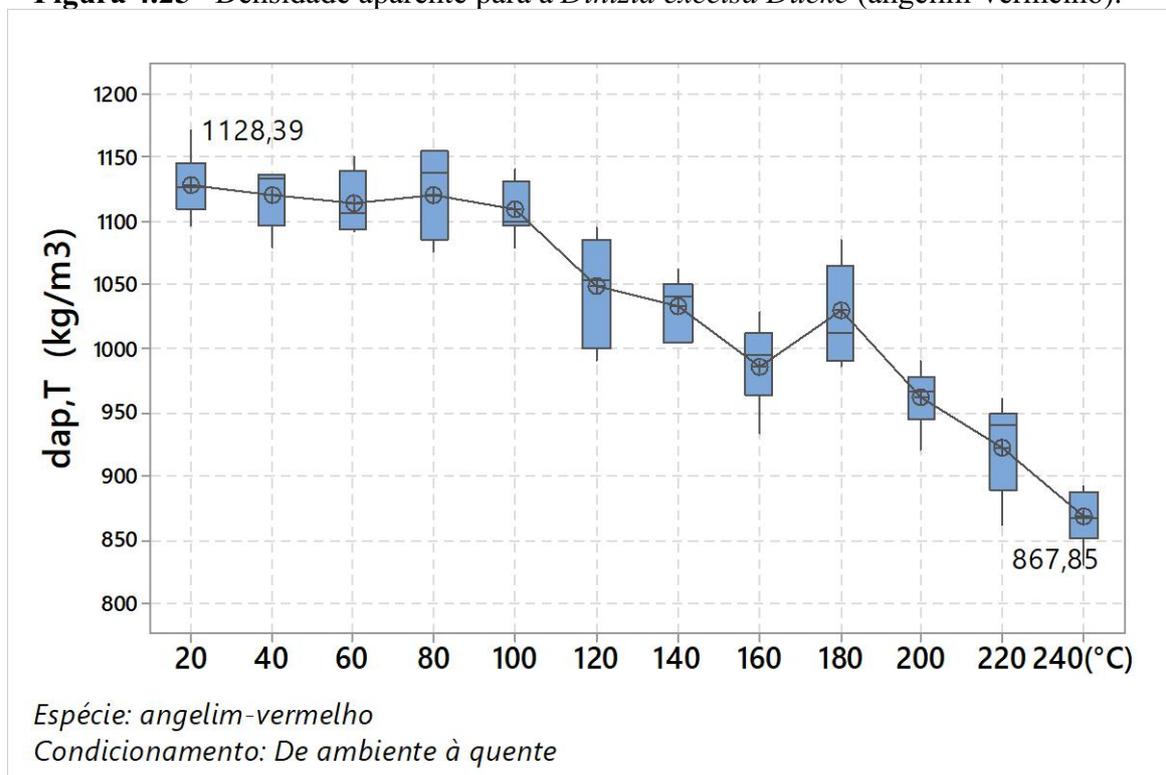


Figura 4.24 – Teores médios de umidade e de massa em corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras sob gradientes de 20 a 240 °C.



A variação da densidade aparente determinada para os corpos de prova da espécie *Dinizia excelsa Ducke* (angelim-vermelho) reflete a redução nos teores médios de umidade e de massa entre 20 e 240 °C conforme se verifica na Fig. 4.25.

Figura 4.25– Densidade aparente para a *Dinizia excelsa Ducke* (angelim-vermelho).



A variação observada na Fig. 4.25, corresponde à uma redução total de 23% distribuída ao longo de todo o aquecimento dos corpos de prova. Observa-se que as temperaturas médias de transição vítrea (T_g) para o angelim-vermelho (110,56 $^{\circ}\text{C}$ e 191,52 $^{\circ}\text{C}$) coincidem com as mudanças verificadas no gráfico.

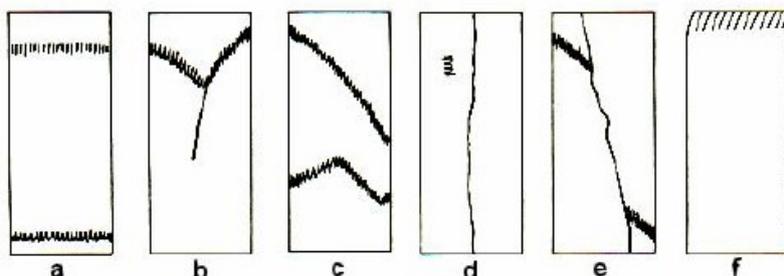
4.2.3 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas e nos módulos de elasticidade da amostra

4.2.3.1 Modos de ruptura

Conforme Figueiredo et al. (2011) o primeiro impacto do aquecimento na estrutura do lenho se verifica pela desestruturação dos raios parenquimáticos, que se aprofundam radialmente na madeira e leve a uma desorganização celular, criando espaços, permitindo

uma maior aeração e ação progressiva do fogo. Foram identificados, com mais frequência, rupturas na compressão paralela às fibras conforme os modos (b), (c) e (e) apresentados na Fig. 4.26, adaptado de ASTM D 143 (2009).

Figura 4.26 – Modos de ruptura na compressão paralela às fibras.



Segundo a ASTM D 143 (2009), os modos de ruptura representam: a) esmagamento horizontal; b) fenda radial ou tangencial; c) cisalhamento transversal; d) rachadura longitudinal; e) esmagamento e cisalhamento paralelo às fibras; f) esmagamento no topo.

Segundo Oliveira (2009), o aquecimento rápido favorece a mudança de fase de extrativos e de água gerando grande pressão nas estruturas internas da madeira: a destruição parcial delas levaria aos reflexos macroscópicos da superfície como as rachaduras, torções e os empenamentos que foram efeitos comuns nos corpos de prova de tração.

Nos ensaios de cisalhamento, os modos de ruptura detectados foram basicamente dois: 1) fracionamento do corpo de prova em duas partes distintas, por ruptura frágil, detectados em 57,14% dos CP em temperatura natural, 18,18% na condição quente e 35,06% na condição arrefecido no dia seguinte; 2) comportamento visco-elástico observado em 42,86% dos corpos de prova em temperatura natural; em 81,82% na condição quente e em 64,94% na condição arrefecido no dia seguinte.

O comportamento visco-elástico pode ter sido potencializado pela condição de grã irregular somando-se a desvios de grã e desvios microfibrilares médios na ordem de 3,89 e 8,36 graus (Alves, 2017), respectivamente, associados à degradação nos três componentes básicos (celulose, hemicelulose e lignina) como mencionado em Kretschmann (2010). Imagem das condições de grã do angelim-vermelho em amostra submetida a temperaturas de 220 °C, conforme a Fig. 4.27.

Figura 4.27 – Desvio da grã na *Dinizia excelsa* Ducke - angelim-vermelho.



4.2.3.2 Caracterização mecânica - valores médios e característicos

Todos os dados de resistência determinados para a espécie *Dinizia excelsa* Ducke, nas condições natural, à quente e após o arrefecimento, valores médios e característicos determinados com a aplicação da Distribuição t de Student, encontram-se no Apêndice E.

4.2.3.2.1 Condição natural

Inicia-se este item com a análise dos resultados na condição natural (20°C). Os valores médios obtidos nesta tese, de resistências paralelas às fibras, reportadas a 12% de teor de umidade são: na compressão (78,13 MPa), no cisalhamento (17,53 MPa) e na tração (63,94 MPa). Para o módulo de elasticidade foi, também maior para a compressão (25259 MPa) e menor para a tração paralela (16384 MPa). Santos e Oliveira (2018) determinaram o valor de 79,07 MPa para a mesma espécie em corpos de prova de 150 × 150 × 150 mm. Alves (2017) para a mesma espécie determinou o valor de MOE na compressão igual a 15027 MPa. Essa diferença pode ser atribuída à grande variabilidade das propriedades da madeira, mesmo determinadas em amostras de uma mesma árvore. Logsdon e Esteves (2008) determinaram para a espécie angelim-vermelho o valor de resistência média ao cisalhamento de 16,12 MPa; Alves (2017) determinou o valor de 19,35 MPa, ambas na mesma ordem de grandeza ao determinado nesta Tese.

A NBR 7190:1997 fornece para a espécie de angelim-vermelho valores médios usuais de resistências paralelas às fibras, reportadas a 12% de teor de umidade, para compressão, tração e cisalhamento, respectivamente: 76,7 MPa; 104,9 MPa e 11,3 MPa e para o módulo de elasticidade, 16694 MPa. Dias (2000) determinou para a espécie de angelim-vermelho valores médios de resistências paralelas às fibras, reportadas a 12% de teor de umidade, compressão, tração e cisalhamento, respectivamente: 77,53 MPa; 104,90 MPa e 18,93 MPa e para o módulo de elasticidade na compressão paralela, 16695 MPa e na tração paralela foi 17024 MPa.

A resistência média à compressão foi maior do que a resistência média à tração cujos dados apresentaram variação com maior amplitude ($CV = 21,12$ MPa) do que à compressão ($CV = 4,52$ MPa). O módulo de elasticidade à tração, também, apresenta maior amplitude ($CV = 50$ MPa) do que à compressão ($CV = 6$ MPa). Os dados de resistência ao cisalhamento apresentaram menores variações, representando uma amostra mais homogênea. Estes resultados podem, provavelmente, ser devido ao formato e dimensão dos corpos de prova de cisalhamento (um elemento de cubo de 50 mm de lado), com maior volume relativo e maior estabilidade.

Por outro lado, as reduzidas dimensões dos corpos de prova de tração aliado ao fato da madeira de angelim-vermelho apresentar fibras reversas e grã variando de direita a irregular, poderia ter causado a grande variação nos resultados de tração. Conforme Alves (2017), análises de amostras da madeira de angelim-vermelho ensaiada nesta tese apresentaram um desvio de grã de $3,89^\circ$ (desvio padrão de $0,80^\circ$) e um desvio microfibrilar de $8,36$ graus. Segundo Yang e Evans (2003), o desvio microfibrilar foi responsável por 87% da variação no MOE, em três espécies de eucalyptus de densidades: 741, 555 e 541 kg/m^3 sendo que a relação entre a razão entre densidade/ângulo microfibrilar e o módulo de elasticidade alcançam um coeficiente de determinação de 92%. Vidaurre *et al* (2017) determinaram para a madeira de *Khaya ivorensis* (mogno africano) de densidade aparente 670 kg/m^3 valor de desvio angular mínimo ($3,56^\circ$), médio ($8,25^\circ$) e máximo ($19,17^\circ$) e afirmam que a inclinação da grã reduz as propriedades mecânicas da madeira.

Conforme Porteous e Kermani (2007), uma grã cruzada pode ocorrer durante o processo de serragem como resultado da conversão de um tronco curvado ou muito afilado ou ser

devido a um tronco com grã espiral ou entrelaçado (caso do angelim-vermelho), de maneira que o desvio da grã pode prejudicar gravemente as propriedades de resistência da madeira.

Quanto às resistências características determinadas nesta Tese, à compressão (75,54 MPa), à tração (52,83 MPa) e ao cisalhamento (16,82 MPa) determinadas com a equação que considera a Distribuição t de Student, ressalta-se que são valores superiores aos valores mínimos das amostras.

Observa-se, também, que a resistência à compressão característica foi superior à resistência à tração característica. Situação semelhante foi identificada no trabalho desenvolvido em Jesus *et al* (2015) para as espécies cambará, guariúba e inharé, da classe de resistência D50.

Quanto ao módulo de elasticidade característico na compressão, observa-se que o valor (24094 MPa) determinado com a equação proposta nesta Tese é superior ao valor mínimo da amostra (22406 MPa). O módulo de elasticidade característico na tração, com valor 10318 MPa, determinado com a equação proposta nesta Tese, é também, superior ao valor mínimo da amostra (8023 MPa).

4.2.3.2.2 Caracterização mecânica sob temperaturas elevadas

Apresenta-se nas Figs. 4.28 e 4.29 os gráficos nas variações nas resistências características à compressão, à tração e ao cisalhamento, nas condições quente (Q) e arrefecido (A).

Figura 4.28 – Influência das temperaturas nas resistências características na *Dinizia excelsa Ducke* - angelim-vermelho na condição quente.

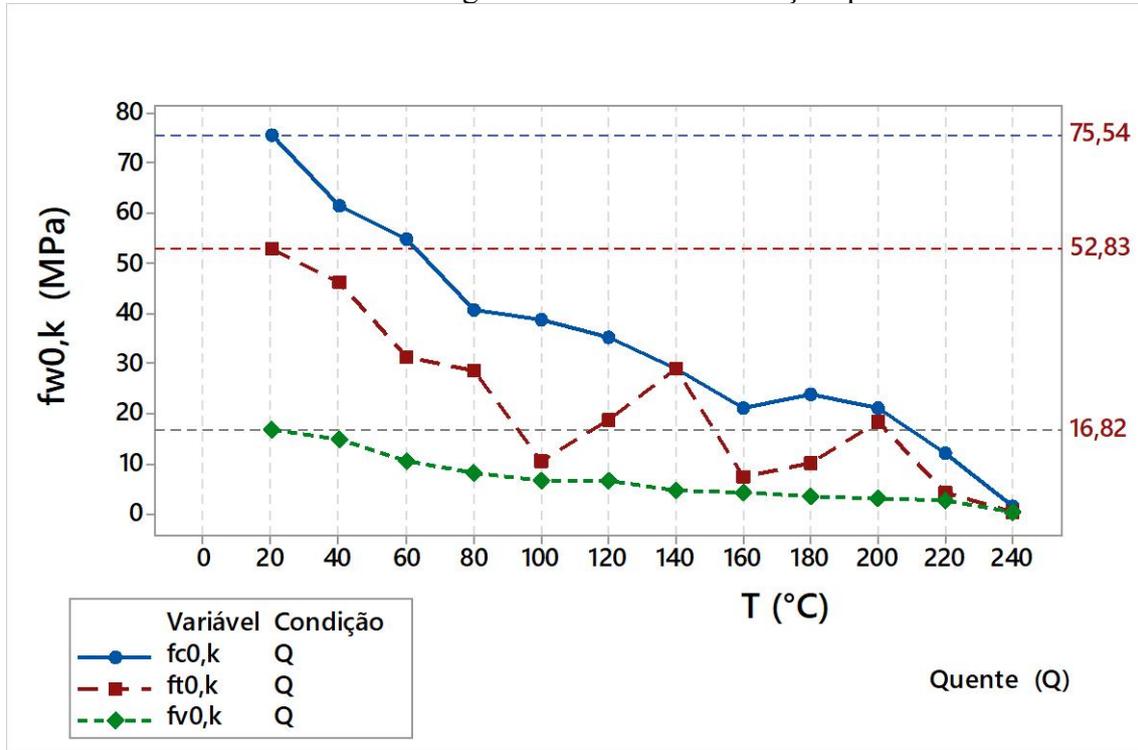
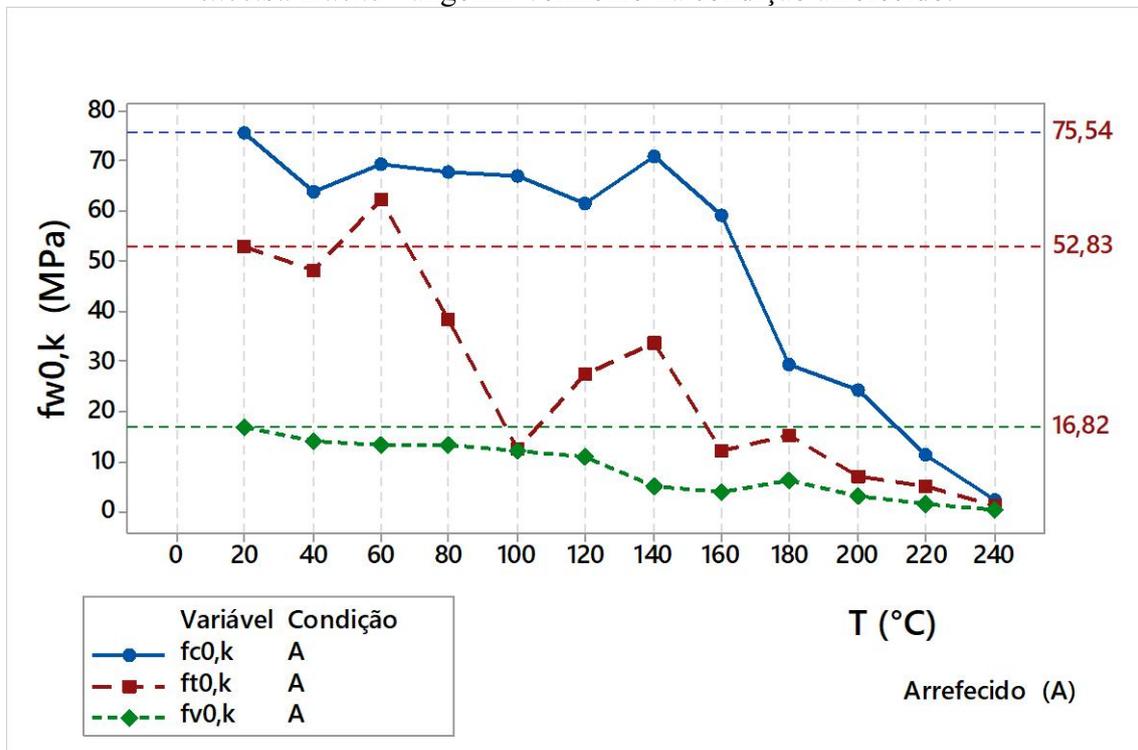


Figura 4.29 – Influência das temperaturas nas resistências características na *Dinizia excelsa Ducke* - angelim-vermelho na condição arrefecido.



Observa-se nos gráficos presentes nas Figs. de 4.28 e 4.29 que as reduções nos teores médios de umidade verificam-se em consonância com as temperaturas médias de transição vítrea (110,56 °C e 191,52 °C) determinadas para a espécie *Dinizia excelsa*. Os corpos de prova de compressão de dimensões de 30 × 30 × 90 mm encontram-se anidros (0% de teor de umidade) à 170 °C enquanto para os corpos de prova de cisalhamento de dimensões 50 × 50 × 50 (mm) ocorre à 150 °C.

A redução da resistência na situação quente é aproximadamente linear na compressão e no cisalhamento, enquanto na tração apresenta-se descontínua e muito irregular. A 240 °C a carbonização reduz a resistência de 97 a 100%. Sob 220 °C a redução é de 84 a 92%. Manriquez determinou a 230°C para as espécies *Schizolobium amazonicum*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, de densidades aparentes 362, 430 e 801 kg/m³, respectivamente, uma redução na compressão variando de 62 a 79% e no cisalhamento, de 68 a 84%. A redução maior ocorreu no *Eucalyptus saligna* provavelmente devido à problemas de retração e fendas internas quando submetido a temperaturas elevadas.

No dia seguinte, com as temperaturas arrefecidas, observa-se uma queda inicial de 15% na resistência a 40 °C e logo em seguida ocorre uma recuperação da resistência mais significativa na compressão até a faixa de 160 °C quando decai abruptamente.

Santos e Oliveira (2018) determinaram redução de resistência à compressão no dia seguinte, sem nenhuma parcela de recuperação, após passar por temperatura máxima de 210 °C para a mesma espécie em corpos de prova de dimensões 150 × 150 × 150 mm. A redução provavelmente motivada pela seção transversal maior do que os corpos de prova ensaiados nesta Tese (30 × 30 × 90 mm) e sem nenhum isolamento das seções transversais que facilitou a perda de massa com a evaporação da água de constituição.

No cisalhamento não ocorre aumentos significativos. À tração, a redução de resistência é bastante irregular. Para as três solicitações observa-se que após 180 °C, a redução na resistência já demonstra ser irreversível coincidindo com a segunda temperatura média de transição vítrea (191,52 °C) determinada para a espécie *Dinizia excelsa*. Os resultados apresentados em Schaffer (1977) e Schaffer (1984) sobre a investigação da madeira de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*, de densidade 450 kg/m³, após resfriada e recondicionada à 12% de teor de umidade. Leal (2010) sobre a avaliação da madeira de

carvalho (*Quercus faginea*, de densidade 600 kg/m^3) proveniente de incêndio, relata o efeito redutor nas propriedades mecânicas relacionando-se ao estado mais rígido e quebradiço do material, devido à perda de polissacarídeos amorfos sob efeito do calor, observando-se reduções, em média, de 40% para a madeira residual remanescente. As variações nos valores característicos dos módulos de elasticidade na compressão e na tração encontram-se nos gráficos nas Figs. 4.30 e 4.31.

Figura 4.30 – Módulos de elasticidade característicos à compressão e à tração na condição quente na madeira da *Dinizia excelsa Ducke* - angelim-vermelho.

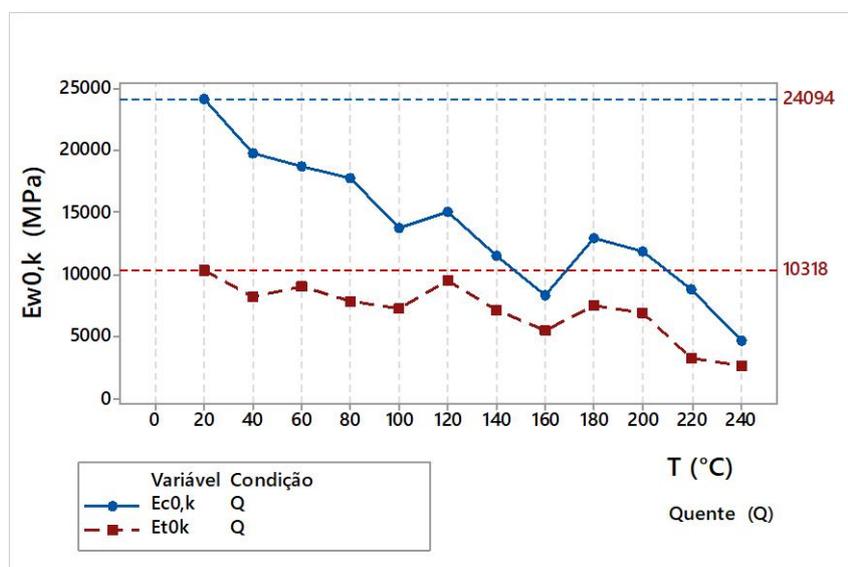
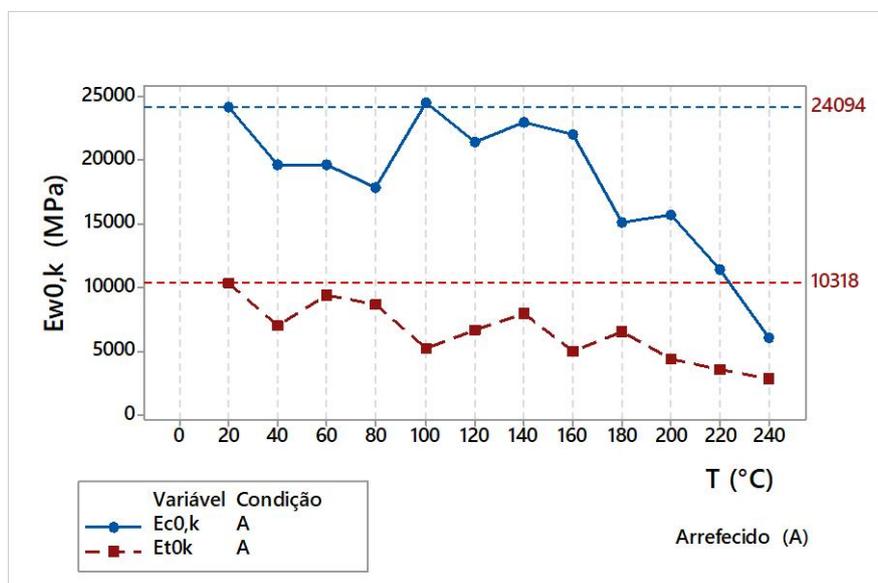


Figura 4.31 – Módulos de elasticidade característicos à compressão e à tração na condição arrefecido na madeira da *Dinizia excelsa Ducke* - de angelim-vermelho.



A redução observada no módulo de elasticidade na compressão e na tração (Fig. 4.30) na condição quente é contínua, mas bastante irregular. Na condição arrefecida (Fig. 4.31) observa-se na compressão uma redução até 80 °C de 28% e em seguida uma recuperação no módulo de elasticidade à compressão no trecho de 80 a 180 °C; após 180 °C, a redução na resistência já demonstra ser irreversível. À tração na condição arrefecida, a redução é contínua e irregular. A redução total à 240 °C na condição quente foi de 74 - 81%. A redução total na condição arrefecida à 240 °C foi de 73 - 75%.

Martins (2016) investigou a resistência mecânica à flexão de vigas de MLC fabricadas com madeiras de espécie plantada de *Eucalyptus* de densidade aparente de 743 kg/m³ a 12% de teor de umidade, seção 150 mm × 420 mm submetidas à ensaio com exposição ao fogo segundo a curva-padrão da ISO 834. Após a exposição ao fogo, a seção reduziu-se para 88 mm × 352 mm e o módulo de elasticidade determinado experimentalmente apresentou uma redução de 49,5% em relação ao módulo de elasticidade determinado antes da exposição após 35 min de exposição ao fogo e temperatura máxima de 225 °C.

As reduções aceleradas nas resistências e módulos de elasticidade à partir de 140 °C referem-se a mudanças irreversíveis nestas propriedades devido à degradação nos três componentes básicos (celulose, hemicelulose e lignina) motivados por fatores que incluem, além da variação no teor de umidade, a forma de aquecimento, o gradiente de temperatura, o período de exposição, a espécie de madeira e o tamanho da peça analisada, como esclarecido em Kretschmann (2010). Os valores de temperaturas vítreas (109 °C e 186 °C) determinada para a *Dinizia excelsa* coincidem com as mudanças evidenciadas nos gráficos corroborando com a afirmação em Canevarolo Jr. (2006) de que a temperatura de transição vítrea trata-se de uma transição termodinâmica de segunda ordem que afeta as variáveis termodinâmicas secundárias, e em consequência, o comportamento mecânico do material.

Uma aparente melhoria na resistência e no módulo de elasticidade na condição arrefecida, pode ser devida, conforme Piazza e Tomasi (2005), à redução no teor de umidade disfarçando o efeito negativo da degradação térmica ou conforme Mendes et al. (1982) ser devido à possível influência do rearranjo estrutural do carbono, acarretando uma estrutura molecular de maior resistência.

Os dados de resistência à tração apresentaram uma maior dispersão. Provavelmente a grã irregular da espécie angelim-vermelho, o desvios de grã e os desvios microfibrilares poderiam ter ampliado ou mesmo provocado efeitos de torção nos corpos de prova ao serem submetidos ao calor alterando o comportamento do material e reduzindo a resposta à solicitação de tração.

Para a madeira de *Schizolobium amazonicum* (paricá) de baixa densidade, Manriquez (2008) constatou que acima de 150 °C a perda de água de constituição provoca uma retração significativa.

4.2.3.3 Valores característicos normalizados

Valores característicos normalizados em relação à temperatura de 20°C foram estabelecidos para as resistências e os módulos de elasticidade, para as condições quente (Q) e arrefecido (A) e encontram-se representados nas Figs. 4.32 à 4.36.

Figura 4.32 – Resistência característica à compressão paralela às fibras normalizada nas condições quente (Q) e arrefecido (A).

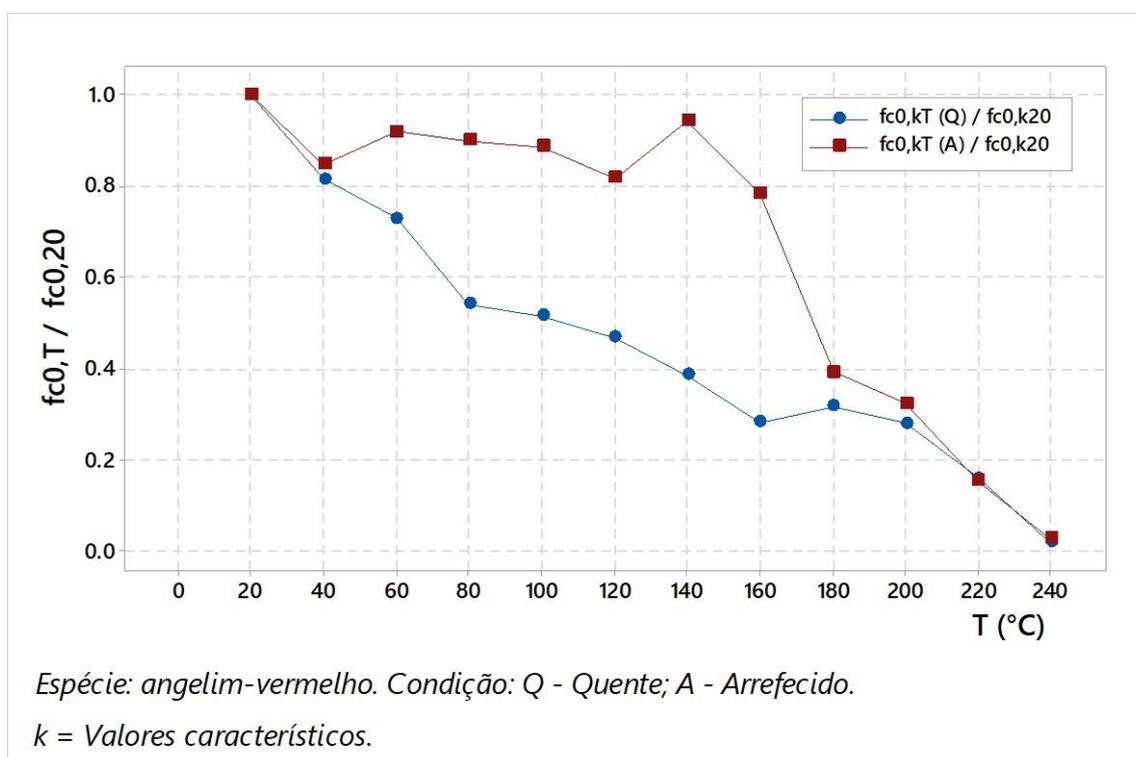


Figura 4.33 – Resistência característica à tração paralela às fibras normalizada nas condições quente (Q) e arrefecido (A).

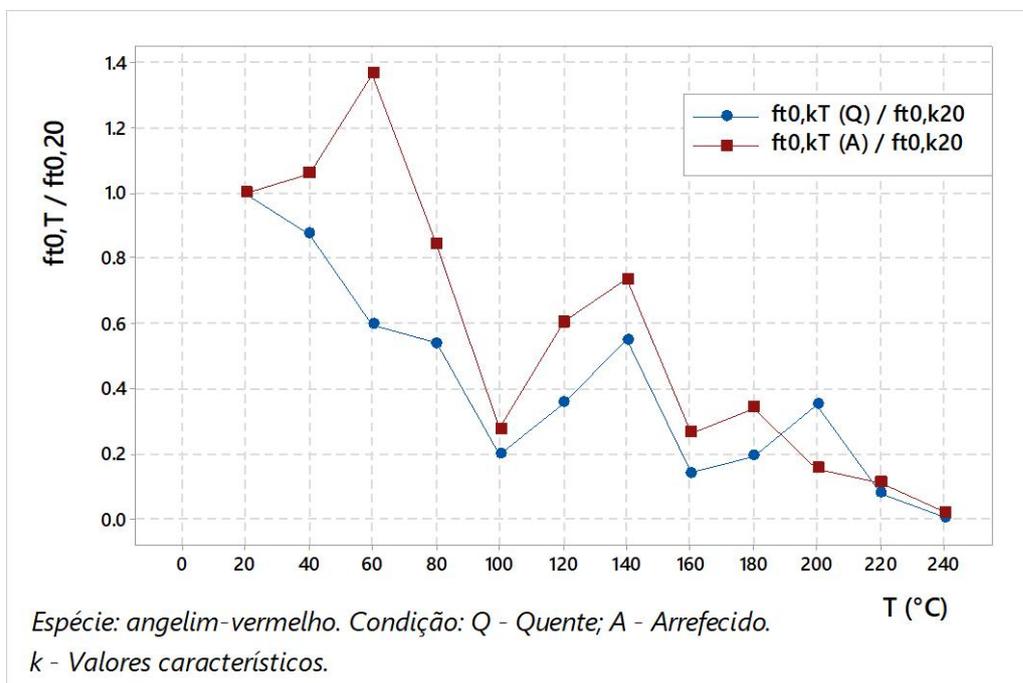


Figura 4.34 – Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras normalizado nas condições quente (Q) e arrefecido (A).

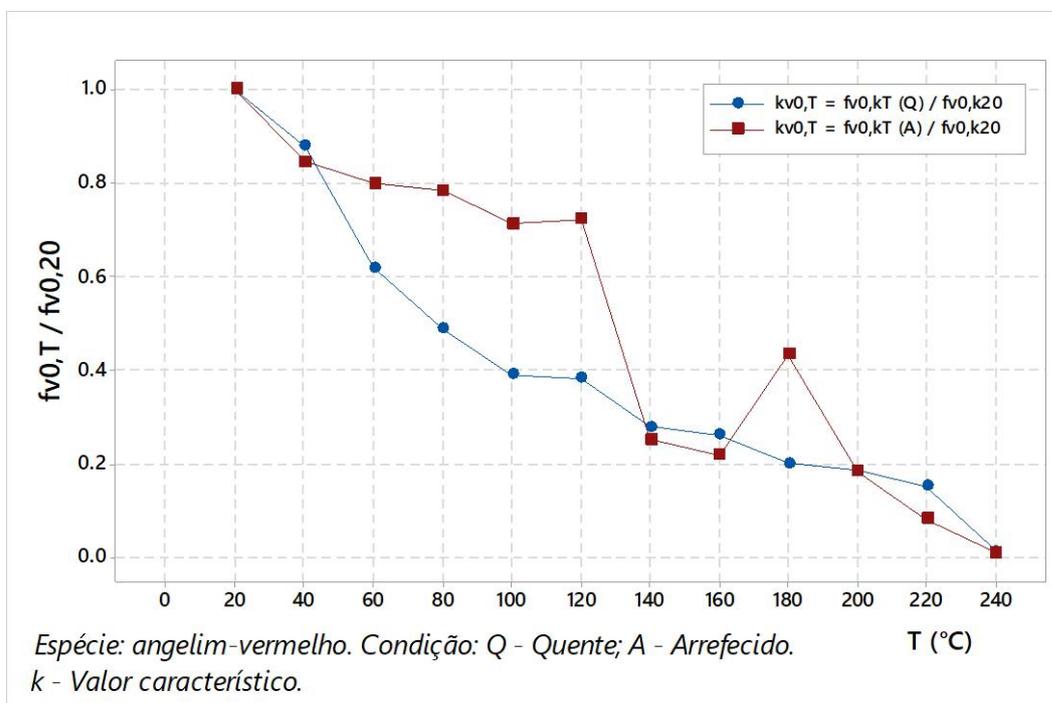


Figura 4.35 – Módulos de elasticidade na compressão paralelos às fibras normalizados nas condições quente (Q) e arrefecido (A).

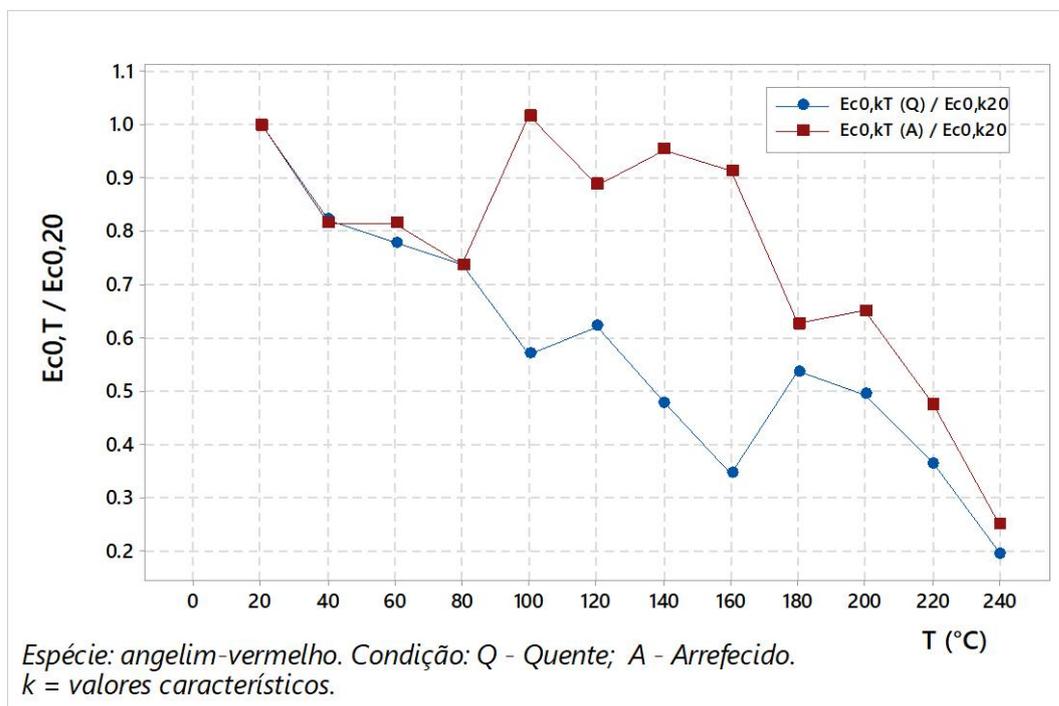
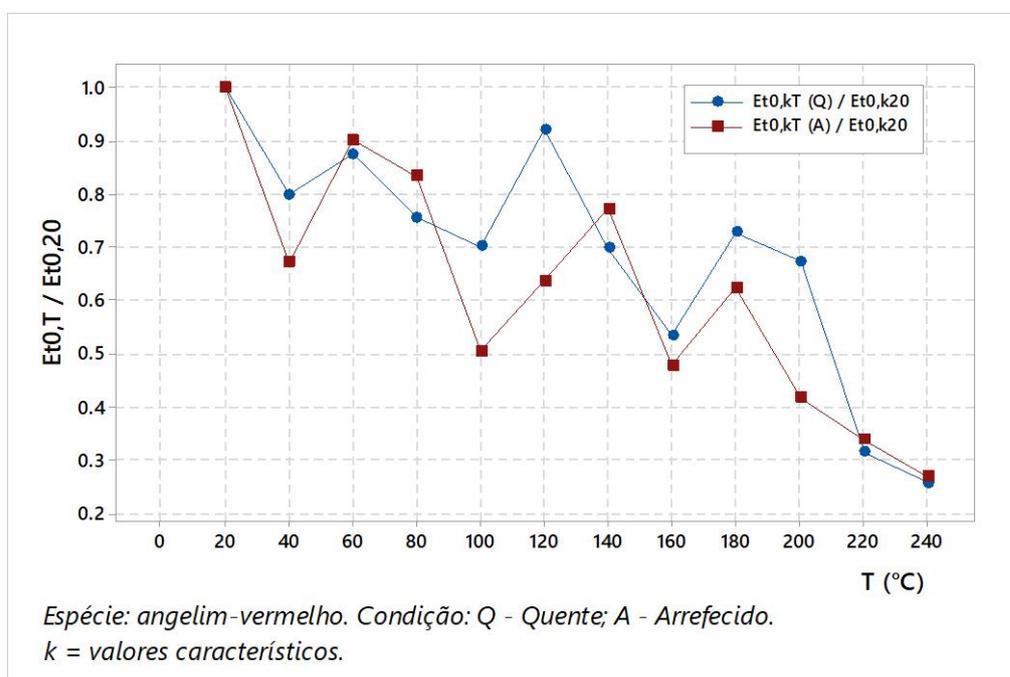


Figura 4.36 – Módulos de elasticidade na tração paralela às fibras normalizados nas condições quente (Q) e arrefecido (A).



A análise dos gráficos nas Figs. 4.32 à 4.36 possibilita verificar que a elevação de temperatura afeta as propriedades mecânicas e provoca a redução nas resistências à

compressão, ao cisalhamento e à tração. No intervalo de 20 °C a 40 °C observa-se para todas as resistências uma redução de 15 a 23% e de 40 a 240 °C determinou-se uma redução entre 80% até 100% enquanto o módulo de elasticidade reduz em até 80% de 40 °C a 240 °C.

No fenômeno do transporte de massa que ocorre dentro da madeira devido à pirólise, a água evapora-se nas zonas aquecidas por volta de 100°C e recondensa no interior esfriando partes do elemento de madeira, conforme Bartlett et al. (2018). Esse fenômeno está evidente nas imagens dos gráficos nas Fig. 4.32 à 4.36. Após 100 °C ocorre uma aparente elevação na resistência à compressão, tração e cisalhamento até 160-180 °C quando reduz de forma irreversível. Para a condição arrefecida, a recuperação da resistência na compressão e no cisalhamento e no módulo de elasticidade na compressão é aparente e não se sustenta após a temperatura de 180 °C enquanto na tração, observa-se as alterações bastante irregulares como mencionado no item anterior. Para ambas condições, quente e arrefecida, a segunda temperatura média de transição vítrea (191,52 °C) determinada para a espécie *Dinizia excelsa* é indicativo de redução irreversível na resistência mecânica da madeira.

4.2.3.4 Fatores de modificação das resistências e dos módulos de elasticidade

Os fatores de modificação ($k_{mod,fi}$) das resistências e dos módulos de elasticidade da madeira da espécie angelim-vermelho nas condições quente (Q) e arrefecida (A) foram relacionados aos modelos de regressão das resistências e dos módulos de elasticidade normalizados, conforme esclarecido na metodologia do Cap.3.

Os modelos de regressão obtidos e os respectivos coeficientes de explicação da regressão múltipla (R^2) representam os melhores ajustes para os fatores de modificação das resistências e dos módulos de elasticidade nas condições à quente (40 a 240 °C) e na condição arrefecida (40 a 240 °C), encontram-se na Tab. (4.13).

Tabela 4.13 – Modelos de fatores de modificação da resistência e da rigidez para a madeira de *Dinizia excelsa* Ducke - angelim-vermelho, sob temperaturas de 40 °C a 240 °C nas condições quente (Q) e arrefecida (A).

Solicitações paralelas às fibras	Fatores de modificação	(R ²)	Eq.
Compressão (Q)	$k_{mod,fi}(f_{c0,T,Q}) = \frac{f_{c0,kT,Q}}{f_{c0,k20}} = 0,9526 - 0,003799 \cdot T$	94,42	(4.5)
Tração (Q)	$k_{mod,fi}(f_{t0,T,Q}) = \frac{f_{t0,kT,Q}}{f_{t0,k20}} = 0,8967 - 0,003771 \cdot T$	75,23	(4.6)
Cisalhamento (Q)	$k_{mod,fi}(f_{v0,T,Q}) = \frac{f_{v0,kT,Q}}{f_{v0,k20}} = 1,1279 - 0,00853 \cdot T + 0,000018 \cdot T^2$	96,51	(4.7)
MOE _{c0} (Q)	$k_{mod,fi}(E_{c0,T,Q}) = \frac{E_{c0,kT,Q}}{E_{c0,k20}} = 0,960 - 0,002935 \cdot T$	86,35	(4.8)
MOE _{t0} (Q)	$k_{mod,fi}(E_{t0,T,Q}) = \frac{E_{t0,kT,Q}}{E_{t0,k20}} = 1,0236 - 0,002590 \cdot T$	69,19	(4.9)
Compressão (A)	$k_{mod,fi}(f_{c0,T,A}) = \frac{f_{c0,kT,A}}{f_{c0,k20}} = 0,836 + 0,00379 \cdot T - 0,000031 \cdot T^2$	92,78	(4.10)
Tração (A)	$k_{mod,fi}(f_{t0,T,A}) = \frac{f_{t0,kT,A}}{f_{t0,k20}} = 1,251 - 0,005280 \cdot T$	76,78	(4.11)
Cisalhamento (A)	$k_{mod,fi}(f_{v0,T,A}) = \frac{f_{v0,kT,A}}{f_{v0,k20}} = 1,0892 - 0,004509 \cdot T$	89,73	(4.12)
MOE _{c0} (A)	$k_{mod,fi}(E_{c0,T,A}) = \frac{E_{c0,kT,A}}{E_{c0,k20}} = 0,751 + 0,00437 \cdot T - 0,000026 \cdot T^2$	77,55	(4.13)
MOE _{t0} (A)	$k_{mod,fi}(E_{t0,T,A}) = \frac{E_{t0,kT,A}}{f_{t0,k20}} = 0,9701 - 0,002699 \cdot T$	72,66	(4.14)

Sendo: para a compressão, $K_{mod,fi}(f_{c0,T})$; para a tração, $K_{mod,fi}(f_{t0,T})$; para o cisalhamento, $K_{mod,fi}(f_{v0,T})$; para o módulo de elasticidade na compressão, $K_{mod,fi}(E_{c0,T})$ e para o módulo de elasticidade na tração, $K_{mod,fi}(E_{t0,T})$.

A análise dos modelos apresentados na Tab. (4.13), para a condição quente (Q) evidencia que os modelos para a predição de fator de modificação da compressão e do cisalhamento paralelos às fibras alcançaram correlações de alta significação sendo 94,42% e 96,51%, respectivamente e de 86,35% para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras. Quanto à solicitação de tração, já era esperado uma significância mais reduzida (75,23%) o mesmo ocorrendo para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (69,19%). As equações de regressão para as solicitações $f_{c0,T}$ e $E_{c0,T}$ demonstram ser equivalentes, como prescrito na EN 1997-1-2 (2004).

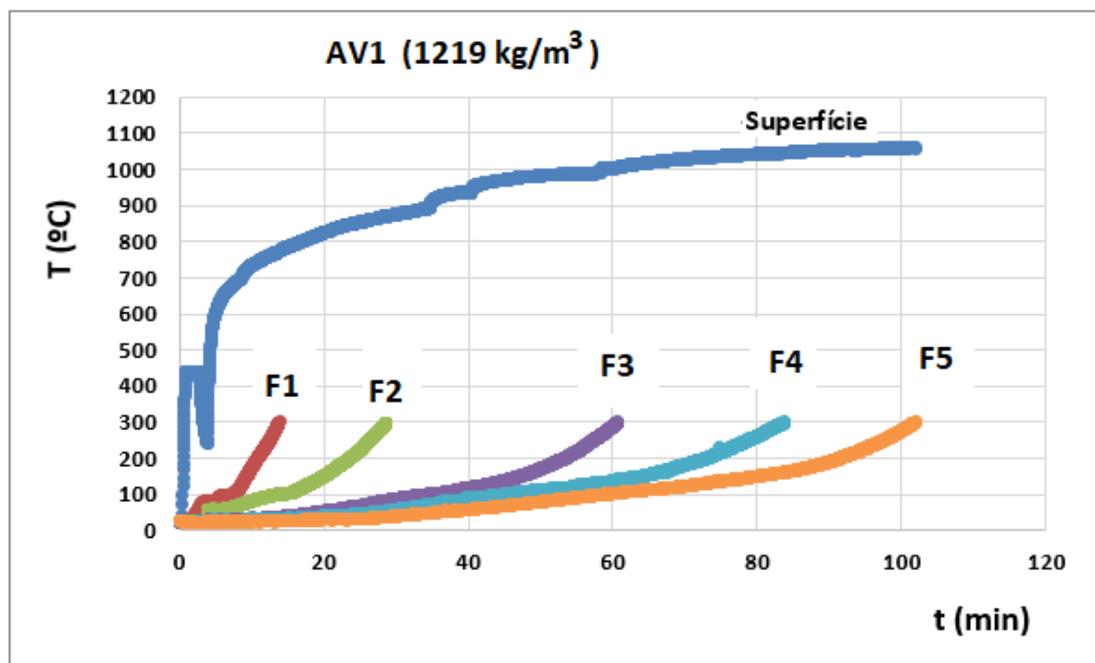
Para a condição arrefecida (A) a análise evidencia que os modelos para a predição de fator de modificação da compressão e do cisalhamento paralelos às fibras alcançaram, também, correlações de alta significação sendo 92,78% e 89,73%, respectivamente e de 77,55% para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras. Quanto à solicitação de tração, já era esperado uma significância mais reduzida (76,78%) o mesmo ocorrendo para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (72,66%).

Os resultados obtidos para as solicitações de tração sugerem que um maior número de amostras e de espécies sejam submetidas a novos ensaios experimentais para potencializar a significância nos resultados para tração paralela às fibras. Neste caso, para validação dos modelos propostos será interessante a realização de ensaios mecânicos em corpos de prova em dimensões reais de projeto.

Constata-se a adequação dos modelos propostos para a predição de fatores de modificação das propriedades mecânicas da madeira de angelim-vermelho (*Dinizia excelsa Ducke*) em função das temperatura, considerando-se que o ensaio ao fogo padrão representa um incêndio padronizado. Ou seja, nesse caso, tem-se um processo com aquecimento transiente onde a transferência de calor varia com a posição e o tempo transcorrido. Os modelos apresentados na literatura especificam modelos para certos intervalos de temperatura, tal como apresentado em Manriquez (2012).

As taxas de aquecimento das madeiras das amostras ensaiadas nesta Tese variam com a profundidade, como demonstrado na Fig. 4.37: quanto mais próximo à superfície aquecida, mais alta a taxa de aquecimento.

Figura 4.37 – Tempo de carbonização para angelim-vermelho (corpo de prova AV1).



Assim, no furo mais distante da superfície (F5), à 50 mm, as temperaturas capturadas pelos termopares acusam taxas de aquecimento mais baixas do que em F4, F3, F2 e F1.

4.2.3.5 Espessura da camada de resistência zero (d_0)

Aplicou-se os modelos de gradientes de temperaturas de carbonização propostos nas Tabs. (4.11) e (4.12), para tempos de 20 e 30 min obtendo-se as espessuras correspondentes à segunda temperatura média de transição vítrea (191,52 °C) e à espessura de carbonização (300 °C). A diferença corresponde às espessuras da camada de resistência zero (d_0) apresentadas na Tab.(4.14).

Tabela 4.14 – Espessuras das camadas de resistência zero considerando a $T_g=191,52$ °C.

t (min)	AV			A1		
	d (T= 191,52 °C)	d (T= 300 °C)	d ₀ (AV)	d (T= 191,52 °C)	d (T= 300 °C)	d ₀ (A1)
20	15,03	9,05	5,98	17,55	11,32	6,23
30	21,08	15,02	6,06	24,35	18,03	6,32

Os resultados de espessura d_0 de resistência zero apresentados na Tab. (4.14) demonstram que os valores obtidos para tempos de 20 min e 30 min são equivalentes pelo teste Tukey com 95% de confiança sendo representados por $d_0 = 6$ mm.

Nos dois casos, pode-se considerar que o valor proposto na norma EN 1995-1-2 (2004) de 7 mm atende para as espécies estudadas.

Constata-se que todas as espécies apresentam o mesmo comportamento de carbonização, pois apresentam os mesmos constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) diferindo na velocidade da carbonização (taxa de carbonização).

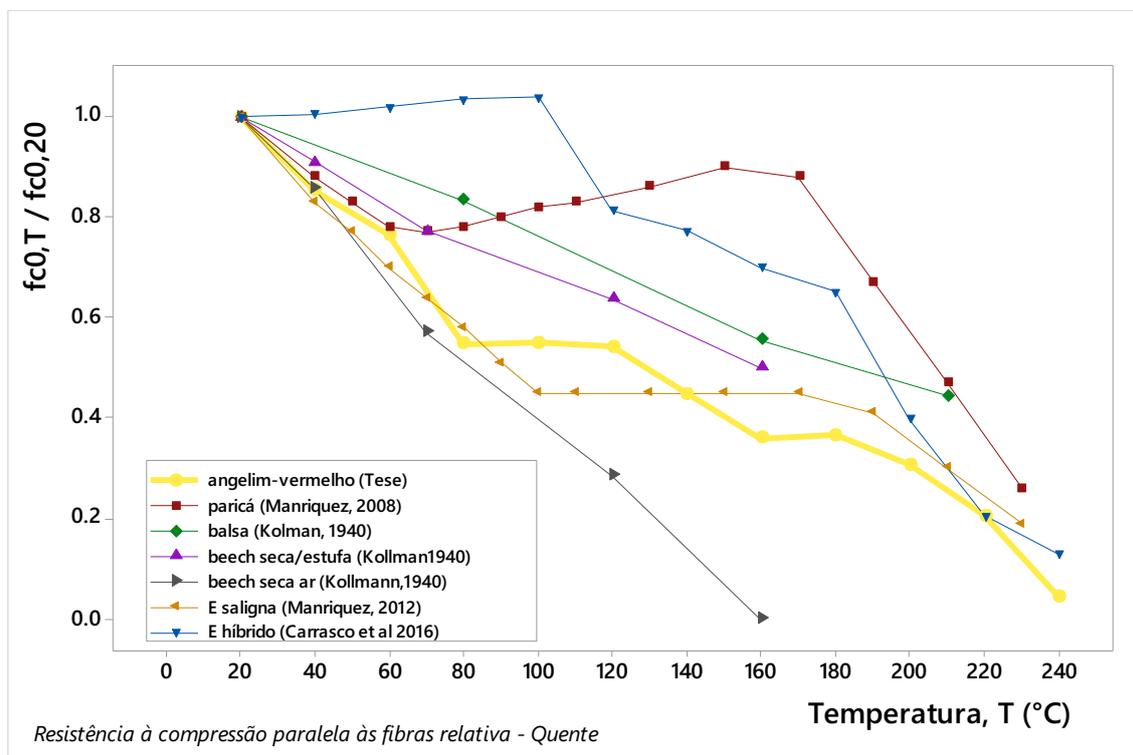
4.2.3.6 Análises comparativas do efeito da elevação de temperatura

Realizou-se análises comparativas do efeito da elevação de temperatura na redução da resistência à compressão paralelas às fibras na espécie angelim-vermelho em relação a outras espécies folhosas cujos dados foram obtidos na literatura revisada. Os nomes das espécies, suas respectivas famílias botânicas, densidades aparentes reportadas a 12% de TU (d_{ap} , 12%) e informações sobre os tipos de obstruções nos vasos foram identificados na literatura pela autora visando-se maiores análises e discussões. Os dados encontram-se na Tab. (4.15) com os quais elaborou-se o gráfico da Fig. 4.38.

Tabela 4.15 – Características de madeiras folhosas por ordem crescente de densidade.

Espécie/nome comum/Família/Referência	d_{ap} , 12% kg/m ³	Obstruções nos vasos
<i>Dinizia excelsa</i> / angelim-vermelho Leguminosae Mimosoideae (Esta Tese)	1128	gomas e depósitos
<i>Eucalyptus sp.</i> / <i>eucalyptus saligna</i> / Myrtaceae (Manriquez, 2012)	753	tiloses
<i>Eucalyptus sp.</i> Híbrido de <i>E. grandis</i> com <i>E. urophylla</i> (Lyptus) /Myrtaceae (Carrasco et al, 2016)	676	tiloses
<i>Fagus grandifolia</i> , beech/ Fagaceae (Kollmann, 1940)	635	tiloses
<i>Schizolobium amazonicum</i> , paricá/ Leguminosae Caesalpinioideae (Manriquez, 2008)	372	vazio
<i>Ochroma pyramidale</i> , balsa/ Malvaceae Bombacoideae (Kollmann, 1940)	133	vazio

Figura 4.38 - Resistências relativas à compressão paralela às fibras de diferentes madeiras sob altas temperaturas.



As espécies analisadas apresentam uma larga faixa de densidades aparentes desde baixa (133 kg/m^3 , balsa) à alta (1128 kg/m^3 , angelim-vermelho). Observa-se na Fig. 4.38 que as únicas amostras que apresentaram elevação na resistência logo após o aquecimento foram as dos corpos de prova de $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}$ de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *urophylla* - *Lyptus* (Carrasco et al, 2016) que apresentam resistência elevada em 4% com o aumento de temperatura até $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e depois reduzindo 25% até $120 \text{ }^\circ\text{C}$ e, continuando a reduzir, alcançando 13% da resistência em temperatura ambiente, à $240 \text{ }^\circ\text{C}$. O comportamento inicial com acréscimo de resistência poderia ser devido à qualidade das amostras oriundas de tábuas serradas tipo *Lyptus*, selecionadas e secas em estufa, como mencionado em Kollmann (1940). Todas as demais espécies sofrem imediata redução nas resistências mecânicas com a elevação de temperatura. Dentre as duas amostras de espécie beech analisadas em Kollmann (1940), a redução de resistência foi muito mais acentuada para as amostras secas ao ar (ambiente aberto) do que para as amostras secas em estufa (mais estáveis com secagem sob controle rigoroso).

O eucalyptus saligna apresenta redução de 50 a 60% a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ mantendo-se nesse patamar até $230 \text{ }^\circ\text{C}$ quando reduz cerca de 70% da sua resistência à compressão, segundo

Manriquez (2012), enquanto o angelim-vermelho de maior densidade reduziu 90% de sua resistência a essa temperatura, provavelmente pelo fato do eucalyptus saligna apresentar tiloses que interferem na permeabilidade de gases aquecidos no interior dos vasos; porém, acima de 180 °C o eucalyptus saligna apresenta um perfil semelhante às madeiras balsa e paricá e esse comportamento poderia ser resultado do surgimento de rachaduras internas profundas como esclarecido em Manriquez (2012).

O fato de a madeira de angelim-vermelho ter sofrido uma redução de resistência maior do que a madeira de paricá a partir da temperatura de 60 °C poderia ter relação com os seguintes fatores: a) temperatura de transição vítrea do angelim-vermelho; b) modos de ruptura com esmagamento associado à cisalhamento transversal e paralelo às fibras; c) dimensões reduzidas, sendo 30 × 30 × 90 mm para o angelim-vermelho e 50 × 50 × 150 mm para o paricá evidenciando a importância das dimensões da peça ensaiada como mencionado em Kretschmann (2010) e Jong e Clancy (2004) assim como a influência da maior extensão relativa da superfície exposta ao calor. Também Figueroa e Moraes (2009) mencionam que a redução no teor de umidade e de massa em corpos de prova de dimensões reduzidas pode influenciar os resultados durante a realização de ensaios.

A madeira de paricá, de menor densidade, apresenta redução de 25% na resistência sob temperaturas de 60 °C quando ganha resistência até a temperatura de 160 °C, provavelmente devido ao fluxo livre de calor aquecido pelos vasos desobstruídos e, a partir dessa temperatura, o paricá começa a perder resistência de forma contínua reduzindo cerca de 70% a 230 °C.

5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Apresenta-se as conclusões da investigação experimental realizada com o objetivo geral de determinar a taxa de carbonização de treze espécies folhosas brasileiras e avaliar a influência das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas em uma espécie de alta densidade aparente. As conclusões obtidas no atendimentos aos objetivos específicos foram:

(a) “Estudar a carbonização das espécies selecionadas sob exposição padrão ao fogo da ISO 834”.

a1) Para dez espécies com densidades aparentes à 12% de 500 a 1300 kg/m³, com presença de obstruções nos vasos do tipo gomas e depósitos associados ou não à tiloses (agrupamento A1), a taxa de carbonização apresentou comportamento linear inversamente proporcional à densidade aparente. As outras três espécies, com densidades aparentes à 12% variando de 700 a 1000 kg/m³, com presença de obstruções nos vasos do tipo tiloses (agrupamento A2), a taxa de carbonização apresentou comportamento invariável com a densidade aparente. Assim, madeiras que tenham a mesma densidade aparente a 12% podem ter taxas de carbonização diferentes em função do tipo de obstrução nos vasos.

a2) Os modelos que representam os gradientes de temperatura (T, °C) para ambos agrupamentos e tempos de 20, 30 e 60 min encontram-se na Tab. (5.1).

Tabela 5.1 – Modelos de gradientes de temperatura (T, °C) relacionados com a profundidade (P, mm) para espécies folhosas dos Agrupamentos A1 e A2.

Tempo, t (min)	Agrupamento	Modelo	R ² (%)
20	A1	$T_{20,A1} = 677,85e^{-0,072P}$	83,95
	A2	$T_{20,A2} = 381,6e^{-0,057P}$	77,11
30	A1	$T_{30,A1} = 1079,2e^{-0,071P}$	85,41
	A2	$T_{30,A2} = 597,24e^{-0,058P}$	81,65
60	A1	$T_{60,A1} = 1535,2e^{-0,05P}$	78,42
	A2	$T_{60,A2} = 979,76e^{-0,05P}$	92,20

a3) Para as 13 espécies folhosas ensaiadas, a estabilização da temperatura no interior dos corpos de prova ocorre na profundidade de 50 mm; para tempo de 20 min, a temperatura se estabiliza na faixa de 19 a 22 °C, para os agrupamentos A1 e A2, respectivamente; e para tempo de 30 min, na faixa de 31 a 33 °C, respectivamente. Para tempo de 60 min, à 50 mm de profundidade, não observa-se uma estabilização de temperatura no interior dos corpos de prova.

(b) “Determinar modelos para a predição da profundidade de carbonização e da taxa de carbonização das espécies selecionadas”.

b1) O modelo para a predição da profundidade de carbonização para as espécies do agrupamento A1 (P_{A1}) é influenciada pela densidade aparente ($d_{ap,12}$) e pelo tempo de exposição ao fogo (t) enquanto, para as espécies do agrupamento A2 (P_{A2}), é influenciada apenas pelo tempo de exposição ao fogo (t). Os modelos e respectivas significâncias (R^2) estão representadas nas equações seguintes, para t em mm e $d_{ap,12}$ em kg/m³:

$$P_{A1} = 0,8593 \cdot t - 0,000324 \cdot t \cdot d_{ap,12} \quad R^2 = 97,42$$

$$P_{A2} = 0,39032 \cdot t \quad R^2 = 98,91$$

b2) Os modelos para predição de taxas de carbonização, obtidos a partir da derivação (dP/dt) da equações de profundidade de carbonização, para as espécies do agrupamento A1 e A2, respectivamente, B_{A1} e B_{A2} , estão representadas a seguir para $d_{ap,12}$ em kg/m³:

$$B_{A1} = 0,8593 - 0,000324 \cdot d_{ap,12}$$

$$B_{A2} = 0,39$$

b3) Com vistas à segurança contra incêndio, não é confiável adotar a densidade da madeira como único parâmetro para validar a substituição de madeiras na construção civil;

b4) A adoção da prescrição da norma EN 1995-1-2 (2004) de uma taxa de carbonização unidimensional constante de 0,50 mm/min para todas as espécies folhosas, com densidade média $\geq 529 \text{ kg/m}^3$ (à 12% de umidade) na forma serrada é conservadora, mas à favor da segurança, para as espécies consideradas do agrupamento A2, porém, para todas as espécies do agrupamento A1 é contrária à segurança;

b5) A carbonização (à 300 °C) das espécies do agrupamento A1 à profundidade de 50 mm, ocorre aos 90 min e das espécies do A2, ocorre aos 120 min sendo uma defasagem de 30 min.

(c) “Determinar a influência das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas (resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento paralelos às fibras) e nos módulos de elasticidade à compressão e à tração em amostras da espécie selecionada *Dinizia excelsa* Ducke submetidas a temperaturas de 40 a 240 °C nas condições quente e arrefecida”.

c1) A espécie *Dinizia excelsa* apresenta redução da resistência mecânica na situação quente a partir de 40 °C até 240 °C; sob 220 °C, a redução é de 84 a 92%; sob 240 °C, a redução é de 97 a 100%; a redução é mais acentuada na compressão e no cisalhamento, enquanto na tração apresenta-se descontínua e muito irregular;

c2) Na condição quente, a redução no módulo de elasticidade na compressão e na tração é contínua, mas bastante irregular; a redução total sob 240 °C foi de 74 a 81%;

c3) Para as três solicitações, após a temperatura de 180 °C, a redução na resistência e no módulo de elasticidade na compressão e na tração, já demonstra ser irreversível coincidindo com a segunda temperatura de transição vítrea;

c4) Com as temperaturas arrefecidas, a redução na resistência à compressão, ao cisalhamento e à tração é de 15% à temperatura de 40 °C; de 40 a 160 °C ocorre uma recuperação da resistência mais significativa na compressão até a faixa de 160 °C quando decai abruptamente. No cisalhamento não ocorrem aumentos significativos. À tração, a redução na resistência é bastante irregular;

c5) Na condição arrefecida, a redução no módulo de elasticidade na compressão de 40 até 80 °C foi de 28%; ocorre uma recuperação no módulo de elasticidade à compressão no trecho de 80 a 180 °C; após 180 °C, a redução na resistência já demonstra ser irreversível, coincidindo com a temperatura de transição vítrea. A redução no módulo de elasticidade à tração é contínua e irregular. A redução total no módulo de elasticidade sob 240 °C foi de 73 à 75%.

c6) O corpo de prova de seções reduzidas para o ensaio de tração não foi adequado para a espécie *Dinizia excelsa Ducke*;

(d) “Determinar os modelos de fatores de modificação das propriedades mecânicas da espécie *Dinizia excelsa Ducke*, sob temperaturas de 40 a 240 °C nas condições quente e após o arrefecimento”.

d1) Os fatores de modificação ($k_{\text{mod,fi}}$) das resistências e dos módulos de elasticidade para a madeira da espécie *Dinizia excelsa Ducke* nas condição quente e arrefecida encontram-se na tabela Tab. (5.2).

Tabela 5.2 - Fatores de modificação das resistências (compressão, tração e cisalhamento) e dos módulos de elasticidade da espécie Dinizia excelsa Ducke para temperaturas, T, de 40 a 240 °C.

Compressão (Q)	$k_{mod,fi}(f_{c0,T,Q}) = \frac{f_{c0,kT,Q}}{f_{c0,k20}} = 0,9526 - 0,003799 \cdot T$	$R^2 = 94,42$
Tração (Q)	$k_{mod,fi}(f_{t0,T,Q}) = \frac{f_{t0,kT,Q}}{f_{t0,k20}} = 0,8967 - 0,003771 \cdot T$	$R^2 = 75,23$
Cisalhamento (Q)	$k_{mod,fi}(f_{v0,T,Q}) = \frac{f_{v0,kT,Q}}{f_{v0,k20}} = 1,1279 - 0,00853 \cdot T + 0,000018 \cdot T^2$	$R^2 = 96,51$
MOE (Q)	$k_{mod,fi}(E_{c0,T,Q}) = \frac{E_{c0,kT,Q}}{E_{c0,k20}} = 0,960 - 0,002935 \cdot T$	$R^2 = 86,35$
MOE (Q)	$k_{mod,fi}(E_{t0,T,Q}) = \frac{E_{t0,kT,Q}}{E_{t0,k20}} = 1,0236 - 0,002590 \cdot T$	$R^2 = 69,19$
Compressão (A)	$k_{mod,fi}(f_{c0,T,A}) = \frac{f_{c0,kT,A}}{f_{c0,k20}} = 0,836 + 0,00379 \cdot T - 0,000031 \cdot T^2$	$R^2 = 92,78$
Tração (A)	$k_{mod,fi}(f_{t0,T,A}) = \frac{f_{t0,kT,A}}{f_{t0,k20}} = 1,251 - 0,005280 \cdot T$	$R^2 = 76,78$
Cisalhamento (A)	$k_{mod,fi}(f_{v0,T,A}) = \frac{f_{v0,kT,A}}{f_{v0,k20}} = 1,0892 - 0,004509 \cdot T$	$R^2 = 89,73$
MOE (A)	$k_{mod,fi}(E_{c0,T,A}) = \frac{E_{c0,kT,A}}{E_{c0,k20}} = 0,751 + 0,00437 \cdot T - 0,000026 \cdot T^2$	$R^2 = 77,55$
MOE (A)	$k_{mod,fi}(E_{t0,T,A}) = \frac{E_{t0,kT,A}}{E_{t0,k20}} = 0,9701 - 0,002699 \cdot T$	$R^2 = 72,66$

Q: quente; A: arrefecido. Sendo: para a compressão, $K_{mod,fi}(f_{c0,T})$; para a tração, $K_{mod,fi}(f_{t0,T})$; para o cisalhamento, $K_{mod,fi}(f_{v0,T})$; para o módulo de elasticidade na compressão, $K_{mod,fi}(E_{c0,T})$ e para o módulo de elasticidade na tração, $K_{mod,fi}(E_{t0,T})$.

(e) “Correlacionar os dados de gradiente de temperatura no elemento carbonizado com a variação de resistência mecânica para madeira da espécie *Dinizia excelsa Ducke* e determinar a profundidade da camada de resistência zero”.

e1) A segunda temperatura média de transição vítrea (191,52 °C) está relacionada a perdas irreversíveis de resistência mecânica para a espécie *Dinizia excelsa*. Para tempos de exposição ao fogo padrão de 20 min e 30 min, a profundidade da camada de resistência zero determinada é de 6 mm. Nos dois casos, pode-se considerar que o valor proposto na norma EN 1995-1-2 (2004) de 7 mm atende para as espécies estudadas.

Constata-se que todas as espécies apresentam o mesmo comportamento de carbonização, pois apresentam os mesmos constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) diferindo na velocidade da carbonização (taxa de carbonização).

Quanto aos trabalhos futuros:

- a) Considerando-se a diversidade de espécies folhosas existentes nas florestas brasileiras de clima tropical, trabalhos futuros devem investigar outras espécies, tanto com características das espécies do agrupamento A1 quanto do agrupamento A2. Esta ação irá ampliar o banco de dados a respeito das informações tecnológicas das espécies contribuindo para ampliar a significação dos modelos propostos para a previsão de profundidades de carbonização e de taxa de carbonização de espécies tropicais, assim como ampliar a identificação da presença de obstruções no vasos do tipo tiloses e a investigação das temperaturas de transição vítrea das demais espécies de madeiras investigadas;
- b) Avaliar, também, a carbonização de amostras de espécies de madeira de reflorestamento, como pinus e de eucaliptos, usualmente utilizados na construção em sistemas como *woodframe*, *CLT* e outras e desenvolver os respectivos modelos para a previsão de profundidades e de taxa de carbonização e demais informações tecnológicas;
- c) Realizar ensaios mecânicos sob exposição ao fogo padrão em corpos de prova de dimensões em escala real.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. M. Estatística. Cap. 3. **Modelos estatísticos**. Departamento de Matemática e Estatística. Universidade da Madeira. 2007.

ALVES, R. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; PAES, J. B. **Caracterização anatômica macroscópica de madeiras folhosas comercializadas no Estado do Espírito Santo**. *Floram. Floresta e Ambiente*. 2012; 19(3):352-361.

ALVES, R. C. **Determinação das constantes elásticas da madeira considerando sua ortotropia**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2017.

ANTONIOW, J.S.; MAIGRET, J.; JENSEN, C.; TRANNOY, N.; CHIRTOC, M.; BEAUGRAND, J. **Glass-Transition Temperature Profile Measured in a Wood Cell Wall Using Scanning Thermal Expansion Microscope (SThem)**. *Int J Thermophys* 33, 2167–2172 (2012). <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10765-012-1313-y>

_____. **ASTM D143-09**. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken (PA). ASTM International. Philadelphia, 2000.

_____. **ASTM E119-00**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken (PA). ASTM International. Philadelphia, 2000.

_____. **ASTM E119-09**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken (PA). ASTM International. Philadelphia, 2009.

_____. **ASTM E119-12**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken (PA). ASTM International. Philadelphia, 2012.

_____. **ASTM E119-61**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken (PA). ASTM International. Philadelphia, 1961.

_____. **ASTM E662-95**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. Standard Test Method for Specific Optical Density (Ensaio para a determinação da densidade ótica de fumaça). Philadelphia, 1995.

American Wood Council (AWC). **ASD-LRFD**: Manual for Engineered wood construction. 2012 Edition.

_____. National Design Specification (**NDS**) Supplement: Design values for wood construction. ANSI/NDS. Leesburg, VA, 2018a.

_____. National Design Specification (**NDS**) for wood construction. Technical Report nº.10. Calculating the fire resistance of wood members and assemblies. Leesburg, VA, 2018b.

_____. Code Conforming Wood Design (**CCWD**). International Code Council. Leesburg, VA, 2012.

ANGYALOSSY, V.; AMANO, E.; ALVES, E. S. **Madeiras utilizadas na fabricação de arcos para instrumentos de corda: aspectos anatômicos.** Acta bot. bras. 19(4): 819-834. 2005.

Antoniow, J.S.; Maigret, J.; Jensen, C.; Trannoy, N.; Chirtoc, M.; Beaugrand, J. **Glass-Transition Temperature Profile Measured in a Wood Cell Wall Using Scanning Thermal Expansion Microscope (SThem).** Int J Thermophys 33, 2167–2172 (2012). <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10765-012-1313-y>

APA. The Engineered wood Association. **Fire-Rated systems.** Design / Construction guide. 2005.

APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Editoras). **Anatomia Vegetal.** 2 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

ARAÚJO, H. J. B. **Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas.** Dissertação (mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

ARAÚJO, H. J. B. **Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras.** FLORESTA, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, set./dez. 2007.

ARAÚJO, P. A. M. **Contribuição ao conhecimento da madeira de Plathymenia foliosa BENTH. (Leg. Mim.).** Arquivos do Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Vol. XVIII. 1965.

ASSEVA, R.; SERKOV, B.; SIVENKOV, A. **Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings.** Springer Series in Wood Science, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5628.** Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 7190:** Projeto de Estruturas de Madeira: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **CB-02 REVISÃO NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8660:** Ensaio de reação ao fogo em pisos. Determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte radiante de calor. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9442:** Materiais de construção. Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 10636:** Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 14323:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 14432**. Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações– Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações, Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-3**: Edificações habitacionais - Sistemas de piso. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-5**: Edificações habitacionais - Sistemas de cobertura. Rio de Janeiro, 2013.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1530.4**: Timber structures. Methods for fire tests on building materials, components and structures. Part 4: Fire resistance tests of elements of construction. North Sydney, 2005.

_____. **AS 1720.4**: Timber structures Part 4: Fire resistance for structural adequacy of timber members. North Sydney, 2006.

AWAL, A.; SAIN, M. **Spectroscopic studies and evaluation of thermorheological properties of softwood and hardwood lignin**. Wiley Periodicals, Inc. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 122, 956–963. 2011.

BABRAUSKAS, V. **Wood char depth: interpretation in fire investigations**. International Symposium on Fire Investigation. Fire Service College, Moreton-in-Marsh, United Kingdom. 2004.

BACK, E.L.; SALMÉN, N.L. **Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes**. Tappi Journal, v.65, n. 7, p.107–110, 1982.

BARAÚNA, E. E. P.; OLIVEIRA, V. S. **Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e tauari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa**. Acta Amazônica vol. 39(1) 2009: 91 – 96.

BARTLETT, A. I.; HADDEN, R. M.; BISBY, L. A. **A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction**. Fire Technology 2018.

Belgacem, M. N. (Editor); Pizzi, A. (Editor). **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment**. Wiley. 2016.

BENDER, D. A.; WOESTE, F. E.; SCHAFFER, E. L.; MARX, C. M. **Reliability formulation for the strength and fire endurance of glued-laminated beams**. Res. Pap. FPL 460. 43 p. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1985.

BIAGGI, M. L.S.; MEDVID, M. ASSIS, C.M.C. **Fator de inflação da variância e regressões auxiliares para diagnóstico do problema de multicolinearidade nos modelos de regressão. Inovações Científicas e Tecnológicas**. Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias. XIX COBREAP – Foz do Iguaçu. 2017.

BIANCHI, O.; DAL CASTEL, C.; OLIVEIRA, R. V. B. **Avaliação da degradação não-isotérmica de madeira através de termogravimetria - TGA**. Polímeros, v. 20, n. especial, p 395-400, 2010.

BOTOSO, P. C. **Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento**. Embrapa Florestas, 2011. 65 p.

BRITISH STANDARD. **BS 373**: Methods of testing small clear specimens of timber. London, 1957.

BRITO, J. O. ; BARRICHELO,, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia**. n.2. 1981. 25p. (Série Técnica. IPEF).

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. **Densidade básica e retratibilidade da madeira de Eucalyptus grandis, submetida a diferentes temperaturas de Termorreificação**. CERNE, vol. 12, núm. 2, abril-junho, 2006, pp. 182-188, Universidade Federal de Lavras. Brasil.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural design for fire safety**. Second Edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2017.

BUCHANAN, A.; ÖSTMAN, B.; FRANGI, A. **Fire resistance of timber structures**. A report for the National Institute of Standards and Technology. Draft report 31 March, 2014.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. LTC Livros Técnicos e Científicos, Editora SA. Rio de Janeiro. 5^a. ed. 620p. 2002.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros**. Um curso básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2^a ed. 280p. 2006.

CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CASTRO, A. F. N. M.; PIMENTA, A. S. P.; PINTO, E. M.; ALVES, I. C. N. **Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do Seridó, Rio Grande do Norte**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1153-1163, 2013.

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. **Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos**. Ciência Florestal, Santa Maria, v.26, n.2, p-389-400, 2016.

CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. **Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas.** Quim. Nova, Vol. 28, No. 2, 255-263, 2005.

COLLIER, P. C. R. 1992. **Charring rates of timber.** Building Research Association of new Zealand. study Report SR 42. Judgeford, New Zealand.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; SILVA, V.P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio.** In: Seminário Internacional NUTAU 2006: Inovações tecnológicas e sustentabilidade, 2006, São Paulo.

CURY, G. Descrição da estrutura anatômica do lenho e sua aplicação na identificação de espécies arbóreas do cerrado e da Mata Atlântica do Estado de São Paulo. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2002.

D'ALMEIDA, M. L. **Composição química dos materiais lignocelulósicos.** Cap. III In: Celulose e Papel - Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. Vol. I. IPT/SENAI, 2a edição, p. 45 - 105, 1988.

DE MICCO, V.; BALZANO, A. WHEELER, E. A.; BAAS, P. **Tyloses and gums: A review of structure, function and occurrence of vessel occlusions.** IAWA Journal / International Association of Wood Anatomists. 37(2), 2016:186 – 205.

DIAS, F. M. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. 145f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. SCIENTIA FORESTALIS n. 65, p.102-113, 2004.

DINWOODIE, J. M. **Durability of timber.** Capítulo 8. In: Timber—its Nature and Behaviour. Second edition. Taylor & Francis e-Library, 2004.

ESTEVES, B. M., PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. Bioresources 4(1), 370-404. 2009.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. **EN 1995-1-2.** Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels, Belgium, 2004.

_____. **EN 384.** Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels, Belgium, 2004.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; **Wood Chemistry, Ultrastructure and Reactions**, 1st ed., Walter de Gruyter: Berlin, 1989.

FIGUEIRA M. M. C. **Identificação de outliers.** MILLENIUM n.º 12 - Outubro de 1998. <http://www.ipv.pt/millennium/arq12.htm>

FIGUEIREDO, A. F.; VIANNA, M. E.; CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L.; VALE, F. **Metodologia para análise da influência do fogo na anatomia da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis***. In: CIMAD 11 - 1o CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 2011. Dep. de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2011. CD-ROM. p. 1-6.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. (2009). **Wood behaviour at high temperatures**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB). **Florestas do Brasil em resumo - 2013**: dados de 2007-2012. Brasília, 2013.

FRIEDLI, S. **Cálculo 1**. (Apostila). Departamento de Matemática. Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais. Versão 1.0. 2013.

FRIQUIN, K. L. **Charring rates of heavy timber structures for Fire Safety Design**. A study of the charring rates under various fire exposures and the influencing factor. Tese (doutorado). Trondheim, Norwegian University. 2010

FRIQUIN, K. L. **Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber**. Fire and Materials, Vol.35(5), pp.303-327. 2011.

GALVÃO, A. P. M. **Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil**. IPEF n.11, p.53-65, 1975.

GARCÍA, C. S. **Determinación de la higroscopicidad y comportamiento termodinámico de la madera juvenil y madura a través de sus isotermas de sorción**. Tese (doutoral). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 2015.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA**. HOLOS, Ano 32, Vol. 1, 2016.

GARDNER, W. D.; SYME, D. R. **Charring of glued-laminated beams of eight australian-grown timber species and the effect of 13 mm gypsum plasterboard protection on their charring**. N.S.W. TIMBER ADVISORY COUNCIL LTD. Sydney, 1991.

GERARD, R.; BARBER, D.; WOLSKI, A. **Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings**. Final Report. Arup North America Ltd. Fire Protection Research Foundation, 2013.

GERRY, E. **Tyloses: their occurrence and practical significance in some American woods**. Journal of Agricultural Research. v1, n.6: 445-469. 1914.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. **Moisture Relations and Physical Properties of Wood**. Capítulo 4: In: WOOD HANDBOOK . Wood as an engineering material. General Technical.

Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

GONZAGA, A. L. **CADERNOS TÉCNICOS**. Vol. 6 - **Madeira: uso e conservação**. Edição: 2006. p. 246. Publicação: IPHAN/Programa Monumenta.

GONÇALVES, T. A. P.; RANGEL, A.; SCHEEL-YBERT, R. **Anatomia do lenho de espécies de Anacardiaceae e Annonaceae em amostras carbonizadas**. IX Simpósio Nacional Cerrado. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. II Simpósio Internacional Savanas Tropicais. Brasília, DF. 2008.

GUIMARÃES, P. P. O. **Sobre o dimensionamento do revestimento contra fogo de estruturas de aço**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

HAKKARAINEN, T. **Post-Fire Assessment of Structural Wood Members. Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments**. VTT Building and Transport, Fire Research,; P.O. Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland (Received October 16, 2001). *Journal of Fire Sciences*. 2002.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. São Paulo, 1982.

HIETANIEMI, J. A **Probabilistic Approach to Wood Charring Rate**. VTT Building and Transport. Working Papers. 53 p. Finland. 2005.

HUGI, E.; WEBER, R. **Fire behavior of tropical and European wood and fire resistance of fire doors made of this wood**. *Fire technology*, 48, 679-698, 2012.

HUGI, E.; WUERSCH, M.; RISI, W. E WAKILI, K. G. **Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species**. *J Wood Sci* 53:71–75. 2006.

INSIDE WOOD (2004)

<http://insidewood.lib.ncsu.edu/search;jsessionid=6F40D39D1C98AD16CF25C4F0537E3799?0>

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil** / [coordenação Augusto Rabelo Nahuz]. São Paulo, 2013.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS (IAWA). *Bulletin* n. s. 10 (3): 219–332. 2007.

INTERNATIONAL BUILDING CODE (IBC). INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC. USA, 2018.

INTERNATIONAL CODE OF NOMENCLATURE (ICN) for algae, fungi, and plants. (Melbourne Code). Koeltz Scientific Books. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1182**: Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test. Geneva, 2010.

_____. **ISO 1716**: Reaction to fire tests for products. Determination of the gross heat of combustion (calorific value). Geneva, 2018.

_____. **ISO 3131**: Wood - Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, 1975.

_____. **ISO 834-1: Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements.** Geneva, 1999.

JAPAN STANDARDS ASSOCIATION (JSA). **JIS A 1304: Method of fire resistance test for structural parts of buildings,** 2017.

JANKOWSKY, I. P.; BRANDÃO, A. T. O.; OLIVEIRA, H.; LIMA, J. C.; MILANO, S. **Estimativas da umidade de equilíbrio para cidades da região sul do Brasil.** ESALQ-USP, Depto de Ciências Florestais. IPEF, n.32, p.61-64,1986.

JESUS, J. M. H.; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. **Classes de Resistência de Algumas Madeiras de Mato Grosso.** E&S - Engineering and Science, (2015), 3:1.

JONG, F., CLANCY, P. **Compression properties of wood as functions of moisture, stress and temperature.** FIRE AND MATERIALS. Fire Mater. 2004; 28:209–225 (DOI: 10.1002/fam.859).

KARACABEYLI, E. et al. **Technical Guide for the design and construction of tall wood buildings in Canada.** Fire safety and protection. SPInnovations. Guide 90% Draft. 374p. 2013.

KLIPPEL, M.; SCHMID, J.; FRANGI, A. **The Reduced Cross-Section Method for timber members subjected to compression, tension and bending in fire.** CIB-W18/ 45-16-1, Meeting 45 in Växjö, Sweden, 2012.

KLOCK, U., MUÑIZ G. I. B., HERNANDEZ, J. A., ANDRADE, A. S. **Química da madeira.** Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Universidade Federal do Paraná. (3ª. Edição revisada). Curitiba. 2005.

KOLLMANN, F. **The mechanical properties of wood of different moisture content with in -200 °C to + 200 °C temperature range.** National Advisory Committee for Aeronautics. Technical memorandum. Nº 984. VDI - Forschungsheft 403, XI Bd.p. 1-18. 1940.

KÖNIG, J.; NORE'N, J.; OLESEN, F.B.; HANSEN, F.T. **Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires – Part 1: fire tests.** Report I 9702015. Stockholm: The Swedish Institute for Wood Technology Research. 128p. 1997.

KÖNIG, J., WALLEIJ, L. **Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires – Part 2: a design model for standard fire exposure.** Report I 0001001. Stockholm: The Swedish Institute for Wood Technology Research. 76p. 2000.

KÖNIG, J. **Notional versus one-dimensional charring rates of timber.** Engineered Wood Products Association. Wood Conference on Timber Engineering WCTE, 2004.

KÖNIG, J. **Structural fire design according to Eurocode 5.** Design rules and their background. FIRE AND MATERIALS. Fire Mater. 29:147–163. 2005.

KÖNIG, J. **Effective thermal actions and thermal properties of timber members in natural fires.** Fire and Materials. Fire Mater; 30:51–63. 2006.

KRETSCHMANN, D. Wood Handbook, Chapter 05: **Mechanical Properties of Wood**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 5-1 - 5-46. Chapter 5. 2010

LANGE, D.; BOSTROM, L.; SCHMID, J.; ALBREKTSSON, J. **The influence of parametric fire scenarios on structural timber performance and reliability**. SP Swedish Technical Research Institute. Report No. 2014:35, ISBN 978-91-87461-78-1. Borås, Sweden, 2014.

LAU, P. W.; WHITE, R.; VAN ZEELAND, I. **Modelling the Charring Behaviour of Structural Lumber**. Fire and Materials. 23, 209-216 1999.

LAW, A.; HADDEN, R. M. **Burnout means Burnout**. SFPE Europe Magazine, Issue 5, Q1. 2017.

LEAL, S. C. S. **Avaliação do comportamento mecânico de madeira antiga de carvalho proveniente de incêndio**. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

LENTH, C. A. **Wood material behavior in severe environments**. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Tese (Doutorado) in Wood Science and Forest Products. May 1999. Blacksburg, Virginia.

LENTH, C.; KAMKE, F. **Equilibrium moisture content of wood in high-temperature pressurized environments**. Wood and Fiber Science, v. 33, n.1, p. 104-118, 2001.

LEROY, V.; LEONI, E.; CANCELLIERI, D. **Thermal Degradation of Lignocellulosic Fuels: Biopolymers Contribution**, Biopolymers, Magdy Elnashar (Ed.), ISBN: 978-953-307-109-1, In Tech, 2010.

Available from: <http://www.intechopen.com/books/biopolymers/thermal-degradation-of-lignocellulosic-fuels-biopolymers-contribution->

LIE, T. T. **A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns**. Canadian J. Civil Engineering, v.4, n. 2, 161-169. 1977.

<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc15946/nrcc15946.pdf>

LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M.; CRUZ, C.R. **Comparação entre métodos para estimação da umidade de equilíbrio em madeiras**. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VII EBRAMEM), São Carlos-SP, - RESUMOS, p. 12-12. 2000.

LINDEN, R. **Técnicas de Agrupamento**. Revista de Sistemas de Informação da FSMA. n. 4, p. 18-36. 2009.

LOBÃO, M.S.; CHAGAS, M. P.; COSTA, D. S. P.; FERREIRA, A. T. B.; SETTE JR, C. R.; CARVALHO, I. L.; TOMAZELLO Fº, M. **Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira**. Cerne, Lavras, v. 16, n. spl., p. 97-105, jul. 2010.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira.** São Carlos, 174p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.

LOGSDON, N. B.; ESTEVES, M. A. **Avaliação dos estimadores da resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras.** Revista Madeira Arquitetura & Engenharia, n. 22, ano 9, 2008.

LOGSDON, N. B.; JESUS, J. M. H.; PENNA, J. E. **Avaliação dos estimadores da resistência característica à compressão paralela às fibras.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 579-587, dez. 2010.

MANRIQUEZ, M. J. **Influência da Temperatura sobre as Propriedades Mecânicas do Paricá.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MANRIQUEZ, M. J.; MORAES, P. D. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas.** Ambiente construído, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 157-174. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 2009.

MANRÍQUEZ Figueroa, M. J. **Coefficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura.** 259 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2012.

MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas.** (Tese em Ciências Florestais). Departamento de Engenharia Florestal. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 2008.

MARTIN, A. R.; MATTOSO, L. H. C. **Estudo do comportamento térmico de fibras de sisal e seus componentes através de DSC.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14., 2000, São Pedro - SP. Anais.

MARTINS, G. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio.** 2016. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MARTINS, G. C. A.; ROCHA, F. M.; ALMEIDA, S. J. C.; MOLINA, J. C.; KIMURA, E. F. A.; Munaiar Neto, J.; CALIL JÚNIOR, C. **Estudo experimental de uma viga de madeira**

laminada colada em temperaturas elevadas. XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Natal, RN, 2014.

MASCIA, N. T. **Teoria das Deformações.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. Departamento de Estruturas, Campinas. São Paulo. 2017.

MELLADO, E. C. R. E. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus.** [Tese de Doutorado]. Universidade Federal do Paraná. 2007.

MELO, J. E. de; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. **Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira**. Silvicultura, São Paulo, v. 12, n. 42, p. 695-699, 1992.

MELO, R. R.; ARALDI, D. B.; STANGERLIN, D. M.; MÜLLER, M. T.; GATTO, D. A. **Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais**. Pesquisas Agrárias e Ambientais. Nativa, Sinop, v. 01, n. 01, p. 01-07, 2013.

MENDES M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. (Série de Publicações Técnicas, 8). Belo Horizonte, MG. 1982.

MIRANDA, I. C. **Estudo dos parâmetros cinéticos de decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos e caracterização por TA, FTIR, e EDXRF**. Tese (doutorado em Ciências) - Universidade Federal do rio de Janeiro - UFRJ, 2013.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; KIMURA, E. F. A.; PINTO, E. M.; REGOBELLO, R. **Análise Numérica do Comportamento de Elementos de Madeira em Situação de Incêndio**. Floresta e Ambiente; 19(2):162-170. 2012.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Tradução: Calado, V. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Segunda Edição. LTC Editora. Rio de Janeiro – RJ. 2003.

MORAES, P. D. **Influence de la temperature sur les assemblages bois**. L'Université Henri Poincaré, Nancy 1. Tese (Doutorado em Ciências da madeira). 211 p. 2003.

MORAES, P. D. **Projeto de edificações visando à segurança contra incêndio**. In: Anais do X ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2006, São Pedro, SP, Brasil.

MUÑIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; SHARDOSIN, F. Z. ; FRANCA, R. F. **Anatomia do carvão de espécies florestais**. CERNE [online], vol.18, n.3, pp.471-477. 2012.

NAGAOKA, T.; KODAIRA, A.; UEHARA, S. **Relationship between density and the ignitability and combustibility of wood**. In: Proceedings of the Asia-Oceania Symposium on Fire Science e Technology, International Association for Fire Safety Science, p.197-208. 1988.

NAHUZ, A. R. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil** / [coordenação Augusto Rabelo Nahuz]. Publicação IPT; 4371. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, 2013.

NBCC:1996. **National Building Code of Canada**, National Research Council, Ottawa, ON.

NJANKOUO, J. M.; DOTREPPE, J. C.; FRANSSSEN, J. M. **Experimental Study of the Charring Rate of Tropical Hardwoods**. Fire and Materials, v. 28, p. 15-24, 2004.

NJANKOUO, J. M.; DOTREPPE, J.C. e FRANSSSEN, J.M. **Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models**. Construction and Building materials, 19, 376-386. 2005.

NOGUEIRA M. C. J.A.; MORAES, J. G. ; LOGSDON, L.; NOGUEIRA J. S. **Propriedade térmica: determinação em madeiras nativas do estado de Mato Grosso**. I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 18-21 julho 2004, São Paulo. ISBN 85-89478-08-4.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A. ALMEIDA, M. R. **Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. In. Carvão vegetal

destilação, propriedades e controle de qualidade. (Série de Publicações Técnicas, 6). Belo Horizonte, MG. 1982.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa: UFV, 2003. 122p.

OLIVEIRA, L. S. **Estudo químico e biológico da madeira de lei *Hymenolobium Petraeum* (Angelim pedra)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CCEN. Recife, PE. 133p. 2011.

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies de madeiras tratadas termicamente**. 123 p. Tese (Doutorado em Ciências/Física Aplicada) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ÖSTMAN, B.A., MIKKOLA, E., STEIN, R., FRANGI, A., KÖNIG, J., DHIMA, D., HAKKARAINEN, T. AND BREGULLA, J. **Fire safety in timber buildings**. Technical guideline for Europe. SP Report 2010:19. Except of chapters 5-7 on Structural fire design –SP Technical Research Institute of Sweden. SP Träteknik. Stockholm, Sweden. 2010.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, ANA M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. **Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria**. Rev. Árvore, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; Carvalho, A. M. M. L.; Oliveira, A. C.; Santos, L. C.; Carneiro, A. C. O.; Magalhães, M. A. **Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus***. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PETTERSEN, R. C. **The Chemical Composition of Wood**. U.S. Department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 5370. American Chemical Society.1984.

PIAZZA, M.; TOMASI, R.; Modena, R. **Strutture in legno**. Materiale, calcolo e progetto secondo Le nuove normative europee. Biblioteca Tecnica Hoepli. Milano. 2005.

PINHEIRO, W. **Estimadores da resistência mecânica característica da madeira**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo para taxa de carbonização transversal à grã para a madeira de *E. citriodora* e *E. grandis***. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2005.

PINTO, E. M.; Calil Jr., C. **Estudo da taxa de carbonização da madeira de cupiúba, *Goupia glabra***. XI Encontro Brasileiro Em Madeira e Estruturas de Madeira. Londrina –2008.

POLETTO, M. **Degradação térmica e aspectos morfológicos de quatro espécies de madeira provenientes da indústria madeireira**. Revista *Árvore*, vol.40, nº 5. Viçosa, 2016.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural timber design to Eurocode 5**. Blackwell Publishing Ltd. United Kingdom. 2007.

RICHTER, H.G.; DALLWITZ, M..J. 2000 onwards. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 25th June 2009. <http://delta-intkey.com>.

ROWEL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2a ed. 695 p. 2012.

SALES, A. **Sistema de classes de resistência para dicotiledôneas**: revisão da NBR 7190/97. MADEIRA: arquitetura e engenharia, n.13, artigo 9, 2004. ISSN 1806-6097.

SANTANA, M.A.E.; OKINO, E.Y.A. **Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species**. *Holzforschung*, Berlim, vol. 61, p. 469- 477, 2007.

SANTINI JÚNIOR, L. **Descrição macroscópica e microscópica da madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo** - Programas "São paulo Amigo da Amazônia" e "Cadmadeira" / Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Piracicaba, 2013.

SANTOS I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose, extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado** [dissertação]. Brasília: Universidade de Brasília; 2008.

SANTOS, M. P.; OLIVEIRA, A. M. **Análise da influência do aumento de temperatura e do tipo de madeira nas resistências à compressão de *Dinizia excelsa* e de *Aspidosperma polyneuron***. Anais eletrônicos do XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. IBRAMEM - LaMEM – SET - EESC – USP. 2018.

SCHAFFER, E. L. **Charring rate of selected wood-transverse to grain**. FPL 69. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 1967.

SCHAFFER, E. L. **State of structural timber fire endurance**. *Wood and Fiber* 9(2): 145; 1977.

SCHAFFER, E. L. **Review of information related to the charring rate of wood**. Research note. FPL 0145. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 1966. Slightly Revised 1980.

SCHAFFER, E. L. **Structural fire design: Wood**. Res. Pap. FPL 450. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1984. 16 p.

SCHAFFER, ERWIN L.; MARX, CATHERINE M.; BENDER, DONALD A.; WOESTE, FRANK E. **Strength validation and fire endurance of glued-laminated timber beams**. Res. Pap. FPL 467. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1986. 16 p.

SCHEEL-YBERT, R.; GONÇALVES, T. A. P. **Primeiro atlas antracológico de espécies brasileiras**. First anthracological atlas of Brazilian species -- Rio de Janeiro: Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SCHMID, J.; KLIPPEL, M.; JUST, A.; FRANGI, A. **Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method**. v. 68. Fire Safety Journal. 2014(a).

SCHMID, J.; JUST, A.; KLIPPEL, M.; FRANGIACOMO, M. **The Reduced cross-section methodh for evaluation of the fire resistance of timber members: discussion and determination of the zero –strength layer**. Fire Technology 2014(b). Springer Science + Bussiness Media New York.

SCHNEID, E. **Influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento da madeira**. Tese (doutorado). Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; SILVA, ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. Projeto Editora. São Paulo. 2008.

SILVA, A. C.; SILVA, M. N. P.; SILVA, M. B. C.; VASCONCELLOS, F. J. **Noções básicas de anatomia da madeira**. Centro de Ensino e Pesquisas Florestais. Instituto de Tecnologia do Amazonas – UTAM. Estado do Amazonas. 1994.

SILVA, D.A., TRUGILHO, P.F. **Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas**. CERNE, V.9, N.1, p.056-065, 2003.

SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. Dissertação (Mestrado - Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. 2007.

SILVA D. A, ALMEIDA V. C., VIANA L. C., KLOCK U., MUNIZ G. I. B. **Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR**. Floresta e Ambiente 2014; 21(4): 561-568. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.043414>.

SIMPSON, W. T. **Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models**. Forest products Laboratory, Forest Service, U. S. department of Agriculture, Madison, Wisconsin 53705. 1973.

SIMPSON, W.T. 1971. **Equilibrium moisture content prediction for wood**, Forest Products Journal, 21(5): 48-49.

SNIF. Portal do Sistema Nacional de Informações Florestais. **Serviço Florestal Brasileiro**. Disponível em: < snif.florestal.gov.br >. Acesso em: 04/08/2018.

SOARES, R. C. **Reportando propriedades da madeira ao teor de umidade de referência**. Cuiabá - MT, 2014. 162p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso.

SOARES, R. C., LOGSDON, N. B., JESUS, J. M. H. **Reportando a densidade da madeira ao teor de umidade de referência**. 4:2. Engineering and Science, 2015.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis em diferentes idades**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Lavras, 2011.

SOSSAE, R. C.; SABLÓN, V. I. B.; YACOUB, M. N. R. D. **Ensino de derivadas no curso de engenharia**. Revista Ciência e Tecnologia, [S.l.], v. 8, n. 13, jan. 2010. ISSN 2236-6733.

SOUZA, J. U. B. R. **Técnicas multivariadas na análise química de espécies florestais amazônicas**. Monografia. Departamento de Engenharia Florestal, da Faculdade de Engenharia Florestal - Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá-MT, 2017.

SUÁREZ, A. C.; TANCREDI, N.; PINHEIRO, P. C. C; YOSHIDA, M. I. **Thermal analysis of the combustion of charcoals from Eucalyptus dunnii obtained at different pyrolysis temperatures**. Journal of Therm Anal Calorim (2010) 100:1051-1054.

TOMAZELLO FILHO, M.; CHIMELO, J. P.; GARCIA, P. V. **Madeiras de Espécies Florestais do Estado do Maranhão: II - Caracterização Anatômica**. IPEF, n.23, p.29-36, abr.1983

VAN ZEELAND I. M.; SALINAS, J. J.; MEHAFFEY, J. R. **Compressive strength of lumber at high temperatures**. Fire and Materials. Fire Mater. 2005; 29:71–90.

VAN ZEELAND, I. M. **Modelling of dimensional lumber in axial compression at elevated temperatures**. Tese (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e de meio Ambiente. Carleton University. Ottawa, Ontário. Canadá. 2000.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 215 p. Santa Maria RS – Brasil. UFSM, CCNE, 2005.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. S.; VALLE, M. L. A. **Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (Schizolobium amazonicum)**. Revista Árvore, v.36, n.2, p.365-371, 2012.

VIDAURRE G. B.; SILVA, J. G. M.; CASTRO, M.; COELHO, J. C. F.; BRITO, A. S.; MOULIN, J. C. **Relação da grã com algumas variáveis do crescimento e propriedades da madeira de Khaya ivorensis**. Sci. For., Piracicaba, v. 45 n. 114 p. 249-259, jun. 2017.

WHITE, R. H. **Charring Rates of Different Wood Species**, PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, 1988a.

WHITE, R. H. **Analytical methods for determining fire resistance of timber members.** The SFPE handbook of fire protection engineering. Quincy, MA: National Fire Protection Association: 3-130-3-142. Chapter 8. 1988b.

WHITE, R. H. **Fire performance of hardwood species.** Forest Products Laboratory. Apresentado no XXI IUFRO World Congress, 7-12 August 2000, Kuala Lumpur, Malaysia.(a)

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. **Fire Safety of Wood Construction.** In: Wood Handbook, Chapter 18. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

WHITE, R. H.; NORDHEIM, E. V. **Charring rate of wood for E 119 exposure.** Fire Technology. v. 28, n.1. 1992.

WIESNER, F. BISBY, L. **The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis.** Fire Safety Journal. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.04.009>.

WOOD HANDBOOK —**Wood as an engineer-ing material.** General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

YANG, J. L.; EVANS, R. **Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density.** Holz als Roh- und Werkstoff 61. 449–452. 2003.

YANG, G.; JAAKKOLA, P. **Wood chemistry and isolation of extractives from wood.** Literature study for BIOTULI project. Saimaa University of Applied Sciences. 2011.

ZANGIÁCOMO, A. L. (2003). **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** São Carlos, 2003. 78p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.

ZHAN, T.; JIANG, J.; LU, J. **The Viscoelastic Properties of Chinese Fir During Water-Loss Process Under Hydrothermal Conditions.** Drying Technology, 33: 1739–1745, 2015.

ZENID, G. J. **Madeira: uso sustentável na construção civil** /Geraldo José Zenid , coordenador 2. ed. --São Paulo : Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009 - (Publicação IPT, 3010).

ZENID, G. J., CECCANTINI, . G. C. T. **Identificação Macroscópica de Madeiras.** Laboratório de Madeira e Produtos Derivados. Centro de Tecnologia de Recursos Florestais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A - Artigo Cerne 2010

CARRASCO, E. V. M.; CALDAS, R. B.; OLIVEIRA, A. L. C.; FAKURY, R. H. Análise numérica da transferência de calor em madeiras brasileiras em situação de incêndio. CERNE (UFLA), v. 16, p. 58-65, 2010.

ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM MADEIRAS BRASILEIRAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹, Rodrigo Barreto Caldas²,
Ana Lúcia Crespo Oliveira³, Ricardo Hallal Fakury⁴

RESUMO: A partir de resultados experimentais da elevação de temperatura em madeiras brasileiras expostas ao fogo, apresenta-se uma comparação com resultados numéricos para a distribuição de temperatura. Os modelos numéricos utilizam elementos finitos lineares de quatro nós para análise da transferência de calor em domínios sólidos com condições de contorno em convecção e radiação ou temperaturas prescritas em situação de incêndio. As propriedades da madeira adotadas para o cálculo das temperaturas são tomadas com base na normalização europeia. Os resultados obtidos neste trabalho indicam a necessidade de ajustes nas seguintes propriedades apresentadas pela normalização europeia: calor específico, condutividade térmica e variação de densidade, com o objetivo de adequar à análise de transferência de calor em espécies brasileiras.

Palavras-chave: Transferência de calor, análise numérica, estruturas de madeira, incêndio.

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN BRAZILIANS WOODEN SPECIES EXPOSED TO FIRE

ABSTRACT: From experimental results of the temperature increase in Brazilians wooden species exposed to fire, a comparison with numeric results for the temperature distribution is presented. The numeric models use 4-node linear quadrilateral finite elements for the heat transfer analysis in solid domains with boundary condition in convection and radiation or prescribed temperatures in fire condition. The wood properties adopted for the temperatures calculation take in account the principles of the European normalization. The obtained results indicate the need of adjustments in the following properties presented by the European normalization: specific heat, thermal conductivity and density variation, with the goal to adjust the heat transfer analysis in Brazilians species.

Key words: Heat transfer, numeric analysis, wooden structures, fire.

1 INTRODUÇÃO

A madeira apresenta bom comportamento estrutural em situação de incêndio. Por ser um material combustível, é analisada com preconceito. No Brasil, essa situação ocorre por várias razões, como falta de normalização específica para dimensionamento de madeiras em situação de incêndio, carência de profissionais especializados em segurança contra incêndio e desconhecimento dos soldados dos corpos de bombeiros. Observa-se que os fatores convergem para a falta de informação fortemente ligada a poucas pesquisas nessa área.

A falha de elementos estruturais de madeira e de seus derivados ocorre, principalmente, pela redução da seção transversal resistente durante a exposição ao incêndio (PINTO, 2005). Essa redução pode ser calculada a partir da taxa de carbonização geralmente apresentada em unidades de comprimento por tempo (mm/min), representando a velocidade de carbonização (Figura 1).

Resultados experimentais apresentam relação aproximadamente linear entre tempo e profundidade de carbonização, medida da superfície original até a isoterma de 300°C (CARRASCO, 2009). A taxa de carbonização correlaciona-se com a densidade e o teor

¹Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – mantilla@dees.ufmg.br

²Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – caldas@dees.ufmg.br

³Engenheira Civil, Doutoranda em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – lucia@dees.ufmg.br

⁴Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – fakury@dees.ufmg.br

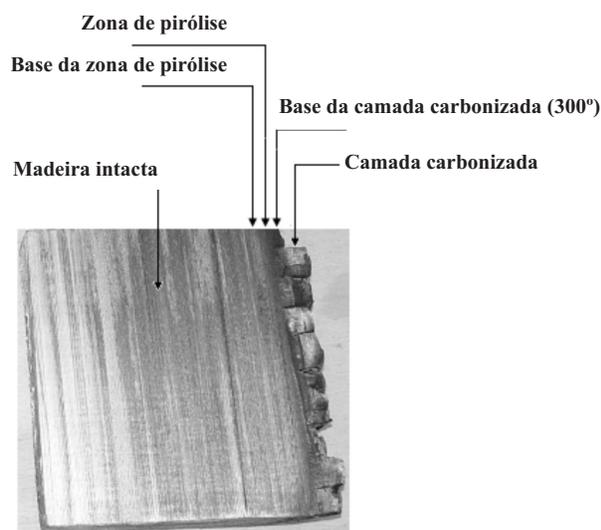


Figura 1 – Carbonização da madeira (15 minutos de exposição ao incêndio padrão).

Figure 1 – Wood charring (15 minutes of standard fire exposure).

de umidade para cada espécie de madeira (SCHAFFER, 1984; PINTO 2005). A permeabilidade, o teor de lignina e certos extrativos também influenciam a carbonização, justificando as diferenças entre as espécies (WHITE, 2000). A direção da carbonização em relação às fibras também exerce influência. Estudos demonstraram que, na direção longitudinal, a velocidade de carbonização é o dobro da velocidade na direção transversal às fibras (WHITE; DIETENBERGER, 1980; SCHAFFER, 1984).

A norma europeia EN 1995-1-2 (2004) apresenta, para folhosas, valores de taxa de carbonização iguais a 0,50 para madeira serrada ou madeira laminada colada (MLC), com densidade característica $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ e 0,65 mm/min para madeira serrada ou MLC, com densidade característica de 290 kg/m^3 , e valores iguais a 0,65 mm/min para coníferas na forma de madeira serrada ou MLC, com densidade característica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$.

Neste trabalho, os resultados experimentais da elevação de temperatura em corpos-de-prova da espécie brasileira conhecida popularmente como vinhático (CARRASCO, 2009) são comparados com os resultados obtidos numericamente, via método dos elementos finitos

ou MEF. As propriedades da madeira para cálculo das temperaturas foram tomadas com base na normalização europeia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Análise experimental

Os corpos-de-prova de madeira ensaiados tinham a forma cúbica com 150 mm de aresta. As espécies estudadas foram: *Plathymenia reticulata* (vinhático), *Cedrela fissilis* (cedro), *Tabebuia serratifolia* (ipê), *Manikara* spp (paraju), *Peltogyne* sp. (roxinho), *Dipteryx odorata* (cumaru), *Cordia hipoleuca* (louro) e *Eucalyptus grandis* (eucalipto).

O procedimento foi adaptado do ASTM E 119 (1995), utilizando-se um forno a gás de diâmetro interno de 600 mm e altura de 700 mm (Figura 2) (CARRASCO, 2009).

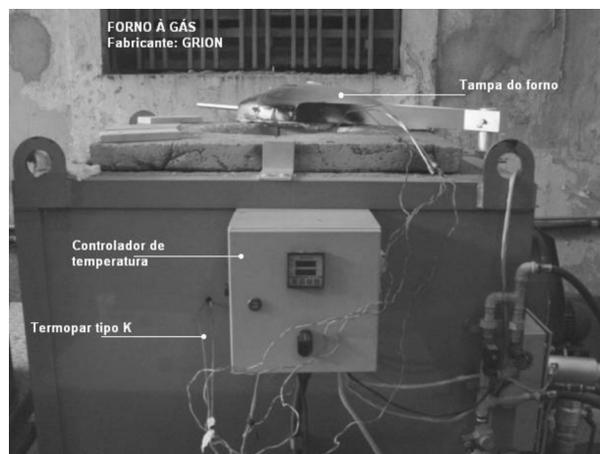


Figura 2 – Forno e seus componentes.

Figure 2 – Furnace and its components.

Sensores foram utilizados para medir a temperatura no interior do forno, na superfície e em cinco profundidades nos corpos-de-prova, os quais foram expostos ao fogo em apenas uma face e no sentido transversal às fibras. As demais superfícies foram protegidas por material isolante térmico (placa de fibra cerâmica e manta de fibra de vidro) e, em seguida, os

corpos-de-prova foram inseridos em uma caixa metálica (Figura 3).

Para validação da análise numérica foram utilizados os resultados da espécie vinhático. Além da elevação da temperatura, foram determinadas experimentalmente a densidade aparente (considerando as dimensões reais do corpo-de-prova) e o teor de umidade (ABNT NBR 7190, 1997, Anexo B). Para o vinhático, os valores obtidos foram de 12%, para o teor de umidade média e 594 kg/m³, para a densidade aparente média.

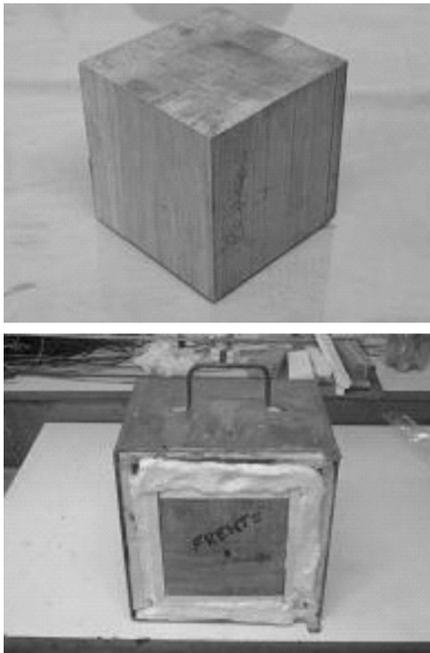


Figura 3 – Corpo-de-prova.

Figure 3 – Specimen

2.2 Análise numérica

A condução de calor em meios sólidos e em três dimensões (Figura 4) é governada pela equação diferencial,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{\psi} = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

em que $\dot{\psi}$ é a taxa de calor interno gerado; λ_x , λ_y e λ_z são as condutividades térmicas nas direções x, y e z, respectivamente; c é o calor específico; ρ é a densidade do material; $\theta(x, y, z, t)$ é o campo de temperaturas e t, o tempo. O campo de temperaturas que satisfaz a expressão 1 de condução de calor no domínio Ω deve satisfazer a certas condições de contorno, que podem ser: temperaturas prescritas numa parte Γ_θ do contorno; fluxo de calor prescrito Φ_p numa outra parte Γ_{Φ_p} ; transmissão de calor por convecção entre uma parte Γ_{Φ_c} , à temperatura θ , e os gases à temperatura θ_g , dado por

$$\Phi_c = \alpha_c (\theta - \theta_g), \quad (2)$$

em que α_c é o coeficiente de transmissão de calor por convecção; transmissão de calor por radiação no contorno Γ_{Φ_r} à temperatura θ , dado por

$$\Phi_r = \epsilon_{res} \beta (\theta^4 - \theta_g^4), \quad (3)$$

em que ϵ_{res} é a emissividade resultante da superfície e β é a constante de Stefan-Boltzmann.

O desenvolvimento de elementos finitos para análise de transferência de calor por condução pode ser visto em Caldas (2008). Neste trabalho, o programa ABAQUS (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2007) foi utilizado para calcular-se a elevação de temperatura via elementos finitos. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo tridimensional (Figura 5a), com elementos lineares de 8 nós, DC3D8. Porém, devido à simetria, um modelo bidimensional com elementos lineares de 4 nós, DC2D4, foi adotado, possibilitando tempos menores de processamento (Figura 5b).

Dois modelos foram analisados: um com temperaturas prescritas e outro com fluxos, devido à convecção e à radiação na superfície exposta. No modelo com temperatura prescrita, as temperaturas medidas experimentalmente na superfície do corpo-de-prova foram utilizadas. No outro modelo, os fluxos de calor devido à convecção e à radiação foram obtidos em função da temperatura do incêndio padrão (ABNT NBR 5628, 1980; ABNT NBR 14432, 2000).

Na Figura 6 são apresentadas as divisões que foram utilizadas para a geração da malha estruturada, juntamente com as profundidades em que foram medidas as temperaturas.

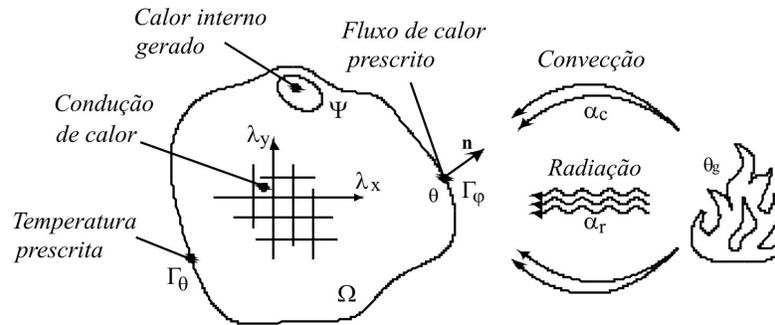


Figura 4 – Condições de contorno em problemas de condução de calor (CALDAS, 2008).

Figure 4 – Boundary conditions in heat conduction problems (CALDAS, 2008).

2.3 Propriedades térmicas do material

Segundo o EN 1995-1-2 (2004), o modelo de transferência de calor deve levar em conta a variação das propriedades térmicas do material com a temperatura. Para modelos que não consideram a transferência de massa, por exemplo, devido à vaporização da umidade, ou o aumento da transferência de calor devido à fissuração, as

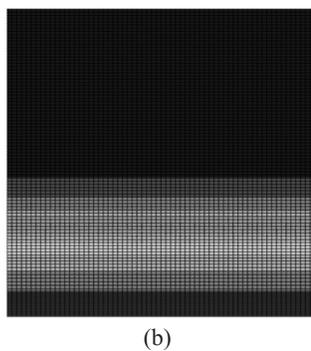
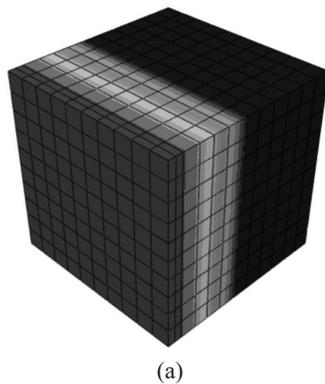


Figura 5 – Modelos: (a) tridimensional; (b) bidimensional.

Figure 5 – Models: (a) three-dimensional (b) two-dimensional.

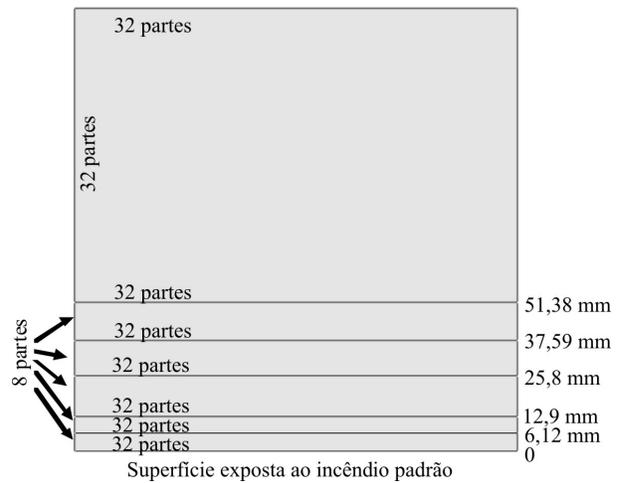


Figura 6 – Discretização do modelo e profundidades nas quais as temperaturas foram medidas.

Figure 6 – Discretization of the model and depths where temperatures were measured.

propriedades térmicas são frequentemente modificadas para dar resultados que podem ser verificados por ensaios.

Na Figura 7, têm-se os dados e o gráfico da condutividade térmica, em função da temperatura utilizada na análise numérica do vinhático, obtidos conforme o EN 1995-1-2 (2004).

Condutividade térmica W/m°C	Temperatura C°
0,12	0
0,12	20
0,15	200
0,07	350
0,09	500
0,35	800
1,50	1200

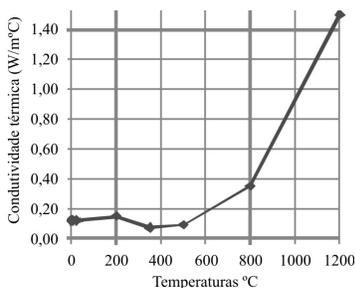


Figura 7 – Dados e gráfico da condutividade térmica, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

Figure 7 – Data and graph of temperature-thermal conductivity relationship, used in numerical analysis.

Calor específico J/kg K	Temperatura C°
1530	0
1530	20
1770	98
13600	100
13500	119
2120	121
2000	200
1620	250
710	300
850	350
1000	400
1400	600
1650	800
1650	1200

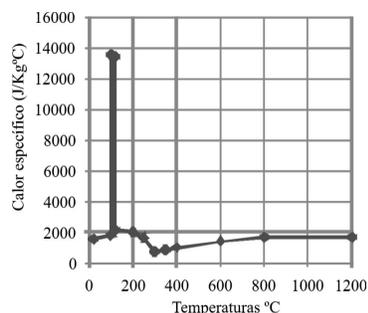


Figura 8 – Dados e gráfico de calor específico, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

Figure 8 – Data and graph of temperature-specific heat relationship, used in numerical analysis.

Densidade kg/m³	Temperatura C°
594	0
594	20
594	99
530	120
530	200
493	250
403	300
276	350
201	400
148	600
138	800
5	1200

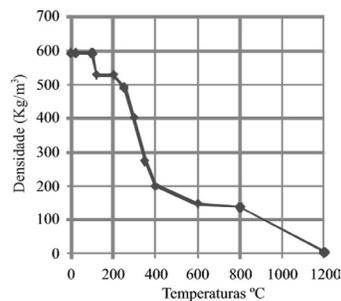


Figura 9 – Dados e gráfico da variação da densidade, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

Figure 9 – Data and graph of temperature-density relationship, used in numerical analysis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos e experimentais são comparados para o modelo com temperatura prescrita igual à obtida experimentalmente e para o modelo com fluxos de calor por convecção e radiação, em função da temperatura do incêndio padrão.

Na Figura 10 são apresentadas as temperaturas para o modelo com temperatura prescrita. Nota-se que as temperaturas na superfície do ensaio são praticamente as mesmas calculadas via MEF. o que era de se esperar, já que elas foram prescritas no modelo numérico.

Nota-se que, nas profundidades de 6,08 mm, 11,72 mm e 25,55 mm, os resultados numéricos apresentam boa concordância com os experimentais. Para a temperatura

de 300°C, os tempos de exposição são bem próximos, indicando que a carbonização (medida para essa isoterma) é bem predita pelo modelo numérico. Para as profundidades de 37,48 mm e 50,41 mm, o modelo numérico apresenta temperaturas menores do que as observadas no ensaio, indicando a necessidade de ajustes nas propriedades adotadas na simulação.

Na Figura 11 observa-se o campo de temperaturas calculadas para os tempos de 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos e 60 minutos. A escala de temperaturas foi limitada ao máximo de 300°C, indicando a profundidade da camada carbonizada.

Na figura 12 observam-se, novamente, os resultados experimentais em comparação aos resultados obtidos com o modelo com fluxo por convecção e

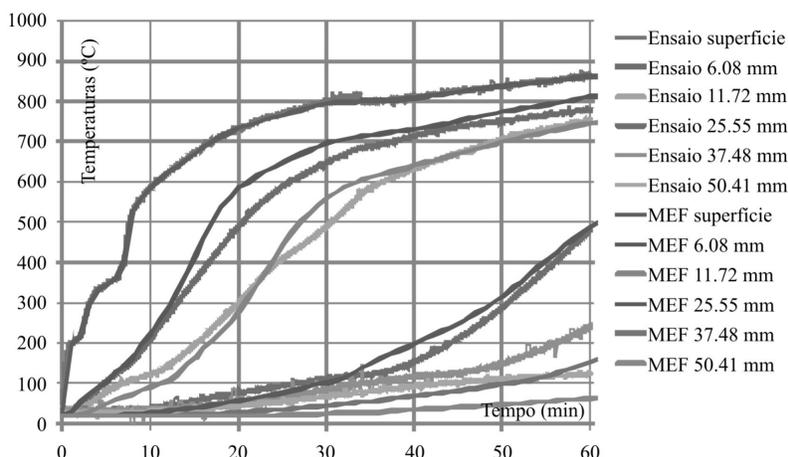


Figura 10 – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com temperatura prescrita.

Figure 10 – Experimental temperatures and temperatures calculated with the model with prescribed temperature.



Figura 11 – Aumento da temperatura, em graus Celsius, e da camada carbonizada da madeira, para os tempos de exposição ao incêndio de 15, 30, 45 e 60 minutos, respectivamente, da esquerda para direita.

Figure 11 – Increasing temperature, degrees Celsius, and char layer for the fire exposure time of 15, 30, 45 and 60 min, respectively, from left to right.

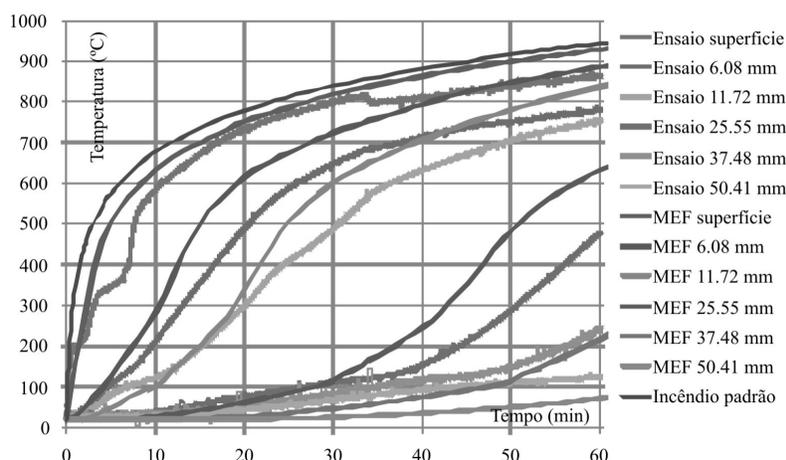


Figura 12 – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com fluxos por convecção e radiação.

Figure 12 – Experimental temperatures and temperatures calculated with the model with flows by convection and radiation.

radiação, em função da temperatura do incêndio padrão. Na simulação, o coeficiente de transmissão de calor por convecção foi tomado igual a $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e a emissividade resultante igual a 0,67, resultado da consideração das emissividades das superfícies do corpo-de-prova e das paredes do forno igual a 0,8 (EN 1991-1-2, 2002; EN 1995-1-2, 2004).

Observa-se que as temperaturas calculadas na superfície são superiores às medidas experimentalmente. Uma das justificativas para as diferenças, que ocorrem principalmente nos primeiros 10 minutos e depois dos 30 minutos de exposição, é a dificuldade de controlar as temperaturas no forno. Outras possibilidades são os coeficientes de transmissão de calor adotados nos cálculos. Observa-se que, além da temperatura na superfície, as calculadas para as profundidades de 6,08 mm e 11,72 mm também foram superiores às obtidas experimentalmente. Para a profundidade de 25,55 mm, as temperaturas calculadas são bem próximas às experimentais até o tempo de 30 minutos, a partir do qual aquelas superam as do ensaio. Para maiores profundidades, as temperaturas calculadas são sempre inferiores às obtidas experimentalmente, concordando com os resultados do modelo com temperatura prescrita.

4 CONCLUSÕES

Apresentou-se uma comparação dos resultados experimentais da elevação de temperatura na madeira da espécie vinhático, com resultados obtidos via MEF. As condições do ensaio conduzem a uma transferência de calor unidimensional a partir da exposição ao incêndio padrão de apenas uma face do corpo-de-prova. Dois modelos foram utilizados: um com temperatura prescrita igual à obtida no ensaio e outro com os fluxos de calor por convecção e radiação, considerando a temperatura do incêndio padrão.

As temperaturas do modelo numérico com temperatura prescrita foram mais próximas às obtidas experimentalmente, indicando que, para maiores profundidades, as temperaturas calculadas são inferiores às obtidas experimentalmente. Para o modelo numérico com fluxos de calor por convecção e radiação, as diferenças nas temperaturas calculadas e observadas experimentalmente foram maiores, porém, para maiores profundidades, o comportamento foi similar.

Ambos os modelos numéricos demonstram que, para maiores profundidades, as propriedades apresentadas pelo EN 1995-1-2 (2004) levam a temperaturas

inferiores às observadas experimentalmente, indicando a necessidade de adequação.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Fapemig, pelo apoio material e financeiro.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 119**: standard tests for fire tests of building construction and materials. Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1980.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2000.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. 2008. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CARRASCO, E. M. **Determinação de parâmetros experimentais para estruturas de madeira em situação de incêndio**: taxa de carbonização da madeira para uso estrutural. Belo Horizonte: Fapemig, 2009. (TEC, Relatório Técnico Final).

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. **Software ABAQUS/CAE**: versão 6.7. Rising Sun Mills, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1, actions on structures, Part 1.2: general actions, actions on structures exposed to fire. Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2**: Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1.2: General rules, structural fire design. Brussels, 2005.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o eucalyptus citriodora e eucalyptus grandis**. 2005. 1134p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SCHAFFER, E. L. **Charring rate of selected woods-transverse to grain**. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1967. (Forest Products Laboratory, 69).

SCHAFFER, E. L. **Structural fire design**: wood. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1984. (Forest Products Laboratory, 450).

WHITE, R. Fire performance of hardwood species. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 21., 2000, Kuala Lumpur. **Proceedings...** Kuala Lumpur: IUFRO, 2000. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/white00c.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2010.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. Fire safety. In: ROBINSON, J. L.; RECORDS, J. L. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1980. p. 17.1-17.13. (Forest Products Laboratory, 113).

Apêndice B - Modelos de predição de profundidade de carbonização para as espécies dos agrupamentos 1 e 2

Este Apêndice apresenta os detalhes das análises de regressão efetuadas neste trabalho de tese para a definição dos modelos de predição relativos à profundidade de carbonização, sendo:

B.1 – Modelo de predição de profundidade de carbonização para as espécies do agrupamento 1;

B.2 – Modelo de predição de profundidade de carbonização para as espécies do agrupamento 2.

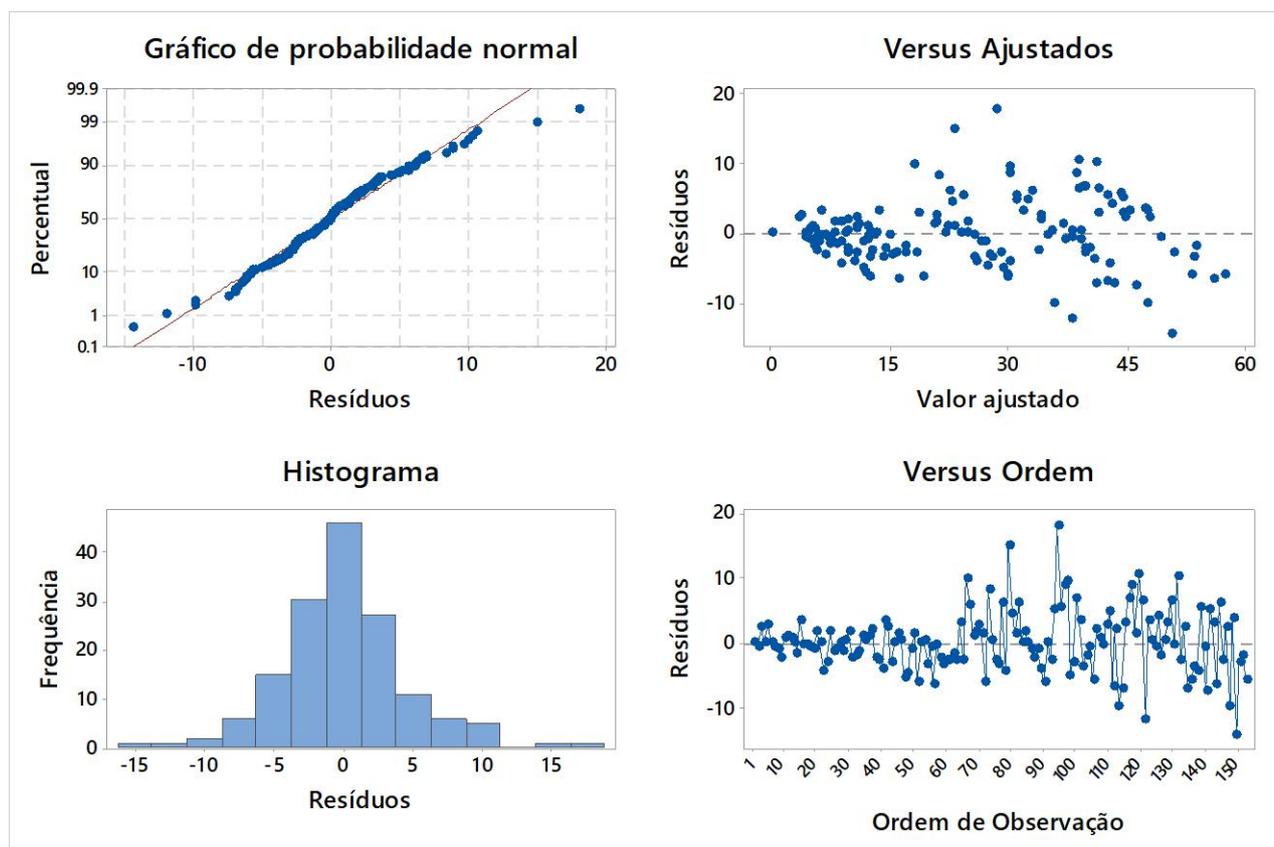
B.1 Modelo de predição de profundidade de carbonização para as espécies do agrupamento 1

Na regressão múltipla realizada com os itens que representam o Agrupamento 1 a quantidade de dados foi considerada suficientemente grande ($n = 152$) para se obter uma estimativa precisa da força da relação. A variável profundidade, P (mm) foi considerada variável resposta. As variáveis: tempo de exposição ao fogo, t (min) e tempo de exposição ao fogo *versus* densidade aparente, ρ_{ap} (kg/m^3) reportada a 12%, ($t \cdot \rho_{ap}$) foram consideradas variáveis preditoras.

O modelo desenvolvido não apresenta o termo constante (um intercepto y) garantindo-se que para o tempo inicial, $t = 0$, a profundidade de carbonização também seja zero, melhorando o ajuste do modelo e a precisão dos valores preditos. Identificou-se uma relação estatisticamente significativa entre a variável resposta e as variáveis preditoras, apresentando P -valor = 0000 ($< 0,005$) com um coeficiente R^2 de 97,42% da variação em P explicada pelo modelo; um R^2 ajustado igual a 97,39% e um $R^2(\text{pred})$ igual a 97,33% (a convergência destes três índices indicam a significância do modelo).

A Fig. B.1.1 apresenta os gráficos de Resíduos de P nos quais se evidencia que nos Gráficos de probabilidade normal; Resíduos \times ajustados, Histograma e resíduos \times Ordem existe uma aleatoriedade nos resíduos e os resíduos estão normalmente distribuídos.

Figura B.1.1 – Gráficos de Resíduos de profundidade, P (Agrupamento 1).



Realizou-se a Medida da distância Cook (D) para avaliação de presença de grandes resíduos e valores atípicos. Todas as observações atípicas apresentaram $D < 1$ significando não serem observações potencialmente influenciáveis nos modelos de regressão, segundo Montgomery e Runger (2003).

A análise de variância para o modelo da profundidade de carbonização com dados relativos ao Agrupamento 1 considerou para o cálculo do F crítico (F_{cr}) a alternativa unilateral com nível de confiança $\alpha = 0,05$; $p = 2$; Erro = 150; obtendo-se os resultados apresentados na Tab. (B.1.1).

Tabela B.1.1 - Análise de Variância - profundidade de carbonização - Agrupamento 1.

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F QM(v)/QM(E)	F_{cr}	Valor P
Regressão	2	97,42	62004,5	2836,73	(0,05;2;150), 3,00	0,000
t	1	96,59	7186,6	328,79	(0,05;1;150), 3,84	0,000
t . ρ_{ap}	1	0,84	1065,3	48,74	(0,05;1;150), 3,84	0,000
Erro	150	2,58	21,9			
Total	152	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; QM (Aj.): média quadrática ajustada; F calculado: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Fcr: estatística F crítica; Valor P: Estatística P.

A análise dos testes apresentados na Tab.(B.1.1) foram realizados para avaliar a significância da regressão e das variáveis do modelo. O **modelo de regressão** apresenta uma contribuição de 97,42%. A estatística F calculada (2836,73) é maior do que a estatística crítica Fcr (3,00) para P valor = 0,000 (< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão. As contribuições das variáveis preditoras ao modelo são: o tempo (t) contribui com 96,59% e o produto tempo *versus* densidade aparente ($t \cdot \rho_{ap}$) com 0,84%. As estatísticas F calculadas para as variáveis preditoras (328,79 e 48,74) são maiores do que as respectivas estatísticas F críticas (3,84) para P valor igual a 0,000 (< 0,05) e conclui-se que existem evidências de que estas variáveis preditoras sejam significativas para explicar a profundidade de carbonização com um nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos a serem utilizados no modelo de profundidade de carbonização do Agrupamento (1) considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; Erro = 150. Os resultados obtidos encontram-se na Tab (B.1.2).

Tabela B.1.2- Coeficientes para o modelo da taxa de carbonização do Agrupamento 1.

Termo	Coef	Valor T	Tcr	Valor P	VIF
t	0,8593	18,13	(0,005;150); 2,576	0,000	44,60
$t^2 \cdot \rho_{ap}$	- 0,000324	- 6,98	(0,005;150); 2,576	0,000	44,60

Sendo: Coef - Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Conforme a Tab. (B.1.2) os termos do modelo (t e $t \cdot \rho_{ap}$) apresentaram, para os seus respectivos coeficientes, módulos dos valores calculados para a estatística T (sendo: 18,13 e 6,98) maiores do que a estatística T crítica (2,576) associadas ao P valor (0,000) menor do que 0,01 deduzindo-se que os coeficientes sejam significantes. Os fatores VIF calculados para as variáveis preditoras (sendo: 44,60) são superiores a 5 oferecendo indícios de que estes preditores podem apresentar multicolinearidade sendo adequadas as suas inclusões na equação de regressão para prever a profundidade de carbonização do Agrupamento 1 (P_{A1}), com $R^2 = 97,42\%$, conforme Eq. (B.1.1).

$$P_{A1} = 0,8593 \cdot t - 0,000324 \cdot t \cdot \rho_{ap} \quad (B.1.1)$$

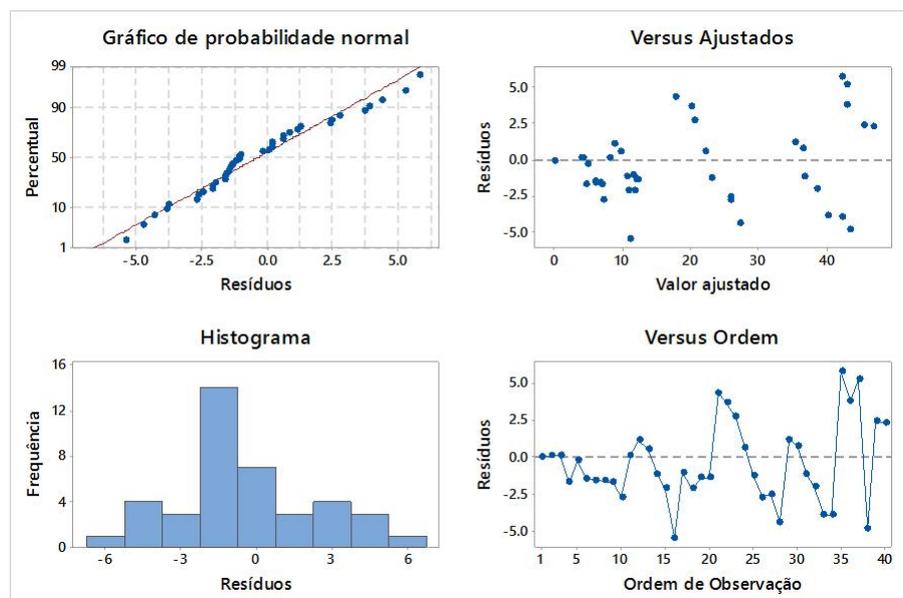
Para testar a presença de autocorrelação nos erros do modelo apresentado na Eq. (C.1.1) verificou-se a estatística de Durbin-Watson (DW) que apresentou, para $n = 152$ e 2 termos, o valor $DW = 1,85519$. Calculou-se: $D = 4 - DW = 4 - 1,85519 = 2,1448$ obtendo-se no Minitab (2007) os dados: $DL = 1,72161$ e $DU = 1,74807$. Verificando-se que $D = 2,1448 > DU$, constata-se que não existe correlação nos erros do modelo de regressão analisado para dados do Agrupamento 1.

B.2 Modelo de predição de profundidade de carbonização para espécies do agrupamento 2

Na regressão múltipla realizada com os itens que representam o Agrupamento 2 a quantidade de dados foi considerada suficientemente grande ($n = 40$) para se obter uma estimativa precisa da força da relação. A variável densidade aparente, ρ_{ap} (kg/m^3) reportada a 12%, apresentou contribuição de 0,20% associada a P valor de 0,278 maior do que 0,05 proposto, não sendo significativa a sua inclusão no modelo.

Por outro lado, a variável profundidade, P (mm), considerada variável resposta e a variável tempo de exposição ao fogo, t (min) considerada variável preditora apresentaram uma relação estatisticamente significativa com P valor $< 0,001$ com um coeficiente R^2 de 98,91% da variação em P explicada pelo modelo; um R^2 ajustado igual a 98,88% e um $R^2(\text{pred})$ igual a 98,81% (a convergência destes três índices indicam a significância do modelo). A Fig. B.2.1 apresenta os gráficos de Resíduos de P .

Figura B.2.1 – Gráficos de Resíduos de profundidade P - Agrupamento 2.



A análise da Fig. B.2.1 evidencia que nos Gráficos: de Probabilidade normal; Resíduos \times ajustados, Histograma e Resíduos \times Ordem existe uma aleatoriedade nos resíduos que se encontram normalmente distribuídos. Determinou-se a Medida da distância Cook (D) para avaliação da presença de grande resíduo. Todos os valores de D foram menores do que 1. Segundo Montgomery e Runger (2003), resíduos com $D < 1$ não são potencialmente influenciáveis nos modelos de regressão. Realizou-se a análise de variância para o modelo de profundidade de carbonização com dados relativos ao Agrupamento 2. Considerou-se a profundidade de carbonização (P, mm) como variável resposta e tempo de exposição ao fogo (t, min) e tempo de exposição ao fogo ao quadrado (t^2) e ao cubo (t^3) como variáveis preditoras. Para o cálculo do F crítico adotou-se a alternativa unilateral com nível de confiança $\alpha = 0,05$; $p = 1$; Erro = 39 obtendo-se os resultados apresentados na Tab. (B.2.3).

Tabela B.2.3 - Análise de Variância - profundidade de carbonização - Agrupamento 2.

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F QM(v)/QM(E)	Valor F _{cr}	Valor P
Regressão	1	98,91	25978,3	3529,04	(0,05;1;39), 4,09	0,000
t	1	98,91	25978,3	3529,04	(0,05;1;39), 4,09	0,000
Erro	39	1,90	7,4			
Total	40	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; QM (Aj.): média quadrática ajustada; F calculado: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; F_{cr}: estatística F crítica; Valor P: Estatística P.

Os testes apresentados na análise da Tab. (B.2.3) foram realizados para avaliar a significância da regressão e das variáveis do modelo. O modelo de regressão apresenta uma contribuição de 98,91% associada à estatística F calculada (3529,04) que é superior à estatística F crítica (4,09) para P valor = 0,000 ($< 0,05$ proposto) indicando a significância do modelo de regressão. O modelo contou com a contribuição de 98,91% da variável tempo de exposição ao fogo (t) que apresentou estatística F calculada (3529,04) superior à estatística F crítica (4,09) para P valor = 0,000 $< 0,05$ concluindo-se que existe forte evidência de que o tempo de exposição ao fogo seja variável significativa para explicar a profundidade de carbonização com um nível de confiança de 95%.

Para a análise do coeficiente individual do termo t, considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; Erro = 39 conforme a Tab (B.2.4).

Tabela B.2.4 - Coeficientes para o modelo da profundidade de carbonização do Agrupamento 2.

Termo	Coef.	Valor T	T _{cr}	Valor P	VIF
t	0,39032	59,41	(0,005; 39), 2,703	0,000	1,00

Sendo: Coef - Coeficiente; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Na Tab. (B.2.4) o termo do modelo (t) apresenta o módulo do valor para a estatística T calculada (59,41) maior do que a estatística T crítica (2,703) associada ao P valor igual a 0,000 menor do que 0,01, deduzindo-se que o coeficiente seja significativo. O fator VIF calculado para a variável t preditora (1,00) sendo menor do que 5 não apresenta indício de multicolinearidade sendo esta variável, portanto, adequada para prever a profundidade de carbonização do Agrupamento 2 (P_{A2}), conforme Eq. (B.2.2) que apresenta $R^2 = 98,91\%$.

$$P_{A2} = 0,39032 \cdot t \quad (B.2.2)$$

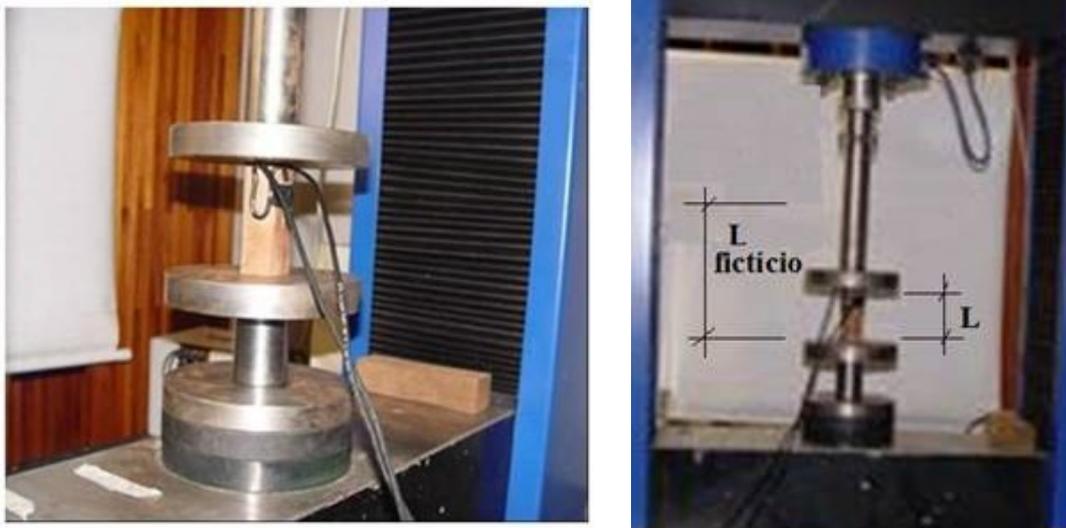
Para testar a presença de autocorrelação nos erros do modelo apresentado na Eq. (B.2.2) verificou-se a estatística de Durbin-Watson (DW) que apresentou, para $n = 40$ e 1 termo, o valor $DW = 1,36186$. Calculou-se: $D = 4 - DW = 4 - 0,649810 = 2,6381$ obtendo-se no Minitab (2007) os dados: $DL = 1,44214$ e $DU = 1,54436$. Verificando-se que $D = 2,6381 > DU$, constata-se que não existe correlação nos erros do modelo de regressão analisado para dados do Agrupamento 2.

Apêndice C

Calibração da medida de deformação no ensaio de compressão paralela

Primeiramente selecionou-se um corpo de prova que foi instrumentado com dois extensômetros elétricos da marca Kyowa tipo KL-6-120-A4, de seis (6) mm de comprimento. Os extensômetros foram conectados a um SAD e posicionados na máquina de ensaio, conforme as imagens mostradas na Fig. C.1.

Figura C.1 – Calibração da medida de deformação no ensaio de compressão.



O transdutor da máquina mede um deslocamento Δl que representa um somatório do deslocamento da viga de sustentação, do corpo de prova e do dispositivo de ensaio. A deformação da máquina relativa a este deslocamento é calculado conforme a Eq. (C.1).

$$\varepsilon_{máq} = \frac{\Delta l}{L_{fictício}} \quad (C.1)$$

Ao realizar o ensaio de compressão, o extensômetro elétrico (EE) emite um sinal ao SAD relativo à deformação apenas do corpo de prova de valor ε_{EE} . Para a calibração da medida de deformação da máquina deve-se considerar $\varepsilon_{máq} = \varepsilon_{EE}$. Para tal, busca-se uma correlação entre o comprimento fictício ($L_{fictício}$) adotado pela máquina e o comprimento real do corpo de prova (L).

O corpo de prova instrumentado de dimensões nominais de $30 \times 30 \times 90$ (mm³) apresentava as seguintes dimensões reais obtidas com paquímetro digital: $29,60 \times 28,88$ (mm²) e comprimento, $L =$

90,28 mm. Adotou-se uma resistência média à compressão paralela às fibras de 80 MPa (NBR 7190:1997). Para a seção real de 854,85 mm² resultou em uma força de 68,39 KN.

A taxa de carregamento foi de 10 MPa/min e a frequência de 2 Hz. A calibração da medida de deformação da máquina chegou a valores de R^2 bem próximos (0,995 e 0,998) de forma que, sendo L_{EE} a dimensão do comprimento do corpo de prova instrumentado com os dois extensômetros elétricos, se obteve um valor de $L_{fictício} = 5,00 \cdot L_{EE}$. Esta relação permitiu, portanto, ajustar o programa da máquina universal para fornecer o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras sem a necessidade de utilização de transdutor de deslocamento. O módulo de elasticidade obtido na calibração com extensômetro elétrico (EE) foi 20219 MPa.

Apêndice D

Calibração da medida de deformação no ensaio de tração paralela às fibras

Primeiro selecionou-se um corpo de prova para ser instrumentado com dois extensômetros elétricos da marca Kyowa tipo KL-6-120-A4, de seis (6) mm de comprimento. Para a calibração da medida de deformação da máquina deve-se considerar que essa deformação seja igual à deformação do corpo de prova registrada pelo extensômetro, ou seja, que $\varepsilon_{máq} = \varepsilon_{EE}$. Neste sentido, buscou-se uma correlação entre o comprimento fictício ($L_{fictício}$) adotado pela máquina e o comprimento L_{EE} do corpo de prova que, após instrumentado, foi posicionado na máquina DL 3000 e conectado a um SAD, conforme imagens mostradas na Fig. D.1.

Figura D.1 – Montagem do ensaio de tração paralela às fibras (esq.) e detalhe do corpo de prova de tração instrumentado (à dir.).



Se L_{EE} é o comprimento inicial e L é o comprimento observado sob solicitação de tração, tem-se que o alongamento devido á tração apresenta-se conforme a Eq.(D.1).

$$\Delta L = L - L_{EE} \quad (D.1)$$

Conforme Mascia (2017), o alongamento por unidade de comprimento (ε) ou deformação linear ou específica é uma quantidade adimensional ou referido como cm/cm ou mm/mm ou mesmo em porcentagem.é determinado conforme a Eq. (D.2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_{EE}} = \frac{L - L_{EE}}{L_{EE}} \quad (\text{D.2})$$

O corpo de prova instrumentado, apresentando as dimensões nominais, na região prevista de ruptura, de 20×4 (mm²) apresentava as dimensões reais obtidas com paquímetro digital de $19,20 \times 4,45$ (mm²) e a distância entre as garras de $L_{EE} = 41$ mm. Na calibração do programa de ensaio (script) aplicou-se uma taxa de incremento correspondente a 1/3 da carga de 10 MPa/min prescrita na NBR 7190:1997 para que o ensaio tivesse a duração de 8 a 10 minutos.

A partir da calibração da medida de deformação da máquina chegou-se à relação $L_{fictício} = 17,25 L_{EE}$ que permitiu, portanto, ajustar o programa da máquina universal para fornecer o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras sem a necessidade de utilização de transdutor de deslocamento.

Apêndice E

Neste Apêndice E encontram-se todos os dados de resistência determinados para a espécie *Dinizia excelsa Ducke*, nas condições natural, à quente e após o arrefecimento, valores médios e característicos determinados com a aplicação da Distribuição t de Student.

Os dados de resistências mecânica à condição Quente (Q) encontram-se nas tabelas (E.1) à (E.3) e à condição arrefecida (A), nas tabelas (E.4) à (E.6).

Os dados de módulos de elasticidade à compressão e à tração paralelos às fibras, à condição Quente (Q) encontram-se nas tabelas (E.7) e (E.8) e à condição arrefecida (A), nas tabelas (E.9) e (E.10).

Com relação às estatísticas básicas são apresentados: os valores médios das resistências mecânicas, na temperatura (T), na compressão ($f_{c0,mT}$), na tração ($f_{t0,mT}$), no cisalhamento ($f_{v0,mT}$), módulos de elasticidade médio na compressão ($E_{c0,mT}$) e na tração ($E_{t0,mT}$) paralelos às fibras em MPa, desvio padrão (s), em MPa e coeficiente de variação (CV), em (%). Também são apresentados os valores característicos das resistências mecânicas, na temperatura (T), na compressão ($f_{c0,kT}$), na tração ($f_{t0,kT}$), no cisalhamento ($f_{v0,kT}$), módulos de elasticidade na compressão ($E_{c0,kT}$) e na tração ($E_{t0,kT}$) paralelos às fibras em MPa; variável t (valor tabelado da porcentagem da distribuição t de student,) com intervalo de confiança de 95% unicaudal e o desvio padrão (s) da amostra (n).

Tabela E.1 - Estatísticas básicas e resistências características para a compressão paralela às fibras de 20 (natural) à 240°C - condição quente (Q).

Compressão, Q	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
$f_{c0,mT}$ (MPa)	78.13	66.68	59.69	42.78	42.85	42.25	34.94	28.14	28.51	23.95	16.00	3.37
Desvio Padrão (S) (MPa)	3.53	7.04	6.44	2.74	5.32	9.48	7.96	9.40	6.37	3.81	5.47	2.66
CV (%)	4.52	10.56	10.78	6.39	12.41	22.43	22.78	33.41	22.34	15.91	34.17	78.71
Máx. (MPa)	82.67	75.40	64.66	46.99	50.59	55.01	49.13	45.41	36.23	28.81	23.71	6.69
Mín. (MPa)	73.51	56.17	46.46	38.02	36.43	27.10	22.45	20.96	21.92	17.56	10.48	0.55
n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
t de Student (percentil de 5%)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432
$f_{c0,kT}$ (MPa)	75.54	61.51	54.96	40.77	38.95	35.29	29.10	21.23	23.83	21.15	11.99	1.42

Tabela E.2 - Estatísticas básicas e resistências características para a tração paralela às fibras de 20 (natural) à 240°C - condição quente (Q).

Tração, Q	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
$f_{t0,m}$ (MPa)	63.94	56.71	46.75	44.69	23.27	33.14	47.95	15.74	17.66	24.80	9.59	0.51
Desvio Padrão (S) (MPa)	13.50	14.32	20.81	22.04	15.53	19.60	22.96	11.25	10.21	7.71	7.45	0.44
CV (%)	21.12	25.26	44.51	49.32	66.76	59.16	47.87	71.44	57.78	31.07	77.66	86.30
Máx. (MPa)	81.83	73.01	87.04	72.09	53.25	63.44	89.49	36.98	33.43	38.09	20.83	1.32
Mín. (MPa)	52.42	31.06	24.06	10.91	12.24	10.38	23.88	6.00	6.12	16.73	3.84	0.12
n	6	7	7	7	6	7	6	7	7	6	7	6
Grau de liberdade: n-1	5	6	6	6	5	6	5	6	6	5	6	5
t de Student (percentil de 5%)	2.015	1.9432	1.9432	1.9432	2.015	1.9432	2.015	1.9432	1.9432	2.015	1.9432	2.015
f_{t0k} (MPa)	52.83	46.19	31.47	28.50	10.49	18.74	29.07	7.48	10.17	18.46	4.12	0.15

Tabela E.3 - Estatísticas básicas e resistências características para cisalhamento paralelo às fibras de 20 (natural) à 240°C - condição quente (Q).

Cisalhamento, Q	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	17.53	15.52	12.00	9.86	7.61	7.78	5.30	5.12	4.20	3.95	2.88	0.50
Desvio Padrão (S) (MPa)	0.97	1.02	2.16	2.26	1.42	1.86	0.82	0.97	1.11	1.14	0.46	0.38
CV (%)	5.51	6.60	18.00	22.94	18.63	23.90	15.48	18.93	26.34	28.87	15.85	75.59
Máx. (MPa)	19.17	17.48	14.48	12.75	9.89	10.41	6.27	6.90	6.06	6.26	3.56	1.14
Mín. (MPa)	16.25	14.67	8.73	6.63	5.87	5.60	3.80	4.11	2.90	2.74	2.02	0.14
n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
t de Student (percentil de 5%)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432
f_{v0k} (MPa)	16.82	14.77	10.42	8.20	6.57	6.41	4.70	4.40	3.38	3.12	2.54	0.22

Tabela E.4 - Estatísticas básicas e resistências características para compressão paralela às fibras: 20 (natural) à 240°C - condição arrefecida (A).

Compressão, A	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	78.13	69.96	74.25	72.84	74.60	71.34	76.33	66.00	33.72	28.05	12.50	4.67
Desvio Padrão (S) (MPa)	3.53	8.12	6.63	6.77	10.48	13.23	7.22	9.34	5.69	5.04	1.35	3.44
CV (%)	4.52	11.60	8.93	9.30	14.05	18.54	9.46	14.15	16.86	17.96	10.84	73.76
Máx. (MPa)	82.67	80.17	83.69	81.98	88.64	90.61	89.72	75.40	40.44	34.61	14.52	10.59
Mín. (MPa)	73.51	55.50	63.05	63.19	61.01	54.58	67.15	54.77	24.71	21.18	11.13	1.31
n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
t de Student (percentil de 5%)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432
f_{c0k} (MPa)	75.54	64.00	69.38	67.86	66.90	61.63	71.03	59.14	29.55	24.35	11.51	2.14

Tabela E.5 - Estatísticas básicas e resistências características para a tração paralela às fibras: 20 (natural) à 240°C - condição arrefecida (A).

Tração, A	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	63.94	60.65	80.14	62.60	35.45	51.92	49.96	38.84	26.69	14.66	8.60	3.74
Desvio Padrão (S) (MPa)	13.50	16.92	24.43	29.48	31.09	29.66	22.41	32.61	13.70	9.22	3.76	3.36
CV (%)	21.12	27.90	30.48	47.09	87.71	57.14	44.85	83.96	51.33	62.90	43.65	89.85
Máx. (MPa)	81.83	83.32	116.53	120.31	87.34	101.74	78.41	100.29	48.68	28.18	13.90	10.35
Mín. (MPa)	52.42	42.61	41.39	40.74	3.53	17.79	13.43	10.92	9.83	4.25	3.77	1.63
n	6	7	7	6	7	6	7	6	6	6	5	6
Grau de liberdade: n-1	5	6	6	5	6	5	6	5	5	5	4	5
t de Student (percentil de 5%)	2.015	1.9432	1.9432	2.015	1.9432	2.015	1.9432	2.015	2.015	2.015	2.132	2.015
f_{t0k} (MPa)	52.83	48.23	62.20	38.35	12.62	27.52	33.50	12.02	15.42	7.07	5.02	0.98

Tabela E.6 -Estatísticas básicas e resistências características para cisalhamento paralelo às fibras: 20 (natural) à 240°C - condição arrefecida (A).

Cisalhamento, A	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	17.53	15.40	14.18	14.01	13.26	13.09	5.50	4.62	7.42	3.46	1.77	0.40
Desvio Padrão (S) (MPa)	0.97	1.58	1.03	1.16	1.74	2.24	0.68	0.79	0.65	0.33	0.57	0.34
CV (%)	5.51	10.29	7.28	8.29	13.09	17.14	12.29	17.09	8.72	9.53	32.35	84.71
Máx. (MPa)	19.17	17.96	15.76	15.68	15.13	14.93	6.29	6.08	8.13	3.79	2.67	1.15
Mín. (MPa)	16.25	12.95	13.02	12.54	10.76	9.39	4.40	3.86	6.87	3.01	1.23	0.21
n	7	7	7	7	7	5	6	6	3	6	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	4	5	5	2	5	6	6
t de Student (percentil de 5%)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	2.132	2.015	2.015	2.92	2.015	1.9432	1.9432
f_{v0k} (MPa)	16.82	14.23	13.42	13.16	11.99	10.95	4.94	3.97	6.32	3.19	1.35	0.15

Tabela E.7 - Estatísticas básicas para módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras de 20 a 240°C - condição quente (Q).

MOE, Q - Compressão	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	25259	21875	20816	18555	15281	16903	14026	11382	14940	13296	10256	6100
Desvio Padrão (S) (MPa)	1587	2817	2825	1086	2106	2612	3419	4186	2730	1923	2000	1923
CV (%)	6	13	14	6	14	15	24	37	18	14	20	32
Máx. (MPa)	26960	26124	24038	20501	18397	20914	18446	17418	18613	15568	13634	8734
Mín (MPa)	22406	19269	15725	17514	12416	12579	7413	7946	12107	10109	8353	3873
n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
t de Student (percentil de 5% - 0,05)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432
Ec _{0k} (MPa)	24094	19806	18742	17757	13734	14985	11515	8308	12935	11884	8787	4688

Tabela E.8 - Estatísticas básicas para módulo de elasticidade na tração paralela às fibras de 20 a 240°C - condição quente (Q).

MOE,Q - Tração	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	16384	9490	14554	11419	12832	11835	12286	7805	10501	8142	6994	4220
Desvio Padrão (S) (MPa)	8259	1717	7540	4948	7647	3191	6207	3130	4097	1467	5118	1342
CV (%)	50	18	52	43	60	27	51	40	39	18	73	32
Máx. (MPa)	27082	11552	27781	21795	26590	18455	24660	14494	18536	10893	18227	5075
Mín (MPa)	8023	7621	7889	6139	3139	9192	8555	5450	5054	6793	3888	2673
n	7	7	7	7	7	7	6	7	7	6	7	4
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	5	6	6	5	6	3
t de Student (percentil de 5% - 0,05)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	2.015	1.9432	1.9432	2.015	1.9432	2.353
Et _{0k} (MPa)	10318	8229	9017	7785	7215	9491	7181	5506	7492	6935	3235	2641

Tabela E.9 - Estatísticas básicas para módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras de 20 a 240°C - condição arrefecida (A).

MOE, A - Compressão	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	25259	21911	21621	18555	26597	22677	23779	22921	17093	17095	12842	8057
Desvio Padrão (S) (MPa)	1587	3098	2706	1090	2865	1779	1126	1272	2699	1931	1929	2845
CV (%)	6	14.14	12.51	5.88	10.77	7.85	4.74	5.55	15.79	11.30	15.02	35.31
Máx. (MPa)	26960	26644	26147	20511	30930	25050	25393	24837	19943	19278	15388	11110
Mín (MPa)	22406	17625	18393	17508	22576	19596	22544	21474	12394	14358	9678	3027
n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
t de Student (percentil de 5% - 0,05)	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432	1.9432
E_{Cok} (MPa)	24094	19636	19634	17754	24493	21370	22952	21987	15110	15677	11426	5968

Tabela E.10 - Estatísticas básicas para módulo de elasticidade na tração paralela às fibras de 20 a 240°C - condição arrefecida (A).

MOE,A - Tração	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Média (MPa)	16384	9500	10123	9807	7317	10431	10033	6799	9476	7522	4692	3787
Desvio Padrão (S) (MPa)	8259	3525	1143	1489	2578	4708	2531	2277	3704	3926	1275	1264
CV (%)	50	37.10	11.29	15.18	35.23	45.14	25.22	33.49	39.09	52.19	27.17	33.39
Máx. (MPa)	27082	15569	12358	12350	10130	19612	14485	9196	14678	13336	6908	5871
Mín (MPa)	8023	6222	9001	8226	3672	6344	7447	2790	6536	4023	3702	2448
n	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	5	6
Grau de liberdade: n-1	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	5
t de Student (percentil de 5% - 0,05)	1.9432	1.9432	1.9432	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015	2.132	2.015
E_{tok} (MPa)	10318	6911	9283	8582	5197	6558	7951	4926	6429	4293	3477	2747

Apêndice F - Modelos de fatores de modificação das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho

Este Apêndice apresenta os detalhes das análises de regressão efetuadas neste trabalho de tese para a definição dos **modelos de fatores de modificação** das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho. Foram investigados os relacionamentos entre uma variável resposta (Fator de redução, $k_{\text{mod,fi}}$) e uma variável preditora (temperatura, T , em °C) para predição da redução da resistência, $K_{\text{mod,fi}}(f_w0,T)$, e da rigidez, $K_{\text{mod,fi}}(E_w0,T)$, nas condições quente (Q) e Arrefecida (A), sendo:

F.1 – Modelos de Fatores de Modificação das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho na condição quente:

F.1.1 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à compressão paralela às fibras na condição quente;

F.1.2 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à tração paralela às fibras na condição quente;

F.1.3 Modelo de Fatores de Modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição quente;

F.1.4 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição quente;

F.1.5 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras na condição quente.

F.2 – Modelos de Fatores de Modificação das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho na condição arrefecida:

F.2.1 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à compressão paralela às fibras na condição arrefecida;

F.2.2 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à tração paralela às fibras na condição arrefecida;

F.2.3 Modelo de Fatores de Modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição arrefecida;

F.2.4 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição arrefecida;

F.2.5 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras na condição arrefecida.

F.1 – Modelos de Fatores de Modificação das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho na condição quente:

F.1.1 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à compressão paralela às fibras na condição quente

A análise de variância para o modelo da variação da resistência à compressão paralela às fibras considerou para o cálculo da estatística F crítica a alternativa unilateral com nível de confiança $\alpha = 0,05$; tamanho da amostra, $n = 12$; a; graus de liberdade total, $n-1 = 12-1=11$; número de variáveis do modelo, $p = 1$; Erro= $n-1-p = 10$. Considerando-se as variações de resistência em função da elevação de temperatura (T) obteve-se para a resistência à compressão paralela às fibras os resultados apresentados na Tab. (F.1.1.1).

Tabela F.1.1.1 - Análise de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	94,42	0.825695	169,31	(0,05;1;10), 4,96	0,000
T	1	94,42	0.825695	169,31	(0,05;1;10), 4,96	0,000
Erro	10	5,58	0.004877			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.1.1.1) apresenta uma contribuição de 94,42%. A estatística F calculada (169,31) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para Valor P = 0,000 ($\ll 0,05$) indicando a significância do modelo de regressão. A contribuição ao modelo da variável temperatura (T) corresponde a 94,42%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (169,31) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para Valor P $\ll 0,05$ (0,000) e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação da resistência à compressão paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; Erro = $n-1-p=10$, conforme a Tab. (F.1.1.2).

Tabela F.1.1.2 - Coeficientes para o modelo de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
-------	---	---------	-----	---------	-----

Constante	0,9526	22,16	(0,005;10), 3,169	0,000	
T	-0,003799	-13,01	(0,005;10), 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.1.1.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,9526; a estatística T calculada (= 22,16) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,003799) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (13,01) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.1.1.1) representa o modelo de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas, para T em (°C).

$$f_{c0,kT,Q}/f_{c0,k20} = K_{mod,fi}(fc0,T) = 0,9526 - 0,003799 \cdot T \quad (F.1.1.1)$$

O modelo da Eq. (F.1.1.1) explica aproximadamente 94,42% da variação na resposta. Das 12 observações somente uma foi indicada como resíduo grande mas que apresentou um D de Cook igual a 0,92 sendo menor do que a unidade e portanto, não é potencialmente influenciável no modelo.

F.1.2 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à tração paralela às fibras na condição quente

A análise de variância para o modelo da variação da resistência à tração paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.1.2.1).

Tabela F.1.2.1 - Análise de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	75,23	0,81348	30,37	(0,05;1;10), 4,96	0,000
T	1	75,23	0,81348	30,37	(0,05;1;10), 4,96	0,000
Erro	10	24,77	0,02679			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. F.1.2.1 apresenta uma contribuição de 75,23%. A estatística F calculada (30,37) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para Valor P = 0,000 (<< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão. A variável temperatura (T) representa uma contribuição de 75,23% ; uma estatística F calculada (30,37) maior do que a respectiva estatística F

crítica (4,96) para Valor $P = 0,000$ ($\ll 0,05$) e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação da resistência à tração paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise do coeficiente individual dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; Erro = $n-1-p = 10$. Os resultados encontram-se na Tab. (F.1.2.2).

Tabela F.1.2.2 - Coeficientes para o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	0,897	8,90	(0,005;10), 3,169	0,000	
T	-0,003771	-5,51	(0,005;10), 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.1.2.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,897; a estatística T calculada (= 8,90) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor $P = 0,000$ ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,003771) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (5,51) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor $P = 0,000$ ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.1.2.1) representa o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas, para T em ($^{\circ}\text{C}$). O modelo explica aproximadamente 75,23% da variação na resposta.

$$f_{i0,kT}, Q/f_{i0,k20} = K_{\text{mod},fi}(ft0, T) = 0,897 - 0,003771 \cdot T \quad (\text{F.1.2.1})$$

Das 12 observações somente uma foi indicada como resíduo grande mas apresentou um D de Cook igual a 0,23 sendo menor do que a unidade e portanto, não sendo potencialmente influenciável no modelo de regressão.

F.1.3 Modelo de Fatores de Modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição quente

A análise de variância para o modelo da variação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.1.3.1).

Tabela F.1.3.1 - Análise de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	2	96,51	0,470573	124,60	(0,05;2;9), 4,26	0,000
T	1	89,58	0,217980	57,72	(0,05;1;9), 5,12	0,000
T ²	1	6,93	0,067577	17,89	(0,05;1;9), 5,12	0,002
Erro	9	3,49	0,003777			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor - P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.1.3.1) apresenta uma contribuição de 96,51%. A estatística F calculada (124,60) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,26) para Valor P = 0,000 ($\ll 0,05$) indicando a significância do modelo de regressão. A maior contribuição ao modelo é devida à temperatura (T) com 89,58%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (57,72) é maior do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para Valor P $\ll 0,05$; a estatística F calculada para a variável preditora, T² (17,89) é maior do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para Valor P = 0,002 $\ll 0,05$ com evidência de que as variáveis preditoras sejam significativas para explicar a modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; n-1 = 11; p = 2; erro = n-1-p = 9. Os resultados encontram-se na Tab. (F.1.3.2).

Tabela F.1.3.2 - Coeficientes para o modelo de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	1,1279	17,76	(0,005;9), 3,250	0,000	
T	-0,00853	-7,60	(0,005;9), 3,250	0,000	19,11
T ²	0,000018	4,23	(0,005;9), 3,250	0,002	19,11

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor - P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.1.3.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 1,1279; a estatística T calculada (= 17,76) maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a P Valor = 0,000 ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,00853) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (7,60) é maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,000 ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T² do modelo apresenta coeficiente (0,000018) cujo módulo do valor

calculado para a estatística T (4,23) é maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor $P = 0,002 (< 0,005)$ sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 19,11 sendo maior do que 10 (Minitab 17) oferece problema de multicolinearidade, sugerindo a manutenção do termo T^2 no modelo. A Eq. (F.1.3.1) representa o modelo de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas, para T em (°C). O modelo explica aproximadamente 96,51% da variação na resposta.

$$f_{v0,kT}, Q/f_{v0,k20} = K_{\text{mod},fi}(f_{v0}, T) = 1,1279 - 0,00853 \cdot T + 0,000018 \cdot T^2 \quad (\text{F.1.3.1})$$

Das 12 observações somente uma foi indicada como resíduo grande e apresentou um D de Cook igual a 196 sendo maior do que a unidade e portanto, potencialmente influenciável no modelo de regressão.

F.1.4 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição quente

A análise de variância para o modelo do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.1.4.1).

Tabela F.1.4.1 - Análise de variância do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	86,35	0,492777	63,27	(0,05;1;10); 4,96	0,000
T	1	86,35	0,492777	63,27	(0,05;1;10); 4,96	0,000
Erro	10	13,65	0,007788			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.1.4.1) apresenta uma contribuição de 86,35%. A estatística F calculada (63,27) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para P valor = 0,000 (< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão no qual a temperatura (T) contribui com 86,35%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (63,27) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para P valor = 0,000 < 0,05 e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos a serem utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a

alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; Erro = $n-1-p = 10$, conforme resultados na Tab. (F.1.4.2).

Tabela F.1.4.2- Coeficientes para o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	0,96	17,67	(0,005;10); 3,169	0,000	
T	-0,002935	- 7,95	(0,005;10); 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.1.4.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,96; a estatística T calculada (= 17,67) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,002935) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (7,95) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.1.4.1) representa o modelo de variância do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas, para T em (°C). O modelo explica aproximadamente 86,35% da variação na resposta.

$$E_{c0,kT}, Q/E_{c0,k20} = K_{mod,fi}(E_{c0}, T) = 0,96 - 0,002935 \cdot T \quad (F.1.4.1)$$

F.1.5 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras na condição quente.

A análise de variância para o modelo do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.1.5.1).

Tabela F.1.5.1 - Análise de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	69,19	0,38379	22,46	(0,05;1;10); 4,96	0,001
T	1	69,19	0,38379	22,46	(0,05;1;10); 4,96	0,001
Erro	10	30,81	0,01709			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.1.5.1) apresenta uma contribuição de 69,19%. A estatística F calculada (22,46) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para P valor = 0,001 (< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão no qual a temperatura (T) contribui com 69,19%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (22,46) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para P valor = 0,001 < 0,05 e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos a serem utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; n-1 = 11; p = 1; Erro = n-1-p = 10, conforme resultados na Tab. (F.1.5.2).

Tabela F.1.5.2- Coeficientes para o modelo de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas (Q).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	1,0236	12,72	(0,005;10); 3,169	0,000	
T	- 0,002590	- 4,74	(0,005;10); 3,169	0,001	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.1.5.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 1,0236; a estatística T calculada (= 12,72) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (- 0,002590) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (4,74) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,001 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.1.5.1) representa o modelo de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas elevadas, para T em (°C) e o modelo explica aproximadamente 69,19% da variação na resposta.

$$E_{t0,kT,Q}/E_{t0,k20} = K_{mod,fi}(E_{t0},T) = 1,0236 - 0,002590 \cdot T \tag{F.1.5.1}$$

F.2 – Modelos de Fatores de Modificação das propriedades mecânicas da madeira do angelim-vermelho na condição arrefecida:

F.2.1 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à compressão paralela às fibras na condição arrefecida

A análise de variância para o modelo da variação da resistência à compressão paralela às fibras considerou para o cálculo da estatística F crítica a alternativa unilateral com nível de confiança $\alpha = 0,05$; tamanho da amostra, $n = 12$; a; graus de liberdade total, $n-1 = 12-1=11$; número de variáveis do modelo, $p = 1$; Erro= $n-1-p = 10$. Considerando-se as variações de resistência em função da elevação de temperatura (T) e posterior arrefecimento obteve-se para a resistência à compressão paralela às fibras os resultados apresentados na Tab. F.2.1.1).

Tabela F.2.1.1 - Análise de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	2	92,78	0,59651	57,80	(0,05;2;9); 4,26	0,000
T	1	77,24	0,04291	4,16	(0,05;1;9); 5,12	0,072
T ²	1	15,54	0,19981	19,36	(0,05;1;9); 5,12	0,002
Erro	9	7,22	0,01032			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.2.1.1) apresenta uma contribuição de 92,78%. A estatística F calculada (57,80) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,26) para Valor P = 0,000 ($\ll 0,05$) indicando a significância do modelo de regressão. A maior contribuição ao modelo é devida à temperatura (T) com 77,24%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (4,16) é menor do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para Valor P = 0,072 $> 0,05$ e conclui-se que não há evidência de que a variável preditora T seja significativa para explicar a modificação da resistência à compressão paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. A variável T² contribui com 15,54%; a estatística F calculada para a variável preditora, T² (19,36) é maior do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para Valor P = 0,002 $\ll 0,05$ e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora T² seja significativa para explicar a modificação da resistência. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 2$; Erro = $n-1-p = 9$. Os resultados encontram-se na Tab. (F.2.1.2).

Tabela F.2.1.2- Coeficientes para o modelo de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	0,836	7,96	(0,005;9); 3,250	0,000	
T	0,00379	2,04	(0,005;9); 3,250	0,072	19,11

T ²	- 0,000031	- 4,40	(0,005;9); 3,250	0,002	19,11
----------------	------------	--------	------------------	-------	-------

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.2.1.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,836; a estatística T calculada (= 7,96) maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,000 sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (0,00379) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (2,04) é maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,072 (> 0,005) sendo, portanto, não significativo e se aceita a hipótese nula. Porém o fator VIF = 19,11 da variável T é maior do que 10 (Minitab 17) oferecendo problema de multicolinearidade devendo ser mantido no modelo. O termo T² apresenta coeficiente (- 0,000031) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (4,40) é maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,002 (<< 0,005) sendo, portanto, significativo e não se aceita a hipótese nula reforçado pelo fator VIF = 19,11 maior do que 10 (Minitab 17) oferecendo problema de multicolinearidade devendo ser mantido no modelo.

A Eq. (F.2.1.1) representa o modelo que explica aproximadamente 92,78% da variação na resposta de variância da resistência à compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas, para T em (°C).

$$f_{c0,kT}, Q/f_{c0,k20} = K_{\text{mod},fi}(f_{c0},T) = 0,836 + 0,00379 \cdot T - 0,000031 \cdot T^2 \quad (\text{F.2.1.1})$$

F.2.2 Modelo de Fatores de Modificação da resistência à tração paralela às fibras na condição arrefecida

A análise de variância para o modelo da variação da resistência à tração paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.2.2.1).

Tabela F.2.2.1 - Análise de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	76,78	1,59478	33,06	(0,05;1;10); 4,96	0,000
T	1	76,78	1,59478	33,06	(0,05;1;10); 4,96	0,000
Erro	10	23,22	0,04824			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.2.2.1) apresenta uma contribuição de 76,78%. A estatística F calculada (33,06) é maior do que a estatística crítica F_{cr} (4,96) para P valor = 0,000 ($\ll 0,05$) indicando a significância do modelo de regressão. A maior contribuição ao modelo é devida à temperatura (T) com 76,78%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (33,06) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para P valor $\ll 0,05$ e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação da resistência à tração paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise do coeficiente individual dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; Erro = $n-1-p = 10$. Os resultados encontram-se na Tab. (F.2.2.2).

Tabela F.2.2.2- Coeficientes para o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	1,251	9,25	(0,005;10); 3,169	0,000	
T	-0,005280	-5,75	(0,005;10); 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.2.2.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 1,251; a estatística T calculada (= 9,25) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,005280) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (5,75) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 ($< 0,005$) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.2.2.1) representa o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas, para T em (°C) explicado em 76,78% da variação na resposta.

$$f_{i0,kT,A}/f_{i0,k20} = K_{\text{mod,fi}}(ft_0,T) = 1,251 - 0,005280 \cdot T \quad (\text{F.2.2.1})$$

Das 12 observações somente duas foram identificadas como resíduos grandes mas apresentaram D de Cook iguais a 0,47 e 0,25 sendo menores do que a unidade e portanto, não sendo potencialmente influenciáveis nos modelos de regressão.

F.2.3 Modelo de Fatores de Modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição arrefecida

A análise de variância para o modelo da variação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras sob temperaturas arrefecidas alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.2.3.1).

Tabela F.2.3.1 - Análise de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
Regressão	1	89,73	1,16281	87,38	(0,05;1;10); 4,96	0,000
T	1	89,73	1,16281	87,38	(0,05;1;10); 4,96	0,000
Erro	10	10,27	0,01331			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.2.3.1) apresenta uma contribuição de 89,73%. A estatística F calculada (87,38) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para Valor P = 0,000 (\ll 0,05) indicando a significância do modelo de regressão devido à contribuição da variável preditora, temperatura (T). A estatística F calculada para a variável preditora, T (87,38) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para P valor = 0,000 \ll 0,05 com evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; Erro = $n-1-p = 10$. Os resultados encontram-se na Tab. (F.2.3.2).

Tabela F.2.3.2- Coeficientes para o modelo de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	1,0892	15,34	(0,005;10); 3,169	0,000	
T	-0,004509	-9,35	(0,005;10); 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.2.3.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 1,0892; a estatística T calculada (= 15,34) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a Valor P = 0,000 ($<$ 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (-0,004509) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (9,35) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 ($<$ 0,005) sendo, portanto, significativo e se

rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1,00 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.2.3.1) representa o modelo de variância da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas, para T em (°C) explicado em 89,73% da variação na resposta.

$$f_{v0,kT,A}/f_{v0,k20} = K_{mod,fi}(f_{v0},T) = 1,0892 - 0,004509 \cdot T \quad (F.2.3.1)$$

F.2.4 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição arrefecida

A análise de variância para o modelo do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.2.4.1).

Tabela F.2.4.1 - Análise de variância do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E))	Valor Fcr	Valor P
Regressão	2	77,55	0,22496	15,54	(0,05;2;9); 4,26	0,001
T	1	53,20	0,05704	3,94	(0,05;1;9); 5,12	0,078
T ²	1	24,35	0,14130	9,76	(0,05;1;9); 5,12	0,012
Erro	9	22,45	0,01447			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.2.4.1) representa uma contribuição de 77,55% apresentando uma estatística F calculada (15,54) maior do que a estatística crítica Fcr (4,26) para P valor = 0,001 (< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão. A variável temperatura (T) contribui com 53,20% com estatística F calculada (3,94) menor do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para P valor = 0,078 > 0,05 e conclui-se que não existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Porém a variável temperatura ao quadrado (T²) contribui com 24,35% com estatística F calculada 9,76) maior do que a respectiva estatística F crítica (5,12) para P valor = 0,012 < 0,05 e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora T² seja significativa para explicar a modificação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras com um nível de confiança de 95%. Para a análise dos coeficientes individuais dos termos a serem utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; n-1 = 11; p = 2; Erro = n-1-p = 9, conforme a Tab. (F.2.4.2).

Tabela F.2.4.2- Coeficientes para o modelo de variância da resistência à tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	0,751	6,04	(0,005;9); 3,250	0,000	
T	0,00437	1,99	(0,005;9); 3,250	0,078	19,11
T ²	- 0,000026	- 3,12	(0,005;9); 3,250	0,012	19,11

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

Observa-se na Tab. (F.2.4.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,751; a estatística T calculada (= 6,04) maior do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (0,00437) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (1,99) é menor do que a estatística T crítica (3,250) associado a valor P = 0,078 (> 0,005) não sendo, portanto, significativo e se aceita a hipótese nula. O termo T² apresenta coeficiente (- 0,000026) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (3,12) é menor do que a estatística T crítica (3,250) associado a P = 0,012 (> 0,005) não sendo, portanto, significativo e se aceita a hipótese nula. No entanto, o fator VIF para os termos T e T² valem 19,11 sendo maior do que 10 (Minitab 17) oferecendo problema de multicolinearidade e por este motivo os termos serão mantidos no modelo. A Eq. (F.2.4.1) apresenta o modelo proposto de variância do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas, para T em (°C) em cerca de 77,55%.

$$E_{c0,kT,Q}/E_{c0,k20} = K_{mod,fi}(E_{c0},T) = 0,751 + 0,00437 - 0,000026 \cdot T^2 \quad (F.2.4.1)$$

Das 12 observações somente uma foi identificada como resíduo grande e apresentou D de Cook igual a 1,81 sendo maior do que a unidade e portanto, potencialmente influenciável no modelo.

F.2.5 Modelo de Fatores de Modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras na condição arrefecida

A análise de variância para o modelo do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras alcançou os resultados apresentados na Tab. (F.2.5.1).

Tabela F.2.5.1 - Análise de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Fonte	GL	C (%)	QM (Aj.)	Valor F (Calculado = QM(v)/QM(E)	Valor Fcr	Valor P
-------	----	-------	----------	--	-----------	---------

Regressão	1	72,66	0,41676	26,57	(0,05;1;10); 4,96	0,000
T	1	72,66	0,41676	26,57	(0,05;1;10); 4,96	0,000
Erro	10	27,34	0,01568			
Total	11	100,00				

Sendo: GL: Graus de Liberdade; C: Contribuição; Valor F: Estatística F calculada = média do quadrado da variável dividida pela média do quadrado do erro; Valor Fcr = valor F crítico; Valor – P: Estatística P.

O modelo de regressão analisado na Tab. (F.2.5.1) apresenta uma contribuição de 72,66%. A estatística F calculada (26,57) é maior do que a estatística crítica Fcr (4,96) para P valor = 0,000 (< 0,05) indicando a significância do modelo de regressão no qual a temperatura (T) contribui com 72,66%. A estatística F calculada para a variável preditora, T (2657) é maior do que a respectiva estatística F crítica (4,96) para P valor = 0,000 < 0,05 e conclui-se que existe evidência de que a variável preditora seja significativa para explicar a modificação do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras com um nível de confiança de 95%.

Para a análise dos coeficientes individuais dos termos a serem utilizados no modelo considerou-se para o cálculo do T crítico a alternativa bilateral com nível de confiança $\alpha = 0,01$, com $\alpha/2 = 0,005$; $n-1 = 11$; $p = 1$; $n-1-p=10$, conforme resultados na Tab. (F.2.5.2).

Tabela F.2.5.2- Coeficientes para o modelo de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas (A).

Termo	C	Valor T	Tcr	Valor-P	VIF
Constante	0,9701	12,59	(0,005;10); 3,169	0,000	
T	- 0,002699	- 5,15	(0,005;10); 3,169	0,000	1,00

Sendo: C- Coeficiente; EP- Erro padrão; Valor T = estatística T; Tcr = estatística T crítica; Valor – P: Estatística P; VIF- Fator de inflação da variância.

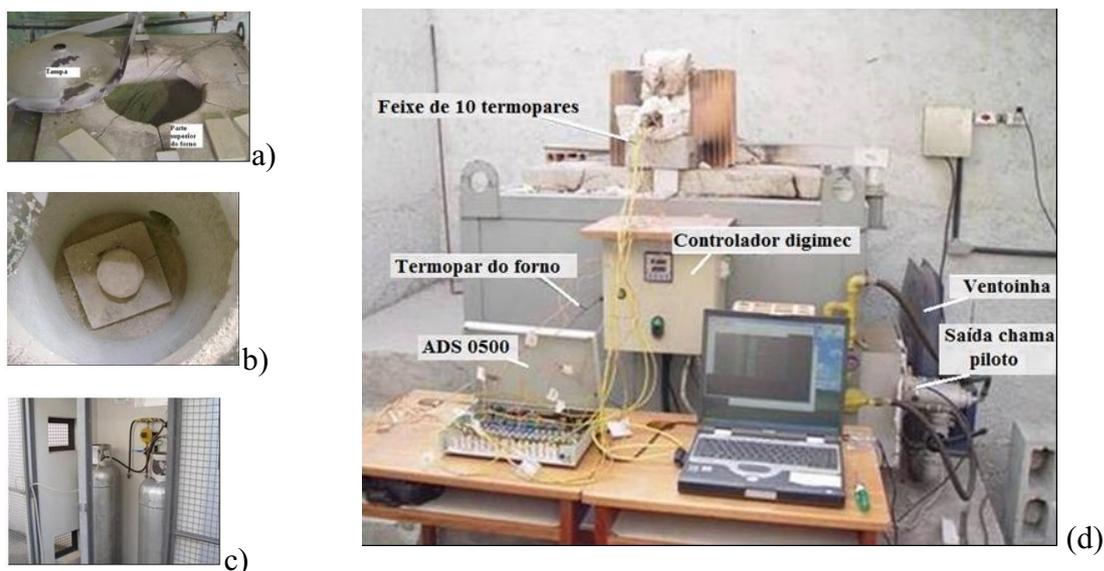
Observa-se na Tab. (F.2.5.2) que o termo Constante apresenta coeficiente igual a 0,9701; a estatística T calculada (= 12,59) maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O termo T do modelo apresenta coeficiente (- 0,002699) cujo módulo do valor calculado para a estatística T (5,15) é maior do que a estatística T crítica (3,169) associado a valor P = 0,000 (< 0,005) sendo, portanto, significativo e se rejeita a hipótese nula. O fator VIF = 1 sendo menor do que 10 (Minitab 17) não oferece problema de multicolinearidade. A Eq. (F.2.5.1) representa o modelo de variância do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras para inferir o fator de modificação sob temperaturas arrefecidas, para T em (°C) em cerca de 72,66%.

$$E_{t0,kT,Q}/E_{t0,k20} = K_{\text{mod,fi}}(E_{t0},T) = 0,9701 - 0,002699 \cdot T \quad (\text{F.2.5.1})$$

Apêndice G

Imagens do forno e seus acessórios encontram-se na Fig. G.1

Figura G.1 – Imagens do forno a gás e acessórios: (a) vista superior; (b) vista interna; (c) dois cilindros de 45 kg; (d) vista externa do forno preparado para ensaio. Fonte: Autoria própria.



A Fig. G.1 mostra os cabos que partem do feixe de 10 termopares que apresentam uma bainha de 1500 mm. Os termopares, numerados de 1 a 11, foram conectados ao sistema de aquisição de dados ADS 0500 que, por sua vez, foi conectado ao notebook. Os sinais dos termopares captados pelo SAD foram recepcionados pelo notebook via programa AqDados7. O acompanhamento dos dados via SAD foi importante para se identificar qualquer irregularidade nos sinais captados pelos termopares os quais deveriam ser investigados e corrigidos imediatamente.

Tolerâncias admitidas no controle da temperatura do forno

Segundo NBR 5628 (2001), com relação à precisão do controle de temperatura, a área sobre a curva da temperatura média do forno registrada durante o ensaio e a correspondente sob a curva padrão, computadas desde a origem, devem coincidir sensivelmente admitindo-se as seguintes tolerâncias: $\pm 15\%$ nos primeiros 10 min; $\pm 10\%$ nos primeiros 30 min e $\pm 5\%$ após os primeiros 30 min. Para tempo $t > 10$ min, a temperatura média do forno em qualquer instante não deve apresentar uma diferença, em relação à curva-padrão, maior do que 100 °C.

A pressão de saída de gás liquefeito de petróleo (GLP) do cilindro durante o fornecimento de gás ao forno foi mantida sempre próxima a 1,5 e menor do que 2 kgf/cm³.

O sistema de combustão segundo a Grion (fabricante do forno) compreende a interação entre o funcionamento de queimadores, painel de controle de temperatura, supervisão de chama e ventoinha de ar de combustão. Os queimadores a gás MG trabalham com o princípio denominado *nozzle-mix* onde ocorre a mistura ar de combustão e gás GLP no bocal de saída. Com isto, tem-se uma perfeita combinação e íntima relação das moléculas de oxigênio com as do hidrocarboneto que serve de combustível.

A logística para início do ensaio consistiu de: manter a tampa do forno totalmente aberta para entrada de oxigênio antes de ligar o forno; selecionar o início do programa; aguardar o forno acender com a presença da chama piloto; após o acendimento da chama piloto, fechar a tampa do forno, deixando pequena fresta apenas para a saída do feixe de termopares; verificar a pressão do gás; verificar se as leituras dos 10 termopares estavam coerentes e elevando-se gradativamente.

Conforme o IPEM - Instituto de Pesos e Medidas, devido ao consumo muito rápido de gás, o botijão começa a esfriar e, em alguns casos, surge uma fina camada de gelo sobre a superfície que congela o sistema e acaba interrompendo o fornecimento do GLP. Esta situação ocorreu na fase preliminar de testes. Para impedir o congelamento do gás dentro do cilindro, e a conseqüente extinção da chama piloto, foi adotado o recurso, sob orientação da Grion, de manter uma mangueira de água fria aberta jorrando água, constantemente, sobre o cilindro de gás durante o transcurso do ensaio para impedir o congelamento do gás no interior do cilindro.

ANEXOS

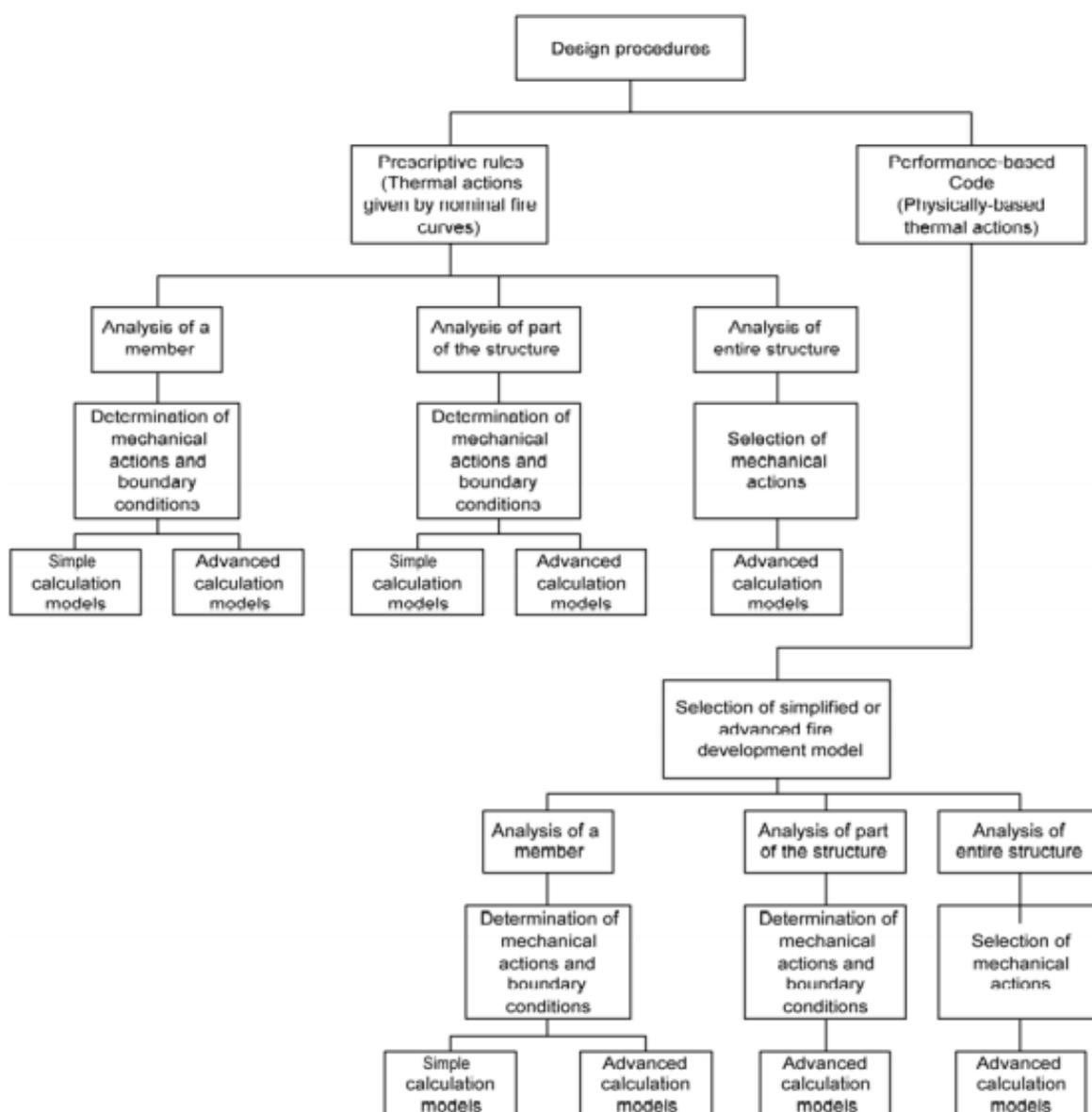
Nesta parte apresenta-se os seguintes anexos:

ANEXO 1 - Métodos de projetos alternativos para dimensionamento de Estruturas de madeira em situação de incêndio propostos no EN 1995-1-2:2004 (EUROCODE 5) segundo regras prescritivas ou código baseado no desempenho.....	251
ANEXO 2 - Fluxograma para verificação da resistência de elementos de madeira em situação de incêndio expostos ao fogo padronizado adotando-se métodos simplificados segundo EN 1995-1-2 (2004) (EUROCODE 5).....	252
ANEXO 3 – Forno a gás Grion.....	253

Anexo 1

Métodos de projetos alternativos para dimensionamento de Estruturas de madeira em situação de incêndio propostos no EN 1995-1-2:2004 (EUROCODE 5) segundo regras prescritivas ou código baseado no desempenho.

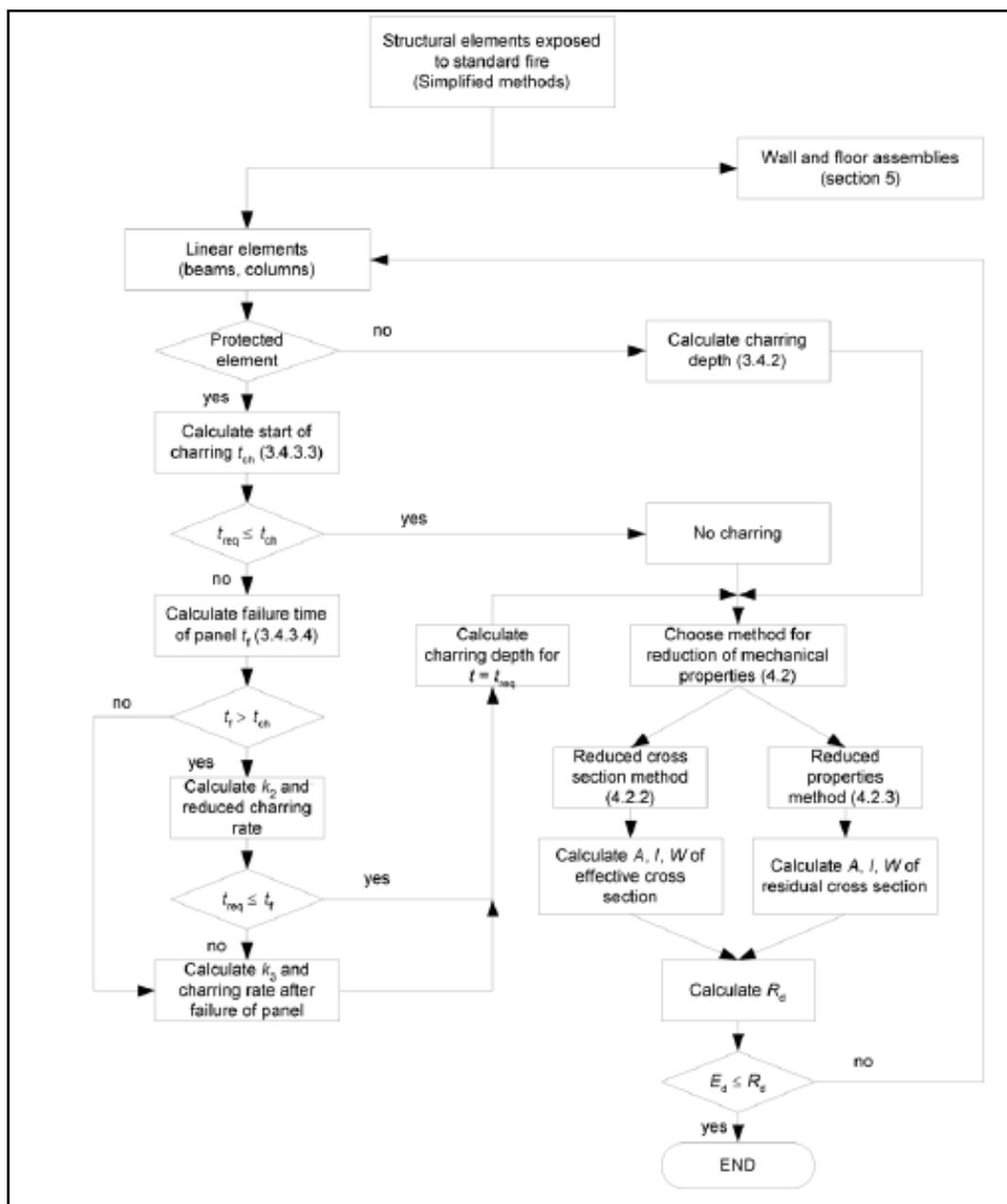
Figura A1 – Procedimentos alternativos para o desenvolvimento de projeto de estruturas de madeira segundo a EN 1995-1-2:2004.



Anexo 2

Verificação da resistência de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio expostos ao fogo padronizado segundo métodos simplificados da EN 1995-1-2 (2004) (EUROCODE 5).

Figura A2 – Fluxograma para verificação da resistência de elementos de madeira em situação de incêndio expostos ao fogo padronizado adotando-se métodos simplificados segundo EN 1995-1-2 (2004). Observação: as seções e itens conforme aparecem no texto da norma EN 1995-1-2 (2004).



Anexo 3

GRION FORNOS INDUSTRIAIS LTDA

Estrada da Roseira, 710 Jd. Suisso - Mairiporã-SP

E-mail : grionfomos@uol.com.br Site <http://grionfornos.uol.com.br>

A3.1 Introdução

O presente equipamento foi fabricado com materiais de primeira qualidade do mercado brasileiro. O equipamento deverá ser instalado em local plano e arejado e com espaço suficiente para operação e manutenção. A carcaça metálica do fomo e queimador deverão ser aterradas dentro do painel através de um condutor que faz parte do cabo de alimentação trifásico. O painel será conectado ao sistema trifásico 220 V 60 Hz.

A3.2 Start-up

O equipamento já foi pré-testado na fábrica. Os disjuntores, quando acionados para cima ligam o comando, o que será percebido pelo acendimento do display do controlador de temperatura digital. Liga-se a ventoinha, verificando-se seu sentido de rotação (horário). Regula-se a pressão de entrada do gás em cerca de 0,3 a 0,5 Kgf/cm². Coloca-se a válvula borboleta do ar de combustão em sua posição próximo de fechado. Abre-se o registro do gás da chama piloto (regulador pequeno) e aciona o botão de ignição, certificando que o piloto esteja aceso. Abre-se o registro de gás do queimador parcialmente para acendimento do maçarico. Abre-se a válvula de ar da ventoinha até se obter uma chama amarelo-azulada regulando a chama baixa de combustão ao mínimo. O sistema de controle de temperatura é do tipo chama alta/baixa. Escolhe-se a temperatura desejada no controlador digital (ver manual Digmec) que, caso necessário, enviará sinal de tensão para a válvula solenóide NF que libera a passagem total de gás.

IMPORTANTE:

- Verificar sempre o estado da tubulação de gás, corrigindo possíveis vazamentos;
- Abrir a tampa e ventilar o ambiente antes de acender a chama;
- Cuidado com a manipulação, do material quente ou metal fundido;
- Use sempre EPI com o equipamento.

A3.3 Queimador a gás MG

Os queimadores a gás MG trabalham com o princípio denominado *nozzle-mix* onde há a mistura do ar de combustão e gás no bocal de saída. Com isto, temos uma perfeita combinação e íntima relação das moléculas de oxigênio com as do hidrocarboneto a servir de combustível. O corpo do queimador é fundido em ferro nodular e os demais componentes são fabricados em aço carbono. A haste é de inox. Todas as peças são de baixo custo e de fácil manutenção no mercado nacional. Deve-se apenas conectar a tubulação de ar e de gás e acendê-lo. O queimador pode também trabalhar com supervisão de chama e controle de temperatura bastando, para isso, instalar os demais equipamentos. São fabricados para serviço pesado em fornos de fusão, forjarias, estufas e outras aplicações.

O queimador é fornecido com os seguintes componentes:

- Corpo em ferro fundido
- Placa de fixação
- Bloco refratário queimado a 1400 °C.
- Opcionais: Sensor de chama ultravioleta (UV) ou haste KANTHAL

Cavalete de gás com válvulas solenóides para controle chama alta/chama baixa ou modulante; bloqueio de gás com falha de chama.

- Painel elétrico de controle com controlador de temperatura digital e termopar.

A3.4 Características do forno

Aquecimento por queimador a gás GLP, utilizando 02 cilindros PT 45 kg que funcionam simultaneamente por meio de válvula que alterna a saída do gás GLP; Equipado com Controlador DIGIMEC – SHMP responsável pela programação de rampas e patamares de temperatura; possui sistema de segurança que consiste em um sensor visual da chama piloto; Dimensões externas: 1200 mm × 1200 mm × 1200 mm; Dimensões internas da câmara: diâmetro 600 mm, altura útil 700 mm; Capacidade máxima de temperatura de 1200°C; Abertura na parte superior e base para sustentação do corpo de prova constituído de pedra refratária; Dutos laterais para entrada dos termopares de monitoramento do forno; Projetado para manter uma pressão interna da câmara de (10 ± 5) Pa, acima da pressão atmosférica; Saída de gases e de fumaça e saída de líquidos. O equipamento foi pré-testado na fábrica.