

REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“Investigação da influência do tratamento com permetrina nas propriedades de combustão da Imbuia (*Ocotea porosa*) da estrutura de cobertura do Santuário de N. Sr.^a da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto-MG”



Autor: Paola de Macedo Gomes Dias Villas Bôas
Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia

Junho de 2021



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Paola de Macedo Gomes Dias Villas Bôas

“Investigação da influência do tratamento com permetrina nas propriedades de combustão da Imbuia (*Ocotea porosa*) da estrutura de cobertura do Santuário de N. Sr.^a da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto-MG”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia

Ouro Preto, junho de 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V719i Villas Boas, Paola de Macedo Gomes Dias .
Investigação da influência do tratamento com permetrina nas propriedades de combustão da Imbuia (*Ocotea porosa*) da estrutura de cobertura do Santuário de N. Sr.ª da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto-MG. [manuscrito] / Paola de Macedo Gomes Dias Villas Boas. - 2021.
158 f.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Patrimônio cultural. 2. Madeira - Madeira Imbui. 3. Madeira - Deterioração - Térmita. 4. Madeira - Conservação. 5. Prevenção de incêndios. 6. Incêndios - Extinção. 7. Ouro Preto (MG). I. Gouveia, Antônio Maria Claret de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 620

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paola de Macedo Gomes Dias Villas Bôas

"Investigação da influência do tratamento com Permetrina nas propriedades de combustão da Imbuia (Ocotea Porosa) da estrutura de cobertura do Santuário de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto-MG"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Materiais

Aprovada em 02 de junho de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Profª Drª Mariana Felicetti Rezende - Instituto Federal do Sul de Minas Gerais - Campus Pouso Alegre
Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra - Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais - Campus Belo Horizonte
Prof. Dr. Alexandre Ferreira Mascarenhas - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto

O Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 05 de julho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Gabriel da Silva Araújo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/07/2021, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0189774** e o código CRC **FC4C64C4**.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, ao meu pai, ao Gu e a mim mesma.

Ao Patrimônio Cultural de Ouro Preto, em
especial ao Santuário de Nossa Senhora da
Conceição de Antônio Dias.

AGRADECIMENTOS

À Rede Temática em Engenharia de Materiais REDEMAT-UFOP-UEMG, pela oportunidade, a toda a equipe do programa da Pós-graduação, à Ana, às colegas da pesquisa em incêndio, Luciana e Elaine e, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia pela oportunidade, ensinamentos, apoio prestado, confiança, parceria e paciência. Toda a minha gratidão!

Ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - LABCP do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, sob a coordenação do Prof. Dr. Fernando de Souza Costa, sobretudo à Prof.^a Dra. Ana Maura Rocha e o Dr. Ely Cortez, pela disponibilidade na realização dos ensaios, pelas orientações e todo o suporte na estadia em Cachoeira Paulista, SP. À Ana Rocha, agradeço também pelo entusiasmo, exemplo, parceria e amizade. Muito obrigada!

Ao Instituto Federal Minas Gerais – Campus Ouro Preto, pela licença de um ano concedida para a escrita e por todo apoio pessoal e logístico para o desenvolvimento da pesquisa, que foi fundamental na efetivação deste trabalho. Muito obrigada aos colegas Prof. Ronaldo Trindade e João Ricardo (Diretoria de Administração e Planejamento), Cláudio Fernando de Souza - Balu (Laboratório de Conservação e Restauo), Edna Paula (Laboratório de Pedologia e Análise Ambiental – CODAGEO), ao Valdete, Fabinho e José Diogo (Oficina de Marcenaria), ao Gilson, por me conduzir a Cachoeira Paulista com segurança, e ao Prof. Rhelman Urzedo (Centro de Microscopia).

À Construtora Ambiental, responsável pelas obras de conservação e restauro da arquitetura do Santuário de N. Sr.^a da Conceição, por abrir as portas da obra, pela disponibilidade e por ceder as substâncias para o tratamento utilizado na pesquisa. Muito obrigada também ao André Macieira, em nome do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN, à Diocese de Mariana e à Paróquia de Nossa Senhora da Conceição de Ouro Preto por ceder as amostras de madeira, objeto de estudo deste trabalho.

À Deise Lustosa, em nome da Empresa ANIMA Conservação e Restauração e Arte, por abrir as portas da obra de restauração dos elementos artísticos para a ilustração do trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Landesmann e Monique Rocha, pela ajuda durante os primeiros testes no laboratório LABEST da COPPE/UFRJ.

Aos queridos Claudio Ribeiro, Renata Flores e Juliana Labarrère pela amizade, hospedagem e apoio durante a estadia no Rio de Janeiro.

Aos (as) queridos (as) colegas da Coordenadoria do Curso de Tecnologia em Conservação e Restauro, do IFMG – Campus Ouro Preto. À Cristina, agradeço também por ceder um cantinho da sua casa para o sossego da escrita e estímulo de sempre.

À Narriman pelos momentos em que ficou com o Gustavo para que pudesse escrever.

À Sanda Laje pelo suporte psicológico e por me ajudar a acreditar.

Ao meu marido André Simões pela compreensão, paciência, suporte e apoio pessoal.

À minha irmã Isabela pelas traduções, encorajamento e total apoio, mesmo de longe.

À Tia Lelê pela revisão, incentivo e o apoio que foi fundamental na finalização desta dissertação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	6
2.1	Objetivo geral	6
2.2	Objetivos específicos	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	Utilização da madeira como material de construção na arquitetura colonial em Ouro Preto e os desafios da preservação e da prevenção contra incêndios	7
3.1.1	A madeira no Santuário de N. Sr. ^a da Conceição: caso de estudo	21
3.1.2	Desafios da preservação do patrimônio e prevenção contra incêndios	28
3.2	Características, propriedades e preservação da madeira	39
3.2.1	Características da Imbuia – <i>Ocotea porosa</i>	39
3.2.2	Degradação dos elementos construtivos em madeira por insetos xilófagos	42
3.2.3	Tratamento e restauro das madeiras contra os xilófagos	46
3.2.4	O comportamento da madeira quando submetida a altas temperaturas	56
3.3	Investigação das propriedades de combustão da madeira em calorímetro cônico	62
3.3.1	Investigações publicadas sobre a combustão da madeira em calorímetro cônico	66
4	METODOLOGIA	75
4.1	Amostras: identificação, preparação, tratamento e caracterização	75
4.1.1	Tratamento dos Corpos de Prova	77
4.1.2	Caracterização das amostras: cálculo de umidade, porosidade e densidade aparente	79
4.2	Calorímetro Cônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE	81
4.3	Ensaio no Calorímetro Cônico	87
5	RESULTADOS	91
5.1	Corpos de prova não tratados – ensaio médio	92
5.2	Corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1% - ensaio médio	97

5.3	Corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10% - ensaio médio.....	99
5.4	Corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.....	102
5.5	Corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10% - ensaio médio.....	106
5.6	Corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1% - ensaio médio.....	109
5.7	Corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10% - ensaio médio.....	112
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	116
6.1	Radiação crítica e tempo de ignição.....	116
6.2	Temperatura da superfície da amostra tratada.....	119
6.3	Taxa de perda de massa.....	120
7	CONCLUSÕES	122
8	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Incêndio na Rua São José em 1977. Fonte: ARQUI. PUB – OP, 1977	2
Figura 1-2: Fórum de Ouro Preto incendiado em 1949. Fonte: Acervo Luiz Fontana. Disponível em: https://ouropreto.mg.gov.br/luizfontana	2
Figura 1-3: Hotel Pilão após o incêndio.	2
Figura 1-4: Hotel Pilão antes do incêndio. Fonte: Rodrigo Marcandier.....	2
Figura 3-1: Vista lateral da <i>Ini</i> . Aldeia	8
Figura 3-2: Interior da <i>Ini</i>	8
Figura 3-3: Perspectiva da estrutura da casa <i>Ini</i>	8
Figura 3-4: Ruínas das primeiras edificações da antiga Vila Rica, no Morro da Queimada, Ouro Preto, MG. Fonte: Fernanda Bueno, 2019.	11
Figura 3-5: Mapa cadastral (sem escala) elaborado a partir da síntese dos dados coletados no Inventário Nacional de Bens Imóveis (INBI-SU), realizado em 2001/2002, em Ouro Preto, que mostra os sistemas construtivos existentes no conjunto urbano. Pode-se perceber a porcentagem de imóveis que ainda possuem preservados os sistemas construtivos tradicionais. Fonte: IPHAN. INBI-SU Mariana/ Ouro Preto.....	12
Figura 3-6: Esquema da estrutura em madeira, em gaiola. Fonte: VASCONCELLOS, 1979, p.38.	13
Figura 3-7: Estrutura em gaiola de madeira da Casa Bernardo Guimarães, FAOP. Fonte: FAOP, 2008, p.41.....	13
Figura 3-8: Trecho de parede com sistema construtivo em pau a pique à mostra. Foto: Ney Nolasco, 2008.....	14
Figura 3-9: Representação da parede de vedação em pau a pique.	14
Figura 3-10: Largo do Rosario, Ouro Preto. Casario com estruturas em gaiolas de madeira e vedações em pau a pique. Fonte: arquivo pessoal.....	14
Figura 3-11: Tabuado em madeira da Casa Bernardo Guimarães, Foto: Ana Ceci Mota, 2020...17	17
Figura 3-12: Barrotes de sustentação do piso do segundo pavimento do edifício da FAOP, no Bairro Rosário, OP. Fonte: arquivo pessoal.....	17
Figura 3-13: (a) forro em tabuado de madeira, tipo saia e camisa. (b) forro artesoadado em madeira. (c) forro em esteira de taquara de bambu. Fonte: arquivo pessoal.	18
Figura 3-14: Estrutura do telhado em madeira da Casa Bernardo Guimarães. Fonte: FAOP, 2008, p.32 e 33.	18
Figura 3-15: Portas e janelas em madeira e beiral em cimalha. Fonte: arquivo pessoal.	19

Figura 3-16 Esquadria de janela em madeira e detalhe do beiral em cachorro e guarda-pó em madeira. Fonte: arquivo pessoal.....	19
Figura 3-17: Esquadrias de portas e janelas em madeira e beiral com lambrequim em madeira. Fonte: arquivo pessoal.	19
Figura 3-18: Vista fachada frontal e direita do Santuário de Nossa Senhora da Conceição. Fonte: arquivo pessoal.	21
Figura 3-19: Plantas de indicação dos sistemas construtivos. Plantas elaboradas a partir do levantamento do Projeto de Conservação e Restauro da Matriz de Nossa Senhora da Conceição. Fonte: TRAVESSA, 2009.	23
Figura 3-20: Piso em tabuado de madeira da tribuna. Fonte: arquivo pessoal.	24
Figura 3-21: Forro em estuque da capela-mor. Fonte: arquivo pessoal.	24
Figura 3-22: Detalhe de retábulo lateral, esculpido em madeira. Foto: Débora Henriques, 2020.	24
Figura 3-23: Forro artesoadado com pintura artística da sacristia. Foto: Debora Henriques, 2020.	24
Figura 3-24: Corredor lateral, piso e forro em madeira. Fonte: arquivo pessoal.	24
Figura 3-25: Nave e seus elementos integrados em madeira. Foto: Debora Henriques, 2020.	24
Figura 3-26: Estrutura em madeira do forro da nave e estrutura metálica de reforço. Fonte: arquivo pessoal.	27
Figura 3-27: Estrutura em madeira do forro da capela-mor e estrutura metálica de reforço da estrutura original. Fonte: arquivo pessoal.	27
Figura 3-28: (a) cravos retirados das terças; (b) e (c) localização de um dos cravos na peça. Fonte: arquivo pessoal.	28
Figura 3-29: Parede em <i>wattle-and-daub</i> . Fonte: https://www.geefix.com/wattle-and-daub . Acesso em 01 de dez. 2020.	33
Figura 3-30: Trecho de parede em pau a pique. Fonte: arquivo pessoal.	33
Figura 3-31: Encaixes comuns das peças estruturais em madeira, encontrados na arquitetura colonial na região de Ouro Preto. Fonte: arquivo pessoal.	33
Figura 3-32: Casa em pau a pique, com parede em estado ruim de conservação, em Ouro Preto, MG. Fonte: arquivo pessoal.	34
Figura 3-33: Casa em pau a pique, com parede em estado ruim de conservação, em Ouro Preto, MG. Fonte: arquivo pessoal.	34
Figura 3-34: Vista aérea de Ouro Preto, da região da Praça Tiradentes. É possível perceber o conjunto de edificações geminadas, formando um único compartimento, e vias estreitas. Fonte: Próxima Trip. Disponível em: www.proximatrip.com.br , acessado em 04 nov. 2020.	37

Figura 3-35: Vista dos telhados e empenas do conjunto urbano, a partir da torre do lado da epístola. Foto: Ivany Walendy, 2016.....	38
Figura 3-36: Face tangencial da madeira Imbuia. Acessado em 25 de out. 2018. Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm	39
Figura 3-37: Face radial da madeira Imbuia. Acesso em 25 de out. 2018. Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm	39
Figura 3-38: <i>Ocotea porosa</i> , árvore.....	39
Figura 3-39: Corte longitudinal esquemático. Fonte: GONZAGA, 2006, p.23.....	40
Figura 3-40: Corte transversal esquemático de uma folhosa. Fonte: GONZAGA, 2006, p.21.	40
Figura 3-41 : Cupim de solo (<i>Heterotermes tenuis</i>). Fonte: https://proec.ufabc.edu.br/cupim/heterotermes-tenuis/ . Acessado em 25 de jul.2019.....	45
Figura 3-42: Cupim de madeira seca. Fonte: http://imdap.entomol.ntu.edu.tw . Acessado em 25 de jul.2019.....	45
Figura 3-43: Madeira retirada da Matriz de N. Sr. ^a da Conceição, com furos, indicando a presença de xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.....	45
Figura 3-44: Madeira retirada da Matriz de N. Sr. ^a da Conceição, deteriorada por xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.....	45
Figura 3-45: Madeira retirada da Matriz de N. Sr. ^a da Conceição, bastante deteriorada por cupins. Fonte: arquivo pessoal.....	46
Figura 3-46: Trabalho de imunização por aspersão da estrutura do telhado. Foto: CONTRUTUTORA AMBIENTAL, 2015.....	55
Figura 3-47: Trabalho de imunização por aspersão das madeiras novas que substituíram as madeiras danificadas. Foto: CONTRUTUTORA AMBIENTAL, 2015.....	55
Figura 3-48: Fases da queima da madeira. 47(a) Madeira sã. 47(b) Pirólise lenta. 47(c) Pirólise rápida. 47(d) Combustão flamejante. 47(e) Combustão incandescente. 47(f) Madeira queimada, em resfriamento, ainda incandescente. Fonte: arquivo pessoal.....	60
Figura 3-49: Representação do calorímetro cônico, e seus componentes. Fonte: BABRAUSKAS, 2020, p.4 (tradução da autora).....	66
Figura 4-1: Peça inteira de imbuia (mão-francesa), NSC5, antes de ser cortada. Fonte: Arquivo pessoal.....	75
Figura 4-2: Peça inteira de imbuia (mão-francesa), NSC8, antes de ser cortada. Fonte: Arquivo pessoal.....	75
Figura 4-3: Extremidades da mão francesa NSC5. Fonte: arquivo pessoal.....	75

Figura 4-4: Uma das extremidades da mão-francesa NSC5. Fonte: arquivo pessoal.	75
Figura 4-5: Corpo de prova, nas dimensões de 100mm x 100mm x 30mm, com a presença de furos e galerias provocadas por insetos xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.	76
Figura 4-6: Estufa onde as amostras foram secas. Laboratório Pedologia e Análise Ambiental - CODAGEO, IFMG - Campus Ouro Preto. Fonte: arquivo pessoal.	77
Figura 4-7: Balança de precisão do Laboratório de Solos - CODAEDI IFMG - Campus Ouro Preto – Fonte: arquivo pessoal.	77
Figura 4-8: Da esquerda para a direita: mistura de permetrina com água, querosene e isoparafina.	78
Figura 4-9: Madeiras tratadas na capela de exaustão do Laboratório de Pedologia e Análise Ambiental. Fonte: arquivo pessoal.	78
Figura 4-10: Bancada com o calorímetro cônico, instalada no laboratório de ensaios de combustão do INPE/LCP.	82
Figura 4-11: Calorímetro cônico montado em sua estrutura de sustentação e balança - INPE/LCP. Fonte: Arquivo pessoal.	82
Figura 4-12: Esquema do cone e seus elementos. Fonte: GEMAQUE (2012 p. 55) e CASTRO (2005).	83
Figura 4-13: Esquema de localização dos termopares.	84
Figura 4-14: Detalhe do termopar posicionado na superfície da amostra, durante a ignição. Fonte: arquivo pessoal.	84
Figura 4-15: Detalhe do termopar posicionado na superfície da amostra. Fonte: arquivo pessoal.	84
Figura 4-16: Placas refletoras e balança de medição da perda de massa. Fonte: arquivo pessoal.	85
Figura 4-17: Balança Gehaka, modelo BG 4000.	85
Figura 4-18: Analisador de gases. Fonte: arquivo pessoal.	86
Figura 4-19: Monitor de temperatura, controlador de potência e inversor de frequência da exaustão da bancada do calorímetro cônico. Fonte: arquivo pessoal.	87
Figura 4-20: Porta-amostras com a manta (a); com a folha de alumínio (b) e com a amostra. Fonte: arquivo pessoal.	88
Figura 4-21: Detalhe do leitor de temperatura da superfície no momento da ignição, e a mostra em chamas. A temperatura mostrada é após a ignição. Fonte: arquivo pessoal.	90
Figura 5-1: Histórico de massa no ensaio médio correspondente aos corpos de prova não tratados.	93

Figura 5-2: Histórico da taxa de perda da massa observada no ensaio médio correspondente aos corpos de prova não tratados.....	93
Figura 5-3: Histórico da concentração do O ₂ ambiente durante a combustão no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.	94
Figura 5-4: Histórico da concentração do CO ₂ produzido na combustão no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.....	94
Figura 5-5: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.....	95
Figura 5-6: Histórico de temperaturas (°C) da superfície do corpo de prova não tratado e da resistência do cone.....	96
Figura 5-7: Aspecto das madeiras não tratadas, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.....	96
Figura 5-8: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1%.	97
Figura 5-9: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1%.	98
Figura 5-10: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1%.	98
Figura 5-11: Aspecto das madeiras tratadas com solução aquosa de permetrina a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.....	99
Figura 5-12: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.	100
Figura 5-13: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.	100
Figura 5-14: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.	101
Figura 5-15: Aspecto das madeiras tratadas com solução aquosa de permetrina a 10%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.....	102
Figura 5-16: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.	103
Figura 5-17: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.	103
Figura 5-18: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em querosene a 1%	104

Figura 5-19: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.....	105
Figura 5-20: Aspecto das madeiras, tratadas com solução de permetrina com querosene a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.	105
Figura 5-21: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.....	106
Figura 5-22: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.	107
Figura 5-23: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.	107
Figura 5-24: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.	108
Figura 5-25: Aspecto das madeiras tratadas com solução de permetrina com querosene a 10%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.	108
Figura 5-26: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a uma concentração de 1%.....	109
Figura 5-27: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de com solução de permetrina em isoparafina a uma concentração de 1%.....	109
Figura 5-28: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1%.	110
Figura 5-29: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio de corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1%.....	111
Figura 5-30: Aspecto das madeiras tratadas com solução de permetrina em isoparafina a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.	111
Figura 5-31: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.	112
Figura 5-32: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.	113
Figura 5-33: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.	113

Figura 5-34: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.....	114
Figura 5-35: Aspecto das madeiras tratadas com permetrina diluída em isoparafina, a 10%...	115
Figura 6-1: Tempo de ignição em função do fator $\rho T_{ig} s q''$	116
Figura 6-2 Comparação de erros entre t_{ig} (s) medidos e os calculados por Shi-Chew.....	117
Figura 6-3: Comparação de T_{ig} medido e Shi-Chew calculado com irradiância crítica $q'' = 16$ kW/m ²	118
Figura 6-4: Temperatura da superfície da amostra tratada em função do fator $q'' t_{ig} 2\rho$	119
Figura 6-5: Correlação entre a massa queimada calculada e medida das amostras tratadas. .	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Características da Imbuia (<i>Ocotea porosa</i>).....	42
Tabela 4-1: Propriedades geométricas e densidade aparente dos corpos de prova.....	79
Tabela 4-2: Propriedades físicas médias dos corpos de prova.....	81
Tabela 5-1: Radiação incidente sobre os corpos de prova.....	92

LISTA DE SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CE – Concentrado Emulsionável

COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DPHAN – Departamento do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

ECH – Calor Efetivo de Combustão

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FAOP – Fundação de Arte de Ouro Preto

HRR – Taxa de Liberação de Calor

IEPHA – Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais

IFMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

ISO – International Organization for Standardization

MEC – Ministério da Educação

MLR – Taxa de Perda de Massa

NIST – National Institute of Standards and Technology

PHRR – Pico da Taxa de Liberação de Calor

PMOP – Prefeitura Municipal de Ouro Preto

THR – Liberação de Calor Total

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UFV – Universidade Federal de Viçosa

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SIMBOLOS

A - área

cm² - centímetro quadrado

cm³ - centímetro cúbico

F₁₂ - fator de forma

feu - interação entre o fogo, a edificação e os usuários

g - grama

h - altura

L - litro

kJ - kilojoule

MJ - megajoule

kW - kilowatts

ml - mililitros

mm - milímetros

m² - metro quadrado

$\Delta m'(t)$ - taxa de massa consumida

Δm - média de massa consumida

Δm_i - perda de massa inicial

M_o - a massa média no estado natural do corpo de prova

M_s - a massa seca média do corpo de prova

P - média das porosidades dos corpos de prova

q" - radiação incidente

s - segundos

S_u - desvio-padrão das umidades dos corpos de prova

t_{ig} - tempo de ignição

T_{ig} - temperatura de ignição

T_{igcon} - temperatura da resistência elétrica do cone no momento do início da ignição

T_{igs} - temperatura da superfície da amostra no início da ignição

U - umidade média dos corpos de prova

ε - emissividade da resistência do cone

σ - constante de Stefan-Boltzmann

ρ - densidade aparente

RESUMO

Dentre os materiais mais empregados nos sistemas construtivos tradicionais das edificações coloniais brasileiras está a madeira, principalmente na arquitetura que compõe a cidade de Ouro Preto, patrimônio da humanidade. A segurança contra incêndio é uma das ações mais desafiadoras na preservação desse patrimônio cultural. Os estudos que buscam a prevenção e o combate ao fogo nos sítios históricos dependem de uma série de dados essenciais das propriedades dos materiais construtivos, que compõem o conjunto urbano, e das respectivas técnicas de conservação e restauro, mas muitas destas informações ainda são escassas nas normas e bibliografias existentes. Para contribuir com mais um elemento base para essas investigações, neste trabalho é avaliada a influência do tratamento da madeira contra insetos xilófagos, com soluções de pesticida à base de permetrina em água, querosene e isoparafina, em parâmetros de comportamento ao fogo, como a taxa de liberação de calor ou potência média de combustão, a quantidade de calor liberado, o tempo de ignição, a temperatura de ignição, a razão de perda de massa específica pelo tempo e o histórico de concentração de O₂ e CO₂ durante a combustão. Os ensaios foram desenvolvidos em um calorímetro cônico no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, conforme especificações da ISO 5660-1 e ASTM E1354-11b, a um fluxo de calor constante de 50kW/m², perpendicular à orientação das fibras. A amostra da Imbuia (*Ocotea porosa*) foi colhida durante as obras de restauração da Matriz de Nossa Senhora da Conceição, na cidade de Ouro Preto, MG, entre as peças deterioradas que foram substituídas da estrutura do telhado. As conclusões sugerem que os tratamentos diminuíram a irradiância crítica de 28kW/m² para 16kW/m². O tempo de ignição e a temperatura de ignição são dados por relações lineares com densidade aparente, irradiância incidente e concentração de permetrina. A taxa de perda de massa específica aumenta com a concentração de permetrina e varia com o solvente, sendo os maiores valores encontrados em amostras tratadas com isoparafina.

Palavras-chave: patrimônio cultural; madeira Imbuia tratada contra xilófagos; reação ao fogo; calorímetro cônico; irradiância crítica; tempo e temperatura de ignição; taxa de perda de massa.

ABSTRACT

Wood is among the most used materials in traditional construction system of Brazilian colonial buildings, especially in the Architecture of Ouro Preto Township, a UNESCO World Cultural Heritage. One of the biggest preservation challenges is to protect this World Cultural Heritage site against fire. Scientific studies to prevent and combat fire in historical sites, depend on essential data about the properties of construction materials used to build the urban landscape, and of the restoration and preservation techniques used. But much of this information still scarce in existent technical standards and bibliography available. To contribute with one more basic element to those investigations, the main objective of this study was to evaluate the influence that treating woods with solutions of permethrin diluted in water, kerosene and isoparaffin to eliminate xylophagous insects will have on fire behavioral characteristics as such as the rate of heat released or the average of combustion potency, the amount of heat released, ignition time, ignition temperature, mass loss rate by time, and the history of oxygen and carbon dioxide concentration during combustion. The experiments were developed in a cone calorimeter from the Brazilian National Institute of Spatial Research (Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE), constant heat flux of 50kW/m² orthogonal to the orientation of the fibers, using the equipment mass loss calorimeter (CCPM), according to the specifications of ISO 5660-1 and ASTM-E1354-11b. A sample of Imbuia wood (*Ocotea porosa*) was collected among the deteriorating pieces of the roof structure that were substituted during the restoration construction of the parish church “Matriz de Nossa Senhora a Conceição” in the Ouro Preto-MG Township. The conclusions suggested that the treatment of the wood decreased the critical irradiance from 28kW /m² to 16kW/m². The ignition time and the ignition temperature data presented linear relation with bulk density, incident irradiance and permethrin concentration. The ration of specific mass increases with permethrin concentration and varies according to solvent used, being biggest values found on samples treated with isoparaffin.

Key-words: cultural heritage; wood treated against xylophagous; Imbuia wood reaction to fire; cone calorimeter; critical irradiance; ignition time and temperature; mass loss rate.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os agentes motivadores de danos ao patrimônio cultural os incêndios são, sem qualquer dúvida, os que causam a maioria das perdas mais graves e irreversíveis. Para diversos outros danos, pode ainda ser possível a recuperação do bem por meio de ações de conservação e restauro. Em um incêndio, o que foi carbonizado não é mais passível de ser restaurado; em alguns casos, apenas reconstruído.

Não nos faltam casos de ocorrências de incêndio em monumentos que culminaram na perda parcial ou total de documentos, materiais etnográficos, artísticos e da própria arquitetura, que representavam a memória e a cultura da humanidade. Dentre os dois últimos incêndios mais representativos podemos citar o caso da Catedral de Notre-Dame de Paris, na França, incendiada em 15 de abril de 2019 durante a realização de trabalhos de restauração, destruindo parte da cobertura e a flecha projetada pelo arquiteto restaurador Eugène Viollet-le-Duc no século XIX, e, no Brasil, o caso do Museu Nacional no Rio de Janeiro.

O incêndio do Museu aconteceu no ano anterior ao da Catedral, em 2 de setembro de 2018, em proporções bem maiores e com perdas mais significativas: praticamente todo o acervo que se encontrava em exposição dentro do edifício principal, que perdeu quase a totalidade da cobertura, restando apenas as paredes de amarração. Nessa tragédia, perdeu-se muito da história e da cultura da humana, como: o crânio de Luzia, a maior coleção egípcia da América Latina e os artefatos que eram únicos vestígios de algumas tribos. Essas tragédias sempre reacendem as discussões sobre a importância da gestão de riscos e da necessidade de investimentos na prevenção e no combate a incêndios do patrimônio cultural. O Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN publicou poucos dias depois a Portaria nº 366/2018, que normatiza Projetos de Prevenção e Combate a Incêndios e Pânico (PPCIP) em Patrimônio Cultural no país.

A cidade de Ouro Preto, em Minas Gerais, também já teve perdas irreparáveis causadas por incêndios. Ainda no início do século XVIII, o então Arraial foi incendiado a mando de Conde de Assumar em represália à Sedição de 1720, onde hoje estão localizadas as ruínas do atual Morro da Queimada¹. No século XX, dois grandes incêndios marcaram a história da cidade: o

¹ Disponível em: <http://morrodaqueimada.fiocruz.br/historico-2.php>. Acesso em 11 de fevereiro de 2020.

incêndio em 1949 do Fórum localizado na Praça Tiradentes que destruiu grande parte da documentação judicial colonial eleitoral, criminal e cível (Figura 1-1); e, no dia 10 de dezembro de 1977, um grande incêndio tomou conta do conjunto da Rua São José (Figura 1-2). A partir de um dos sobrados, o fogo viajou para as casas contíguas, danificando ao todo 4 edificações (ARQ. PUB.– OP, 1977). O incêndio mais recente, e que se tornou referência nos discursos sobre a preservação e a prevenção e o combate a incêndios do patrimônio cultural, foi o do antigo Hotel Pilão (Figura 1-3), completamente destruído no dia 14 de abril do ano de 2003 (Figura 1-4). A edificação estava localizada na Praça Tiradentes e integrava o mais importante e imponente espaço da cidade.



Figura 1-2: Incêndio na Rua São José em 1977.
Fonte: ARQUI. PUB – OP, 1977

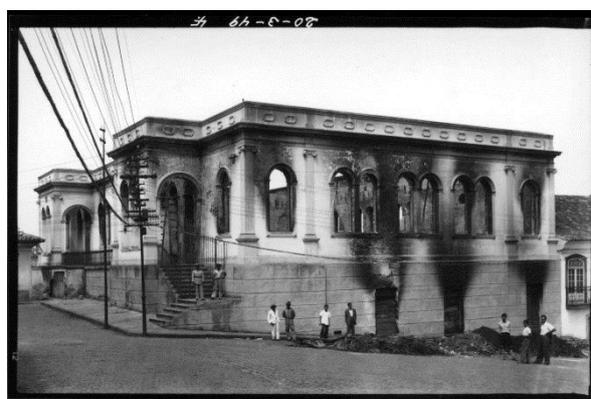


Figura 1-1: Fórum de Ouro Preto incendiado em 1949. Fonte: Acervo Luiz Fontana. Disponível em: <https://ouropreto.mg.gov.br/luizfontana>. Acessado em 01 de fevereiro 2020.



Figura 1-3: Hotel Pilão antes do incêndio. Fonte: Rodrigo Marcandier.



Figura 1-4: Hotel Pilão após o incêndio. Fonte: Eduardo Trópia. Disponível em: <https://www.kickante.com.br/campanhas/desfile-de-moda-incendio-hotel-pilao-mg>. Acessado em 12 de novembro de 2020.

No caso de sítios históricos, como o conjunto urbano de Ouro Preto, os incêndios desenvolvidos são potencialmente muito severos (CLARET-GOUVEIA, 2006). Atributos que

deram à cidade os títulos de patrimônio nacional em 1938 e de Patrimônio da Humanidade em 1980, infelizmente são os mesmos que contribuem para aumentar a probabilidade de que sinistros como esses aconteçam. Desde a conformação urbana, com casas geminadas e ruas estreitas, passando pelos sistemas construtivos das edificações que têm a madeira como principal material de construção. Corroboram com o aumento dos fatores de risco a incêndios as condições de conservação de inúmeros imóveis, em que paredes de pau a pique não apresentam mais a estabilidade e estanqueidade necessárias para impedir que o fogo viaje de um compartimento a outro. E, também, as ações públicas para a prevenção e o combate incêndios, que são constantemente postergadas e substituídas por outras ações consideradas mais urgentes, em detrimento da segurança da vida humana (indiscutivelmente de importância primordial) e da preservação do patrimônio cultural. Essas características singulares da cidade, a utilização da madeira nas construções e suas relações com os desafios da segurança contra incêndio são abordadas na primeira parte da Revisão Bibliográfica desta dissertação, no Capítulo 3.

A madeira é um material de construção bastante heterogêneo e com uma enorme diversidade de espécies e variabilidade de propriedades entre indivíduos de uma mesma espécie. Especialmente para as cidades históricas, como Ouro Preto, entender o comportamento da madeira à combustão é fundamental para a proposição de medidas de prevenção e combate a incêndios. Portanto, é imprescindível conhecer as características específicas da madeira a ser trabalhada, no caso desta dissertação a Imbuia (*Ocotea porosa*), a partir de amostras descartadas da estrutura do telhado, na última obra de conservação e restauro do Santuário de Nossa Senhora da Conceição, e cedida pelo IPHAN e pela Diocese de Mariana.

Ainda na primeira parte da Revisão Bibliográfica, para tentar estabelecer, mesmo que aproximadamente, o período em que a madeira utilizada nesse trabalho foi empregada na edificação, ou seja, a idade da peça, buscamos conhecer o histórico das obras de conservação e restauro já realizadas até hoje, principalmente os serviços executados na estrutura do telhado. Essa informação pode fornecer dados sobre as alterações que o material sofreu ao longo dos anos, e que podem influenciar na sua resistência às altas temperaturas.

Se por um lado os incêndios têm a capacidade de provocar prejuízos insanáveis, por outro os insetos xilófagos, como as brocas e os cupins, são agentes com grande capacidade de degradação dos elementos em madeira que, se não combatidos a tempo, podem também ocasionar danos irreparáveis à arquitetura e seus elementos artísticos integrados. Tratamentos

de desinfestação e prevenção contra a ação desses agentes são necessários e devem ser realizados. No entanto, vários dos pesticidas utilizados e seus diluentes são altamente inflamáveis, como a permetrina e os solventes orgânicos querosene e isoparafina, investigados neste trabalho.

Muitos dos incêndios no patrimônio cultural edificado intercorrem durante obras de manutenção, conservação e restauro, quando essas substâncias costumam ser aplicadas, além da execução de outros serviços que podem aumentar o risco de incêndio nessas circunstâncias, como a utilização de máquinas de solda. O incêndio ocorrido em 1999, na Igreja do Carmo, da cidade de Mariana, MG, que destruiu quase que completamente a nave da igreja, e o da Catedral de Notre Dame são exemplos de incêndios durante a execução de obras de restauro, que tiveram como provável causa a aspersão de produtos de desinfestação e os serviços de solda respectivamente. Durante a última obra de restauro da Matriz de Nossa Senhora da Conceição, no dia 22 de maio de 2015, um princípio de incêndio foi percebido e combatido, a tempo de não se transformar em um incêndio.

Na segunda parte da Revisão Bibliográfica foi realizado um levantamento desses tratamentos de desinfestação contra os xilófagos, incluindo os mais comumente empregados na conservação e no restauro do patrimônio em Minas Gerais, especialmente na Matriz de Nossa Senhora da Conceição, como também foram abordadas as características específicas da Imbuia e a descrição dos xilófagos degradadores de madeira, geralmente encontrados. Além disso, entender os fenômenos que ocorrem com as madeiras, quando expostas às altas temperaturas de incêndios, incluindo as fases de degradação na combustão, é fundamental quando se quer investigar o seu comportamento durante um incêndio, o que também foi estudado e descrito na seção 3.2.

Gerir os riscos de incêndios em edificações, seja ou não do patrimônio cultural, envolve o desenvolvimento de projetos de prevenção e combate a incêndios, preferencialmente baseados em desempenho. Segundo Claret-Gouveia (2017), as adaptações ou a não utilização de medidas de segurança nos imóveis devem levar em consideração, de forma inequívoca, condições ambientais de sustentabilidade da vida humana, em tempo suficiente para a realização ações de fuga e salvamento.

Assim, modelar o comportamento do fogo, da edificação e dos usuários em um incêndio, requer dados específicos de cada material e dos sistemas construtivos, como a quantidade de

massa perdida pela queima, inerente ao tempo de resistência desses elementos, e a quantidade de calor que cada um deles libera, contribuindo para o desenvolvimento de incêndio. Quanto maior o número de informações disponíveis, mais preciso e mais próximo da situação real de incêndio será o modelamento, e, conseqüentemente, mais assertivas serão as propostas de gestão do risco. No entanto, pouco se sabe sobre o comportamento dos materiais e sistemas construtivos tradicionais em situação de incêndio, bem como sobre as substâncias e procedimentos utilizados na conservação e restauro, como os pesticidas, caso de estudo desta dissertação.

O calorímetro cônico, desde a década de 1980, tem sido utilizado como uma ferramenta eficaz na investigação das respostas dos materiais a incêndios. É utilizado para medir dados como a taxa de liberação de calor, a potência média de combustão, a quantidade total de calor liberado, o tempo de ignição, a temperatura de ignição, a razão de perda de massa pelo tempo e o histórico de concentração de O₂ e CO₂ durante a combustão. Na seção 3.3, estão pontuadas cada uma destas propriedades, como também as principais componentes do calorímetro cônico, de acordo com a norma ASTM E1354-17 “Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter”. Em seguida foi feita uma síntese de pesquisas e publicações que tratam da investigação do comportamento de diversos tipos de madeiras em altas temperaturas, tratadas ou não, utilizando o calorímetro cônico.

O calorímetro cônico cumpre a função de uma fonte de calor que incide sobre a superfície da amostra, como um objeto que inicia a ignição em um incêndio para os objetos adjacentes, em faixas de radiação que podem variar de 5kW/m² a 100kW/m². Esta pesquisa utilizou a radiação de 50kW/m² no calorímetro cônico, montado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, que está descrito no Capítulo 4, Metodologia, onde também constam os procedimentos de preparação, caracterização, aplicação do produto inseticida, além dos processos de ensaio no calorímetro cônico.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais e possíveis correlações com as propriedades das madeiras tratadas com permetrina, diluídas em água, querosene e isoparafina, nas dosagens de 1% e 10%.

As conclusões finais do trabalho estão no Capítulo 6, e, no Capítulo 7, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema desta dissertação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo a investigação teórico-experimental da influência do tratamento contra insetos xilófagos, utilizando permetrina em soluções de isoparafina, querosene e água, nas propriedades de combustão da Imbuia - *Ocotea porosa*, uma das espécies de madeira antigamente utilizadas nas construções da cidade de Ouro Preto.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar e descrever as formas de utilização da madeira como material de construção nas edificações do conjunto urbano tombando de Ouro Preto, especialmente no Santuário de Nossa Senhora da Conceição.
- Entender os desafios da preservação do patrimônio cultural edificado face à necessidade de prevenção de incêndios.
- Investigar os diversos métodos e produtos de imunização de madeiras contra insetos xilófagos, que têm sido utilizados nas obras de conservação e restauro.
- Medir o tempo necessário para o início da ignição da madeira Imbuia, além da temperatura de ignição, da temperatura da superfície da amostra no início da ignição, para cada tipo de solvente e concentração de permetrina.
- Aferir a taxa de perda de massa das amostras das madeiras tratadas nas diversas soluções.
- Aferir quantidade de calor liberada por unidade de área e a taxa de liberação de calor da Imbuia com diferentes tratamentos contra xilófagos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica segue em três direções principais para a delimitação teórica desta dissertação: o uso da madeira como material de construção na arquitetura colonial na Região dos Inconfidentes e os pressupostos e desafios da sua preservação, dando ênfase aos riscos de incêndio; o uso da madeira na Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias; a caracterização e as propriedades da madeira e seu comportamento frente à ação do fogo, os processos de degradação aos quais o material está sujeito e as formas de restauro, tratamento e proteção que podem ser empregados e, por fim, um estudo sobre metodologias de investigação, desenvolvidas nos últimos anos, do comportamento da madeira frente à exposição a altas temperaturas, com o uso de calorímetro cônico.

3.1 Utilização da madeira como material de construção na arquitetura colonial em Ouro Preto e os desafios da preservação e da prevenção contra incêndios

A madeira é utilizada como material de construção desde que o ser humano, lá na pré-história, deixa de utilizar os espaços naturais para se proteger e começa a construir seu próprio abrigo, aproveitando os materiais existentes no meio em que vivia, transformando-os da forma mais conveniente e com a técnica e as ferramentas disponíveis. No II Livro, do *De Architectura*, Vitruvius² descreve a origem das formas das moradas nos primórdios da humanidade e cita a importância do uso da madeira nas primitivas construções:

4. Podemos verificar, com efeito, que estas coisas foram estabelecidas a partir das origens que acima descrevemos, porque até ao dia de hoje nas nações estrangeiras se levantam edifícios segundo estas práticas, como na Gália, Hispânia, Lusitânia, Aquitânia, seja com varas de roble³, seja com palha de colmo. Na nação dos Colcos, no Ponto, devido à abundância de florestas, colocadas árvores inteiras horizontalmente à esquerda e à direita sobre a terra, e deixando entre elas um espaço correspondente ao seu comprimento, dispõem-se outras transversalmente sobre os seus extremos, os quais delimitam o espaço central da habitação. Unindo então, em cima, os ângulos nas quatro partes com traves alternadas, e assim dispondo as paredes com as árvores na vertical desde os fundamentos, levantam torres e tapam com folhas e com lama os interstícios que surgem devido ao tosco da madeira. Também erguem os telhados deixando descair nos extremos as vigas, que cruzam, juntando-as gradualmente, e assim levantam pirâmides em altura, ao centro, a partir dos quatro lados, as quais formam coberturas abobadadas de torres, segundo costume bárbaro, revestindo-as com folhagem e lama (Vitruvius, 2006, p72).

² Vitruvius (de acordo com o tradutor do latim para o português, M. Justino Maciel), engenheiro militar romano, viveu e escreveu a primeira teoria e o primeiro manual sobre arquitetura, urbanismo e engenharia, no século Ia.C., tendo participado das campanhas de Júlio César, e oferecido a obra *De Architectura* ao imperador Augusto.

³ Segundo Justino Maciel (VITRUVIO, 2006), roble refere-se à madeira do carvalho.

No Brasil, os povos indígenas empregavam a madeira como material fundamental nos sistemas construtivos das suas habitações; afinal de contas, era uma matéria-prima abundante, com uma imensa variedade de qualidades e de extração relativamente fácil. De acordo com José Afonso Portocarrero (2018), a madeira na arquitetura tradicional *Ini* da aldeia Irantxe, no Mato Grosso, é desta forma utilizada (Figuras 3-1, 3-2 e 3-3):

A construção se inicia por uma linha de três esteios, *kurarakje'y*, com 25cm de diâmetro, que suportam a viga de cumeeira, *kaykje'y*, que por sua vez recebe as terças-vigas, *takykey*, com cerca de 10cm de diâmetro, amarradas com imbirá, ju'u. Sobre essa estrutura são dispostas ripas, *kuátakje'y*, com espaçamento de 20cm entre si, e que recebem as folhas de guariroba, *kuny-já-waly*, como cobertura. Internamente são colocadas quatro travessas que cumprem a função de travamento, estando as duas mais altas a cerca de 2,80m do solo, e as mais baixas a 2,00m de altura[...] as primeiras estão presas apenas nas vigas-terças da cobertura-parede, enquanto as outras duas, estão amarradas nos dois esteios mais próximos das entradas, e também presas nas vigas-terças.

Os esteios fincados na terra, *pata*, podem ser de pindaíva, goiabeira do mato ou canela; a cumeeira e as vigas são de madeira de pindaíva, sendo as ripas feitas de canela amarradas com imbirá, e as travessas para o travamento são de cedrinho (PORTOCARRERO, 2018, p.132).



Figura 3-1: Vista lateral da *Ini*. Aldeia Cavari.
Fonte: PORTOCARRERO, 2018, p.130.



Figura 3-3: Perspectiva da estrutura da casa *Ini*.
Fonte: PORTOCARRERO, 2018, p.136.



Figura 3-2: Interior da *Ini*.
Fonte: PORTOCARRERO, 2018, p.131.

A partir da ocupação portuguesa, a presença da madeira na arquitetura brasileira continua marcante, mesmo que muitas vezes tenha sido substituída em diversos elementos estruturais. Não é para menos, pois a madeira foi o primeiro objeto de exploração no país e o nosso primeiro produto de exportação. Nesse momento, começam a surgir novas formas de construir e de ocupar os espaços, explorando o conhecimento e o saber fazer da mão de obra africana escravizada, sob técnicas, modelos e regras lusitanas, e com a especulação da “sabedoria dos indígenas quanto às características das madeiras nativas” (ALMEIDA, 2005, p.11).

Para ser ter uma ideia da diversidade das espécies de madeira disponíveis aqui no Brasil, até hoje foram identificadas aproximadamente 7.880 espécies arbóreas nativas, segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais⁴, distribuídas pelos seis tipos de biomas diferentes que compõem o território nacional⁵. Esse valor pode representar apenas 80% do total, sendo que alguns autores estimam que somente na Floresta Amazônica possam existir mais de 11.000 espécies diferentes.⁶

O arquiteto e engenheiro francês Louis Léger Vauthier⁷ (VAUTHIER,1975), em meados do século XIX, descreve sobre a disponibilidade de madeira no Brasil, para a utilização na construção civil:

As florestas no Brasil, sem exagero algum, fornecem as mais belas e melhores madeiras de construção conhecidas. Para vigamentos, vinte espécies se disputam a preferência e rivalizam em rigidez, dureza e elasticidade. O *coração-de-negro*, a *sicupira*, o *pau-ferro*, a *massaranduba*, a *sapucaia* e uma infinidade de outras estão ao alcance das mãos do construtor (p. 54).

No início do século XVI, a madeira e a terra eram os materiais mais disponíveis para erguer as construções provisórias que, na medida da necessidade dos colonizadores, foram sendo substituídas por outras consideradas mais sólidas. (OLENDER, 2006, p.18). A partir daí, as tecnologias construtivas trazidas eram adaptadas às especificidades de cada lugar, como as condições climáticas, a morfologia e a topografia dos terrenos, às diferentes qualidades de

⁴ Informação disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/especies-florestais>, acessada em 15/08/2019.

⁵ Informação disponível em: <http://www.ibge.gov.br>, acessada em 09/08/2019.

⁶ Informação disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/especies-florestais>, acessada em 15/08/2019.

⁷ Vauthier veio ao Brasil em 1939, junto com outros profissionais da construção civil trazidos pelo presidente da Província de Pernambuco, voltando a Paris em 1946. Segundo Gilberto Freire, as cartas de Vauthier a respeito da arquitetura doméstica no Brasil, assim como o seu Diário Íntimo, os relatórios como engenheiro e os artigos na revista O Progresso são fontes de informações valiosas, não somente técnicas, mas também críticas e sociológicas, sobre o “progresso material, artístico e de técnica administrativa em nosso país durante a primeira metade do século passado.” (VAUTHIER, 1975, p. 4).

espécies de madeiras e à disponibilidade de outros materiais naturais que poderiam servir para as novas habitações, o que incluía também a pedra.⁸ Com isso, à medida que se desloca pelo território, e as características do meio modificam-se, a arquitetura também muda, mesmo que, como indica Rodrigues (1975), “poucas particularidades podem ser apontadas como exclusivas de uma ou outra região” (pág. 313).

Principalmente nas regiões onde a arquitetura sob influência portuguesa foi mais expressiva, os sistemas construtivos variavam basicamente entre: o pau a pique (ou taipa de mão), o adobe e a taipa de pilão, que tinham como material principal a terra crua; a alvenaria de pedra argamassada com barro ou a cal, e a de pedra seca irregular ou aparelhada; e a parede grossa de tijolo cozido, esse menos comum. Duas ou três dessas técnicas podiam ser encontradas simultaneamente em uma mesma edificação, e a madeira presente em todas elas, fazendo parte dos sistemas construtivos, e/ou nas estruturas dos telhados e nos acabamentos, como as esquadrias, pisos e forros. Vauthier (1975) descreve também com detalhes os sistemas construtivos utilizados no Brasil, que pôde observar durante o tempo em que trabalhou aqui, entre 1940 e 1946.

Em Minas Gerais, particularmente em Ouro Preto, a utilização do pau a pique generalizou-se a partir da primeira metade do século XVIII, “tanto em sobrados de vulto como em pequenas casas urbanas”, segundo Rodrigues (1975, p.293). A exceção está nos monumentos oficiais e na maioria das construções religiosas de maior importância, onde as paredes externas e as principais internas são em alvenaria de pedra argamassada ou em taipa de pilão, considerados sistemas construtivos mais nobres pelos portugueses. Porém, as demais divisões internas também podem seguir a tecnologia da taipa de mão e, desse mesmo modo, eram as primeiras edificações da antiga Vila Rica⁹, onde era aproveitada a pedra de canga nas alvenarias de fechamento, que até hoje podem ser observadas as ruínas no Parque Arqueológico do Morro da Queimada – OP (Figura 3-4).

⁸ Os condicionantes ambientais e a disposição de matéria-prima não são os únicos fatores preponderantes na diversidade do patrimônio da arquitetura brasileira atual. Muitas outras questões definiram as peculiaridades de cada lugar, como a interação entre a cultura presente e a dos imigrantes que chegaram ao longo da história, a atividade econômica que se desenvolvia e as ordens políticas, ideológicas e artísticas que dominavam em cada período.

⁹ Primeiro nome dado à cidade de Ouro Preto, quando da sua fundação em 1720, de acordo com: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1493/>, acessado em 15/08/2019.



Figura 3-4: Ruínas das primeiras edificações da antiga Vila Rica, no Morro da Queimada, Ouro Preto, MG. Fonte: Fernanda Bueno, 2019.

Até o início deste século, o pau a pique estava preservado em muitas edificações do conjunto urbano tombado de Ouro Preto, como mostra o mapa elaborado a partir das informações coletadas no Inventário Nacional de Bens Imóveis-INBI-SU (Figura 3-5), realizado entre 2001 e 2002 pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG em parceria com o IPHAN. Sendo a madeira o principal elemento na composição desse tipo de sistema construtivo, a sua utilização é evidente na cidade, mesmo que o patrimônio já tenha sido sofrido várias alterações ao longo dos anos, com a substituição de tecnologias tradicionais por outras contemporâneas. Segundo Vieira (2006), as normas de construção municipais e federais, como também os pareceres técnicos emitidos pelo IPHAN desde o tombamento, indicam o emprego da madeira ao menos nas esquadrias e estruturas de telhados.

LEGENDA

ADOBE

- 100 a 90%
- 89 a 60%
- 59 a 30%

PEDRA

- 100 a 90%
- 89 a 60%
- 59 a 30%

PAU-A-PIQUE

- 100 a 90%
- 89 a 60%
- 59 a 30%

TIJOLO

- 100 a 90%
- 89 a 60%
- 59 a 30%

MADEIRA

- 100 a 90%

† IGREJAS



Figura 3-5: Mapa cadastral (sem escala) elaborado a partir da síntese dos dados coletados no Inventário Nacional de Bens Imóveis (INBI-SU), realizado em 2001/2002, em Ouro Preto, que mostra os sistemas construtivos existentes no conjunto urbano. Pode-se perceber a porcentagem de imóveis que ainda possuem preservados os sistemas construtivos tradicionais. Fonte: IPHAN. INBI-SU Mariana/ Ouro Preto.

Assim, nas casas residenciais ainda preservadas nos seus sistemas construtivos originais, a madeira é utilizada essencialmente da seguinte maneira: sobre um baldrame em pedra argamassada ou seca, normalmente acima do nível do solo¹⁰, é apoiada uma estrutura autônoma de madeira, como uma gaiola, formada por uma viga baldrame que faz o travamento inferior dos esteios embutidos na base, e na parte superior a amarração do quadro é feita pelos frechais, que também compõem a estrutura do telhado (Figuras 3-6, 3-7 e 3-10). No caso dos sobrados, uma peça intermediária é disposta na horizontal, a madre, com a função de aliviar as tensões dos esteios e também para apoiar os barrotes que sustentam o piso do segundo pavimento e o forro do primeiro. Essas peças principais possuem secção que podem variar de 15 a 30 cm, dependendo dos esforços aos quais são solicitadas.



Figura 3-6: Esquema da estrutura em madeira, em gaiola. Fonte: VASCONCELLOS, 1979, p.38.



Figura 3-7: Estrutura em gaiola de madeira da Casa Bernardo Guimarães, FAOP. Fonte: FAOP, 2008, p.41.

Para vedar os planos é então utilizado o pau a pique, onde o suporte é uma trama de paus, sendo os de maiores diâmetros (aproximadamente entre 10 e 15cm) dispostos na vertical e encaixados ou pregados na viga baldrame e no frechal ou na madre. As ripas ou varas de taquara são amarradas com fibra natural (cipó e embira) ou couro perpendicularmente às peças da vertical, de um lado e de outro, no mesmo nível ou alternadas. Essa trama é preenchida com o barro, reforçado com fibras ou não, ficando a parede ao final com espessura entre 15 e 25cm mais ou menos (Figura 3-8 a 3-10).

¹⁰ A base adaptava-se à morfologia do terreno, se em aclave, declive ou plano.



Figura 3-10: Trecho de parede com sistema construtivo em pau a pique à mostra. Foto: Ney Nolasco, 2008.

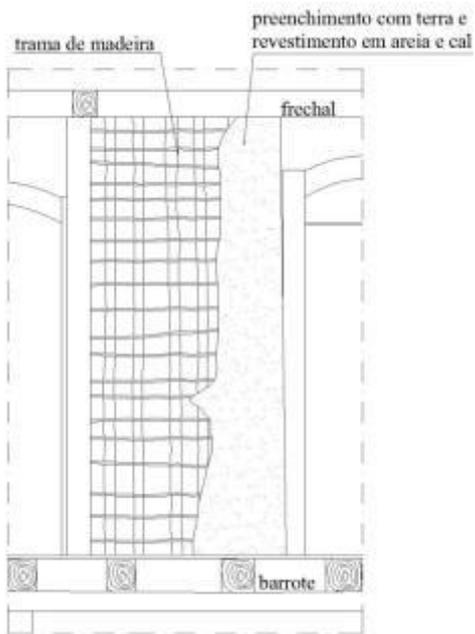


Figura 3-8: Representação da parede de vedação em pau a pique.



Figura 3-9: Largo do Rosario, Ouro Preto. Casario com estruturas em gaiolas de madeira e vedações em pau a pique. Fonte: arquivo pessoal.

Em 1956, Vasconcellos (2011)¹¹ chegou à seguinte conclusão sobre a preferência pela utilização da estrutura autônoma de madeira, com vedação em pau a pique nas residências em Vila Rica:

[...] As ruas, ao longo das encostas, deixam, de um lado, lotes de fortes aclives e, de outro, de consideráveis declives. Essa topografia, assim difícil, explica as preferências e desapareços por diversos sistemas construtivos. Desistindo de corrigir os terrenos, alçam-se as casas sobre eles, por intermédio de esteios ou pilares e, para facilitar essas elevações, preferem-se as estruturas autônomas, de madeira ou, pelo menos, mistas em virtude de as construções de estruturas (paredes) maciças, que distribuem uniformemente as cargas ao chão, em fundações mais ou menos contíguas, exigirem, de preferência, terrenos planos. Atendendo a estas injunções, seria natural que as edificações se fizessem de madeira e barro, não utilizados somente quando sua obtenção se torna difícil e a disponibilidade de pedra supre os inconvenientes de seu emprego (p. 66).

É necessário destacar que mesmo que o uso da madeira seja dominante em Ouro Preto, as particularidades ambientais da cidade fazem com que esse material, com a qualidade requerida, não fosse tão facilmente acessível. O relevo formado predominantemente por encostas íngremes constituídas por filitos, xistos, quartzitos e formações ferríferas, com ocorrência de coberturas superficiais de crostas lateríticas (canga) (SOBREIRA, 2001), não favorece o desenvolvimento de árvores de porte suficiente para a utilização em estruturas que solicitam maiores esforços. A madeira considerada de melhor qualidade, existente no período colonial, ou era insuficiente ou estava a uma distância do núcleo urbano, em que os meios de transporte disponíveis dificultavam o deslocamento das toras, como cita Vasconcellos (2011):

[...] as montanhas [...] apresentam-se em escarpas, nuas e de aspecto bizarro, ao contrário das formadas pelo granito e ganisse, que são de inclinação suave, abauladas ou cobertas de vegetação, e que só se encontram à distância da vila, pouco contribuindo as rochas de que são formadas para as suas edificações e afastando destas as matas fornecedoras de madeiras que careciam (p.109-110).

E ainda:

Salvo poucas espécies, como a canela preta, a braúna, a candeia etc., assim mesmo não muito frequentes, os matos acessíveis deveriam ser de pequeno porte, formados de madeiras menos valiosas. Este fator importa à arquitetura para justificar os sistemas construtivos adotados nas edificações do lugar. Dado o aqodamento que presidiu à fatura das primeiras construções, natural seria que fossem aproveitados os materiais disponíveis no próprio local da obra, de preferência aos que exigissem transporte, quase sempre difícil da época (p.111).

¹¹ Sylvio de Vasconcellos (1916-1979) foi arquiteto do IPHAN, pesquisador e professor catedrático da Escola de Arquitetura da UFMG, e dedicou grande parte da sua vida profissional à investigação sobre o urbanismo e a arquitetura brasileira, desde o período colonial ao modernismo, tendo produzido vários artigos, livros e dissertação que até hoje são referências indispensáveis principalmente nos estudos referentes à formação da cidade de Vila Rica, aos seus costumes, tradições, à arte e às tipologias, sistemas construtivos, materiais e mobiliários das casas de residência.(PBH, 2006).

Talvez seja por essa mesma razão que as primeiras construções nos morros foram feitas com a canga, pela maior facilidade de extração em blocos soltos. Todavia, a dificuldade de obtenção das melhores espécies não foi um impedimento para o largo emprego da madeira e Vasconcellos (2011) justifica a persistência na adoção do material:

É obvio que a madeira foi e é largamente empregada, mesmo naquelas construções já definitivas e não apenas nos ranchos. Deve-se, porém, levar em conta que no sistema construtivo de estrutura independente não se torna necessária a utilização intensiva e exclusiva de madeiras de muito boa qualidade, reduzindo-se sua aplicação a alguns esteios e madres, suportando relativamente pouco peso. As vedações aproveitam-se de paus roliços e varas de qualquer espécie. Convém frisar ainda que a maioria destas estruturas em Vila Rica firma-se sobre alicerces de alvenaria de pedra, não mergulhando seus apoios - os esteios - no solo, em virtude, talvez, de não resistirem bem a umidade do terreno (pag. 111 - 112).

Quando a aplicação de uma madeira de melhor resistência era indispensável, elas vinham de grandes distâncias, com alto custo e despesa no seu transporte. Como exemplo, a citação de Vasconcellos (2011) sobre a solicitação da Irmandade do Santíssimo Sacramento ao Senado da Câmara, de auxílio para a reconstrução da Matriz de Nossa Senhora do Pilar, além de “vários outros documentos da época, relativos à proteção, de certo modo exagerada, das matas existentes, levam a idêntica conclusão” (p.110).

Além do esqueleto das casas civis e das vedações dos lados e divisórias, a madeira é empregada nos telhados, revestimentos e nos fechamentos dos vãos, de forma similar, também nas construções religiosas e institucionais. São em madeira as escadas que ligam os pavimentos ou nos acessos para a torre de algumas igrejas, assim como os pisos, principalmente a partir dos segundos pavimentos, e os barrotes que sustentam as tábuas (Figuras 3-11 e 3-12). Nas edificações pós-período colonial ou naquelas adaptadas ao novo gosto e tecnologia vigentes, a madeira era colocada nos pisos em forma tacos e parquets. Com relação às espécies utilizadas, Vasconcellos descreve que:

As madeiras empregadas de início são sempre de muito boa qualidade, como jacarandá, canela parda ou preta, jatobá e outras, até que, no século XIX são os tabuados reduzidos em sua largura (0,10m e 0,15m), passando a ser conhecidos como frisos, quase sempre em macho e fêmea, com o emprego de pinho de riga, peroba do campo ou ipê, podendo ser encontradas, também, madeiras mais fracas, como jequitibá rosa e o pinho nacional (p.75).

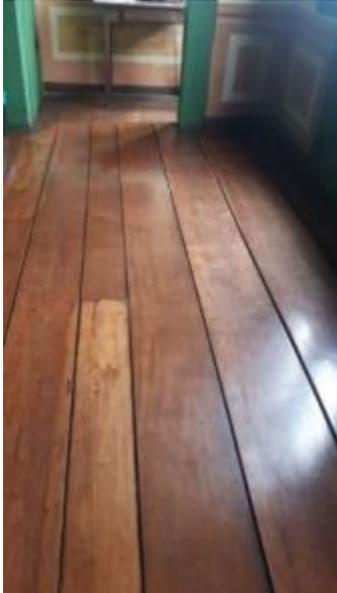


Figura 3-12: Tabuado em madeira da Casa Bernardo Guimarães, Foto: Ana Ceci Mota, 2020.



Figura 3-11: Barrotes de sustentação do piso do segundo pavimento do edifício da FAOP, no Bairro Rosário, OP. Fonte: arquivo pessoal.

Tanto nas edificações mais opulentas quanto nas simples, os “forros bem compostos ornaram também as peças nobres, alteados ou planos, apainelados por cordões ou molduras” que fazem o arremate entre a parede e o teto, ou de forma mais sofisticada nas igrejas, “em octógonos, mas concêntricos e estabelecidos em planos diferentes” (VASCONCELLOS, 2011, p.154). Semelhante aos pisos, a madeira predomina na confecção desses forros, que normalmente recebem pintura a óleo, artística ou lisa. Mesmo nos forros em estuque, a madeira ou a esteira de bambu está no suporte da argamassa composta por pó de pedra, areia fina e cal. Já no interior das casas, em muitos casos, a preferência é dada às esteiras de varas de taquara, cuidadosamente trançadas e configurando mosaicos (Figura 3-13). Fazendo uma comparação entre as peças adotadas, “as tábuas de forro distinguem-se das de piso pela qualidade, sendo de madeira menos rígida, mais macia ao trabalho, como o cedro, o vinhático e outras por serem de menor largura, variando em torno de 0,30m e de menor espessura (0,015 e 0,02m)” (VASCONCELLOS, 1979, p.95).



Figura 3-13: (a) forro em tabuado de madeira, tipo saia e camisa. (b) forro artesoado em madeira. (c) forro em esteira de taquara de bambu. Fonte: arquivo pessoal.

Como já mencionado acima, praticamente todo o conjunto de telhados da área urbana tombada, e até mesmo no entorno imediato, as estruturas das coberturas são em madeira e o manto em telhas cerâmicas tipo capa-canal (Figura 3-14). Com volumetria comumente simples, de duas a quatro águas, as tesouras variam entre as simples, com asnas (tesoura de Palladio), asna francesa, em linha alta (caibro armado), com lanternim ou água frutada. Para diminuir a sobrecarga da cobertura na estrutura do telhado, por vezes é utilizada uma divisória em madeira para vedar a empena. Pontualmente, algumas estruturas foram substituídas por peças metálicas, em casos mais recentes, como o da reconstrução do Hotel Pilão em 2006, ou o aço foi acrescentado à estrutura de madeira, com o objetivo de contribuir na melhor distribuição de esforços, dependendo das condições de conservação dos elementos existentes, como aconteceu no Santuário de Nossa Senhora da Conceição, que será abordado no item seguinte.



Figura 3-14: Estrutura do telhado em madeira da Casa Bernardo Guimarães. Fonte: FAOP, 2008, p.32 e 33.

Os vãos das portas e janelas são fechados com folhas simples de tábuas de madeira, e emoldurados com peças de maior seção, aproximadamente 15 ou 20cm. E, nas fachadas das construções mais importantes, “folhas mais ricas são engradadas com seus painéis preenchidos por almofadas salientes pelo lado de fora, porém, comumente, rebaixadas por dentro” (VASCONCELLOS, 2011, p.157). A partir da segunda metade do século XVIII, são acrescentados nas janelas caixilhos de vidro com sistemas de abertura tipo guilhotina ou, nas portas-janelas com sacadas, e duas folhas de abrir (Figuras 3-15 a 3-17). As varandas muitas vezes também são fechadas com caixilhos de madeira e vidro, porém sem o pano de folhas cegas (VASCONCELLOS, 2011).

Sobre o arremate dos beirais, Rodrigues (1975) descreve que “o beiral de suas casas pode ter tido como peculiar: formado por uma cornija volumosa de madeira, ou melhor, em tábuas aparelhadas, com balanço e altura que vão de 75cm a 1m” (p.313), chamado também de cimalha (Figura 3-15). Em outros casos, os mais comuns, o acabamento é feito de forma mais modesta, com segmentos de caibros encaixados perpendicularmente aos frechais, com inclinação mais suave, chamados de cachorros (beiral encachorrado), e o guarda-pó (Figura 3-16). Outros detalhes às vezes são acrescentados com a função de ornar a fachada, como os lambrequins (Figura 3-17) e as mãos-francesas trabalhadas.



Figura 3-17: Portas e janelas em madeira e beiral em cimalha. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-16 Esquadria de janela em madeira e detalhe do beiral em cachorro e guarda-pó em madeira. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-15: Esquadrias de portas e janelas em madeira e beiral com lambrequim em madeira. Fonte: arquivo pessoal.

Por fim, não é somente nos elementos construtivos das edificações que a madeira está presente na cidade patrimônio mundial. A partir da segunda metade do século XVIII, as casas passam a comportar uma infinidade de móveis, quase todos em madeira, e muitos ainda podem ser encontrados nos interiores:

Só na segunda metade do século XVIII multiplicar-se-iam os móveis como atestam, por exemplo os inventários dos bens pertencentes aos inconfidentes [...]. Cabides de cano ou face, cobertos por larga tábua de onde pendem cortinas de pano, funcionam como armários, e caixas e arcas, guarnecidas ou almofadadas suprem a falta das cômodas e guarda-roupas que, algumas vezes, também aparecem. Meias cômodas, “papeleiras” e “bufetes” completam o mobiliário doméstico.

Nichos com prateleiras, embutidos nas paredes, guardam objetos menores, mais danificáveis, e os santos de devoção, enfeitados com jarros de flores. Oratórios assentam em mesas, penduram-se ou também se embutem nas paredes, com suas portas almofadadas como na Fazenda do Gambá. Armários, raros para as roupas, reservam-se para a louçaria, as baixelas e os comestíveis.

[...]

Muitas das camas que, quando melhores, se chamam “leitos” e quando pobres “catres”, envolvem-se por cortinados pendentes de docéis que se armam sobre os altos postes das cabeceiras e dos pés, isolando o seu ocupante dos ares maléficos que, por acaso, vençam a já exagerada confinção das alcovas, dada a precária vedação dos vãos ou a ausência dos forros.” (VASCONCELLOS, 2011, p.167-168).

Já nos monumentos, em especial nas igrejas e capelas mais elaboradas, além do mobiliário, a madeira é utilizada com exuberância nos elementos artísticos e integrados, que revestem paredes e envolvem os espaços considerados mais sagrados destas construções. As talhas dos altares-mores, retábulos, painéis, púlpitos, cimalkas, guarda-corpos e revestimentos de paredes e de estruturas são quase sempre minuciosamente ornamentadas, pintadas ou cobertas com folhas de ouro. A autoria de muitos desses trabalhos é atribuída a nomes de artistas emblemáticos do período colonial, como por exemplo Manuel da Costa Athaíde e Antônio Francisco Lisboa, o Aleijadinho, sendo isto um dos pretextos ao valor inapreciável que hoje conferimos a estes bens culturais.

3.1.1 A madeira no Santuário de N. Sr.^a da Conceição: caso de estudo

No Santuário de Nossa Senhora da Conceição (Figura 3-18), como nos demais monumentos de Ouro Preto, o uso da madeira nos sistemas construtivos e acabamentos é volumoso, quase que na mesma proporção se comparado às construções civis do conjunto urbano da cidade¹², como mencionado anteriormente. Na obra de conservação e restauro, finalizada em 2016, parte das madeiras existentes foram descartadas, por não apresentarem condições de utilização para a função destinada. Com a disponibilidade desse material para servir de amostra, foi aproveitada a oportunidade de a obra tornar-se o caso de estudo desta dissertação, em que foi utilizada não só a madeira descartada da estrutura do telhado, como também foram considerados os tratamentos contra os insetos xilófagos, para os ensaios de comportamento do material a um caso de incêndio.



Figura 3-18: Vista fachada frontal e direita do Santuário de Nossa Senhora da Conceição. Fonte: arquivo pessoal.

O Monumento está implantado em meia encosta, encaixada em um contraforte do Morro de Santa Quitéria (onde hoje está localizada a Praça Tiradentes), no conjunto urbano de ocupação densa e vias estreitas, entre as ruas Bernardo Vasconcelos e da Conceição, no bairro

¹² A autora atuou como responsável técnica pelo Projeto Arquitetônico de Restauração da Matriz de Nossa Senhora da Conceição, em coparticipação com o arquiteto e urbanista Alexandre Ferreira Mascarenhas, pela empresa Travessa Conservação e Restauro Ltda., de 2008 a 2012.

Antônio Dias. O adro escalonado foi construído em frente ao Santuário, entre os anos de 1860 e 1836¹³, com o objetivo de criar um espaço amplo e privilegiado para reunir os fiéis e dar destaque à edificação, considerada de maior importância desse lado da cidade.

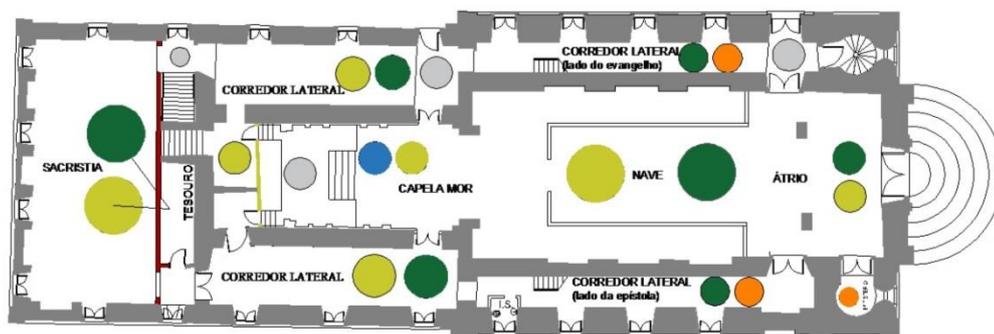
Segundo consta no Arquivo Noronha Santos, disponível no site do IPHAN¹⁴, a construção da Matriz foi iniciada em 1727, após o Arraial de Antônio Dias ser integrado à recém-criada cidade de Vila Rica em 1711, tendo durado a parte arquitetônica até aproximadamente 1756. O responsável pelo projeto foi o arquiteto, carpinteiro e mestre de obras Manuel Francisco Lisboa, o pai do Aleijadinho. Em 1939, a então Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias foi reconhecida como patrimônio nacional e inscrita no Livro do Tombo de Belas Artes, com número 247, e todo o acervo foi incluído no tombamento em agosto de 1985.

Os sistemas construtivos presentes da edificação são basicamente compostos de pedra, terra crua e madeira. A fundação, o baldrame, as paredes externas e algumas internas são autoportantes, em alvenaria de pedra argamassada, com espessura que varia entre 50 e 120cm, aproximadamente. As divisórias internas, que delimitam internamente a sacristia e o consistório, são constituídas em pau a pique, com largura média de 25cm (Figura 3-19). As paredes em pedra, ou estão revestidas com argamassa de areia e cal e pintadas com tinta mineral, ou servem de apoio aos elementos artísticos integrados; essas últimas não são rebocadas.

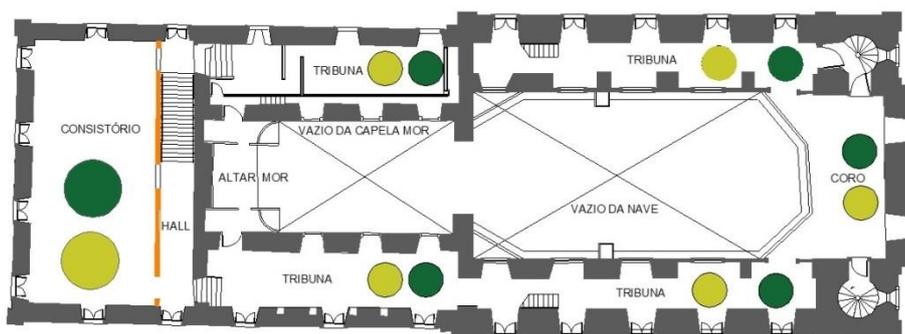
A presença da madeira na arquitetura do Santuário pode ser atestada na trama de suporte do pau a pique, na estrutura do telhado, nas esquadrias de portas e janelas, na extensão de quase todo tabuado do piso e forro (Figuras 3-20 a 3-25) do subsolo, pavimento térreo e 2º pavimento, como também nos barrotes que sustentam esses elementos (3-20), com exceção do forro da capela-mor que é em estuque (2-21), onde a madeira aparece como suporte. A estrutura do coro, executada posteriormente à construção original, também é em madeira, assim como os demais elementos que a constituem.

¹³ Dado do arquivo Noronha Santos.

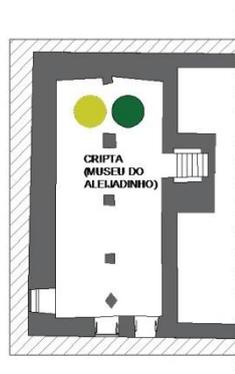
¹⁴ http://portal.iphan.gov.br/ans.net/tema_consulta.asp?Linha=tc_belas.gif&Cod=1381.



PAVIMENTO TÉRREO - NÍVEL: 0,00m
SEM ESCALA



SEGUNDO PAVIMENTO - NÍVEIS: 5,08 / 6,50m
SEM ESCALA



PLANTA SUBSOLO - NÍVEL: -2,35m
SEM ESCALA

LEGENDA

- PISO EM TABUADO DE MADEIRA
- PISO EM PEDRA
- PISO EM CERÂMICA
- FORRO EM ESTUQUE
- FORRO EM MADEIRA
- ALVENARIA DE PEDRA
- PAREDE EM PAU-A-PIQUE
- ALVENARIA DE TIJOLO

Figura 3-19: Plantas de indicação dos sistemas construtivos. Plantas elaboradas a partir do levantamento do Projeto de Conservação e Restauro da Matriz de Nossa Senhora da Conceição. Fonte: TRAVESSA, 2009.

Além da arquitetura, a madeira aparece em quase todos os elementos artísticos integrados, seja como o próprio material constituinte, seja como suporte da decoração. No interior da

nave, os oito conjuntos de retábulos são todos executados em madeira (Figura 3-22 e 3-25)) e, da mesma forma, toda a talha e estrutura do altar-mor. Grande parte dessa ornamentação é recoberta por pintura policromática e douramentos em folhas de ouro.



Figura 3-22: Piso em tabuado de madeira da tribuna. Fonte: arquivo



Figura 3-21: Forro em estuque da capela-mor. Fonte: arquivo pessoal.

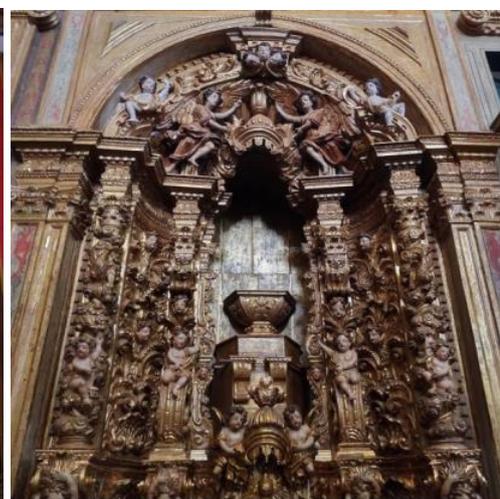


Figura 3-20: Detalhe de retábulo lateral, esculpido em madeira. Foto: Débora Henriques, 2020.



Figura 3-25: Forro artesoado com pintura artística da sacristia. Foto: Debora Henriques, 2020.

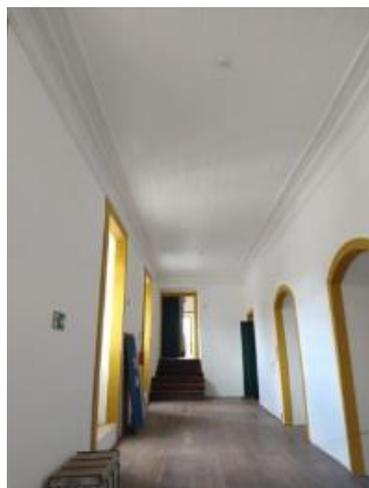


Figura 3-23: Corredor lateral, piso e forro em madeira. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-24: Nave e seus elementos integrados em madeira. Foto: Debora Henriques, 2020.

Tanto o relatório de 1983 da obra realizada pelo IEPHA, quanto as informações no site do IPHAN, ponderam que não é possível compor uma cronologia precisa das obras já realizadas na Matriz, particularmente aquelas anteriores à década de 1980, em razão de ter-se perdido grande parte da documentação do arquivo da paróquia, incluindo os livros da Irmandade do Santíssimo Sacramento, entidade que administra as obras. Sabe-se que, antes mesmo da

edificação estar concluída, a construção teve que passar por reparos e, “em 1745, foi reconstruída em pedra e cal uma das paredes que ameaçava ruína, sabendo-se que a partir desta data até o ano de 1746, foram despendidos recursos com as campas, janelas e telhados da igreja.” (IPHAN)¹⁵. De maneira bastante sucinta, outras intervenções também são citadas no mesmo site:

Em 1794, a edificação apresentava estado físico precário, necessitando de obras de reparo no frontispício, torre e escadas, conforme indica requerimento do vigário da Freguesia à D. Maria I, solicitando verbas para as obras necessárias. Desde 1852, os relatórios dos Presidentes da Província referem-se a constantes verbas concedidas para obra de reparo na Matriz de Nossa Senhora da Conceição, tendo sido realizados até 1854 serviços na torre e acampamento, reparos no forro e assoalho do consistório, rebocamento interno das torres, dentre outros serviços.¹⁶

Em 1854, além dos serviços citados, a igreja sofreu alteração na fachada e cobrimento branco da pintura parietal original, para se adequar ao neoclassicismo vigente na época (IEPHA, 1982). Em 1949, o Departamento do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – DPHAN (atual IPHAN), iniciou a remoção do recobrimento branco, porém não foi finalizada naquele momento, tendo sido retomada somente na atual restauração dos elementos artísticos integrados, iniciada em fevereiro de 2019.

A obra realizada pelo IEPHA, entre 1980 a 1982, envolveu os elementos estruturais, arquitetônicos e ornamentais, com recursos cedidos pelos governos federal e estadual, e teve como critério de intervenção para os elementos originais deteriorados, a serem recuperados ou substituídos, o máximo respeito às formas antigas e materiais e tecnologias de conservação que implicassem as menores alterações possíveis (IEPHA, 1982).

Segundo o Relatório de Restauração do IEPHA (1982), o diagnóstico do projeto elaborado em 1979 indicava que a edificação não apresentava problemas graves de estabilidade, e 10% das peças da estrutura do telhado necessitavam de substituição por apresentarem-se deterioradas por insetos xilófagos e umidade. Outros elementos em madeira, como pisos e forros, também apresentavam danos por umidade e agentes biológicos, além de deformações por dilatação e alteração das estruturas dos materiais.

¹⁵ Disponível em, http://portal.iphan.gov.br/ans.net/tema_consulta.asp?Linha=tc_belas.gif&Cod=1381.

¹⁶ Disponível em, http://portal.iphan.gov.br/ans.net/tema_consulta.asp?Linha=tc_belas.gif&Cod=1381.

Durante essa obra, foi constatado que não apenas uma pequena porcentagem do telhado estava em estado ruim de conservação, mas, sim, que toda a cobertura deveria ser recuperada. No entanto, o relatório do IEPHA (1982) descreve em seguida que “a recuperação da área danificada consistiu na substituição de peças do engradamento, telhas e rufos, amarração e emboçamento posterior de telhas, assim como imunização do seu madeiramento” (pág. 23), deixando a dúvida se foi todo o telhado substituído, ou se uma grande parte teve que sofrer alterações, e algumas peças permaneceram na sua posição original. Nos outros elementos em madeira, como pisos e forros, foram substituídas apenas as peças deterioradas, e todo o madeiramento passou por imunização preventiva (IEPHA, 1982).

Em 2007, a Matriz passou por uma intervenção voltada exclusivamente para modernização museológica e museográfica do Museu do Aleijadinho¹⁷, tendo ficado a recuperação do restante da edificação para outra ocasião.

A última obra de conservação e restauro arquitetônico do Santuário de Nossa Senhora da Conceição aconteceu entre setembro de 2014 e março de 2016, segundo o Diário de Obra (Construtora Ambiental, 2016), e o projeto foi finalizado em 2012. Essa intervenção abrangeu toda a arquitetura da edificação, incluindo a cobertura, elementos em cantaria e de revestimentos, como as argamassas, pintura, esquadrias, pisos e forros. A renovação das instalações hidráulicas, elétricas e de luminotécnica e de sistemas de prevenção e combate a incêndio também foi executada, incluindo um reservatório de água, exclusivo para a SPCI, enterrado no adro da igreja.

Durante a elaboração do diagnóstico iniciado em 2008, o telhado encontrava-se em estado ruim de conservação e, de acordo com o Relatório Técnico do projeto de estrutura (SALUS, 2009), com comprometimento da estabilidade estrutural da edificação e risco de danos à integridade física de fiéis e visitantes. Como proposta, foi indicada a substituição de aproximadamente 20% das peças das tesouras, 100% das ripas e das cambotas de sustentação do forro da capela-mor e, também, a execução de alguns reforços estruturais em concreto, como o pórtico para sustentação extra do arco cruzeiro.

Passados cinco anos da elaboração do projeto estrutural, a obra foi iniciada, e na ocasião foi verificado que os danos da estrutura do telhado haviam se tornado mais graves, se

¹⁷ <http://paroquiaconceicaoop.com.br/museu/>, acessado em 02 de julho de 2019.

comparados ao descritos no projeto inicial. Ao invés da substituição de peças danificadas das tesouras da nave por outras similares, como proposto anteriormente, foram inseridas treliças metálicas paralelas às estruturas existentes, para cumprir a função de suporte da cobertura, tendo ficado as primeiras como testemunho histórico, e possibilitando uma reversão futura da intervenção (Figuras 3-26 e 3-27). A estrutura metálica também foi utilizada como reforço das cambotas de sustentação do forro da capela-mor (Construtora Ambiental, 2016).



Figura 3-26: Estrutura em madeira do forro da nave e estrutura metálica de reforço. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-27: Estrutura em madeira do forro da capela-mor e estrutura metálica de reforço da estrutura original. Fonte: arquivo pessoal.

No trecho da cobertura da capela-mor e sacristia, as tesouras existentes permaneceram, tendo sido substituídos trechos e algumas peças inteiras em estado ruim de conservação. Ao todo, foram substituídas 100% das ripas e 90% dos caibros e terças por outras peças em madeira, com características análogas (Construtora Ambiental, 2016).

As amostras utilizadas neste trabalho são peças do telhado, ou trecho de peça, que foram descartadas durante essa última obra, e cedidas para a pesquisa pela Paróquia de Nossa Senhora da Conceição e pelo IPHAN. Diante da ausência de relatórios detalhados das obras executadas no Santuário ao longo dos anos, tornou-se difícil a datação da utilização dessa madeira na edificação, mesmo que aproximada. O que pôde ser concluído, durante o preparo dos corpos de prova para os ensaios, é que foram encontrados cravos nas peças utilizadas neste trabalho, indicando tratar-se de elementos que faziam parte da edificação há pelo menos 120 anos (Figura 3-28). A utilização desse tipo de prego é anterior à introdução do processo

de laminação na indústria siderúrgica em escala industrial, que substituiu o emprego de martelos na fabricação desses fixadores a partir de 1840 (KUHL, 1998).

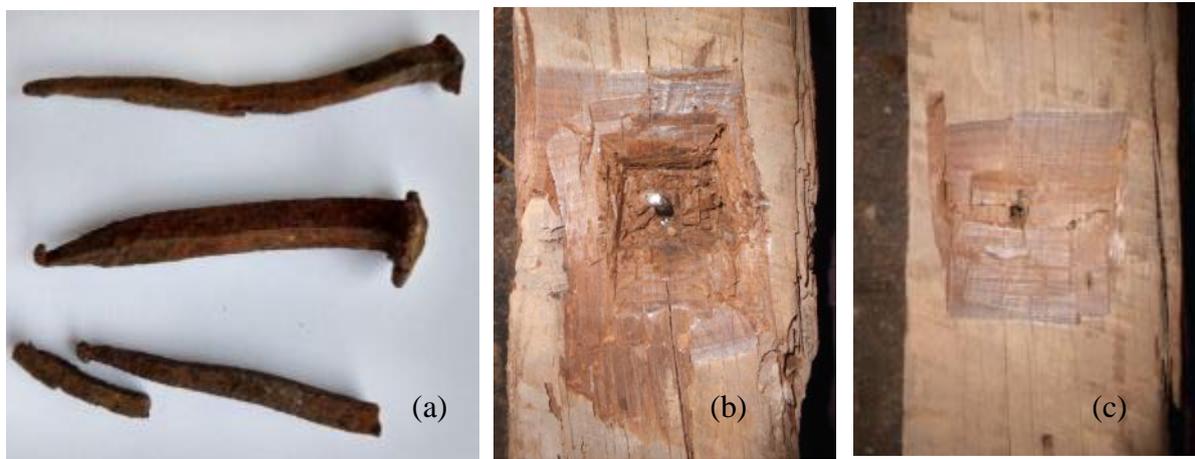


Figura 3-28: (a) cravos retirados das terças; (b) e (c) localização de um dos cravos na peça. Fonte: arquivo pessoal.

O tratamento de imunização utilizado nas peças antigas que permaneceram nessa última intervenção, assim como nas novas que foram inseridas, será abordado no item sobre tratamento e restauro das madeiras.

3.1.2 Desafios da preservação do patrimônio e prevenção contra incêndios

Do início a meados do século XX, com a criação do atual IPHAN em 1938, o conjunto urbano da formação inicial da cidade de Ouro Preto foi consagrado como símbolo da identidade nacional pelos intelectuais modernistas e tombado como patrimônio histórico e artístico com a sua inscrição no livro de Belas Artes. Em 1980, essa relevância cultural da cidade foi ratificada com o seu reconhecimento como “Patrimônio Cultural Mundial”¹⁸ pela UNESCO.

¹⁸ Patrimônio Cultural da Humanidade é aquele definido na Convenção Sobre a Proteção do Patrimônio Cultural e Natural, aprovada na Conferência Geral da UNESCO, em 16 de novembro de 1972, e inscrito na Lista do Patrimônio Mundial com base no seu “excepcional e universal valor histórico, estético, arqueológico, científico, etnológico ou antropológico”, de acordo com o site da UNESCO, disponível em: <http://www.unesco.org/new/pt/brasil/culture/world-heritage/cultural-heritage/>, acessado em 20/09/2019.

Passados mais de oitenta anos do tombamento nacional, se ainda hoje conferimos valor a esses bens e se entendemos¹⁹ que a preservação deles passa pela permanência da materialidade, então os sistemas e materiais construtivos e os elementos decorativos destas construções têm que ser preservados ao máximo em sua originalidade. Seja pela matéria que é suporte da obra de arte, seja pela manutenção dos modos de fazer, a perda de qualquer parte pode ser considerada irreversível. Portanto, a partir do entendimento “da importância e do significado que o patrimônio assume para quem efetivamente dele usufrui” (SIMÃO e CAVALAZZI, 2017, p.295), os profissionais que atuam de alguma maneira na preservação, conservação e no restauro desses bens têm como responsabilidade pesquisar, projetar, intervir e gerir a cidade com o máximo empenho, para alcançar o objetivo de preservar a originalidade dos bens tombados. E, quando se trata das ações de prevenção e combate a incêndios, esse pode ser considerado o enorme desafio, pois praticamente não há risco de incêndio aceitável nesse caso.

O incêndio, segundo definição proposta por Claret-Gouveia (2017), é o resultado da interação entre o fogo, a edificação e seus componentes e a reação dos seus usuários (feu) no início da ignição, e se desenvolve por meio de “múltiplos fenômenos químicos, físicos, biológicos e psíquicos, mutuamente influenciáveis e concorrentes.” (p.49). A seguir, uma descrição sucinta de como podem ser as fases de desenvolvimento do incêndio.

- (i) Primeira fase – início de ignição: devido ao aumento da temperatura e de gases no interior de um compartimento²⁰, provocados por um elemento que pega fogo (que inflama), por radiação, convecção e/ou por condução, outros objetos no entorno também entram em ignição, formando assim o início de incêndio (temperaturas variam entre 20 e 70°C).
- (ii) Segunda fase: no início do incêndio, caso não ocorra a contenção das chamas e a exaustão da fumaça produzida na queima dos elementos na fase anterior, forma-se um colchão de gases combustíveis provenientes da combustão dos

¹⁹ Levando em considerando as atuais discussões e preceitos acerca das teorias da conservação e do restauro, o “nós” aqui é considerado como cidadãos que usufruem de alguma forma da cidade patrimônio e devem ter a autoridade na definição da importância da cidade como referência da sua cultura e memória, afinal, “a patrimonialidade não provem dos objetos, mas dos sujeitos” (SIMÃO e CAVALAZZI, 2017, p.294).

²⁰ Compartimento é definido como uma área delimitada por elementos construtivos na vertical e na horizontal (paredes e teto), resistentes ao fogo, com o objetivo de inibir a propagação do fogo, do calor e da fumaça, podendo ser composto de um ou mais cômodos.

materiais e do ar ambiente, com temperaturas que podem chegar aos 300°C. Nesse momento, com a entrada de mais oxigênio no ambiente, através de vidraças quebradas pela alta temperatura, por exemplo, ocorre a combustão súbita chamada de *flashover*, e o incêndio se generaliza.

- (iii) Terceira fase: o incêndio está desenvolvido, e as temperaturas crescem até o consumo aproximado de 80% da carga combustível, podendo chegar aos 1.100°C. Se os elementos construtivos não possuírem resistência suficiente ao fogo, pode ocorrer a propagação do incêndio aos compartimentos adjacentes.
- (iv) Quarta fase: processo de extinção do incêndio, com o declínio das temperaturas, que pode durar de 2h a 3h. Esse momento requer estabilidade de ligação das estruturas da edificação que, com o aumento inicial da temperatura, sofreram expansão e agora sofrem retração.

O risco de incêndio em construções pode ser considerado como a probabilidade de surgimento de um início de incêndio a partir da interação entre os objetos combustíveis contidos na edificação e os materiais combustíveis integrados aos seus sistemas construtivos (SEITO, 2008). Como um evento considerado potencial, inerente ao edifício, não é possível zerar a probabilidade do início de uma ignição, muito menos de propor soluções de segurança que eliminem completamente esse risco. Segundo Claret-Gouveia (2017), uma edificação é considerada segura, então, “para os cenários em que a medida do risco de incêndio é aceitável” (p.71), ou seja, o risco do início de uma ignição tornar-se um incêndio generalizado. Quem define os critérios mínimos para a obtenção de risco máximo aceitável é a sociedade (ou os órgãos regulamentadores), e acréscimos desses critérios podem ser pensados pelos usuários da edificação, ou do conjunto de edifícios, “de modo que o risco existente seja menor que o máximo aceitável” (p.71).

E aí está o primeiro desafio na prevenção e combate a incêndio de bens culturais em uma cidade patrimoniada como Ouro Preto: o risco máximo aceitável deve refletir a importância do acervo para a comunidade e, “progressivamente, atingir o limite inferior permitido pelo estado atual da técnica” (CLARET-GOUVEIA, 2006, p.26). Em uma edificação civil simplificada inserida no conjunto tombado, por exemplo, mesmo que a matéria seja perdida

em um caso de incêndio, pode ainda existir a possibilidade da reconstrução, levando-se em consideração que os modos de fazer ainda se preservam²¹. No entanto, no caso de grande parte dos monumentos - das igrejas, por exemplo - o risco máximo aceitável poder ser bem menor. Além da edificação em si e seus sistemas construtivos, os elementos artísticos integrados e móveis que compõem o monumento são em muitos casos obras de arte resultantes de um momento único do autor, que não pode ser restituído; a perda seria definitiva e não haveria o que restaurar. Antes mesmo do incêndio se tornar generalizado, logo no seu início com temperaturas relativamente baixas, os danos ocasionados pelo fogo ou mesmo pela fumaça, nesses elementos, já podem ser irreversíveis.

A determinação dos cenários prováveis de incêndio é a tarefa essencial na elaboração dos Projetos de Segurança Contra Incêndio e Pânico – PSCIP²². Para tanto, é adotado o Método de Análise de Risco Global de Incêndio, que permite estimar o risco global de incêndio (R) em uma edificação isolada ou em um conjunto de edificações, como em um núcleo urbano tombado, e se deve levar em consideração, além dos parâmetros e fatores de risco, a qual a edificação está exposta (E), a probabilidade de ativação do incêndio (A), de acordo com a equação (CLARET-GOUVEIA, 2006):

$$R = E \cdot A \tag{3.1}$$

O objetivo central do PSCIP é balancear as medidas probabilísticas que dificultam o incêndio (medidas de segurança = S) e as que favorecem o incêndio, no limite do risco máximo aceitável. A razão entre essas duas medidas fornece o coeficiente de segurança (γ), que deve ser maior que o mínimo coeficiente aceitável (γ_{\min}), e pode refletir uma situação que propicia o incêndio, quando $\gamma < 1$, ou indicar uma condição que favorece a segurança, quando $\gamma \geq 1$, sendo representada pela equação (CLARET-GOUVEIA, 2006):

$$\gamma = \frac{S}{R} \tag{3.2}$$

²¹ Apesar de hoje serem pouquíssimos os mestres que ainda detêm o conhecimento do fazer da construção vernácula brasileira.

²² Seja para o projeto elaborado a partir de uma legislação prescritiva, seja para o modelamento do incêndio em projeto baseado em desempenho - *performance based design*.

O coeficiente de segurança será alto, quanto menor for número de parâmetros e fatores de risco presentes na edificação e quanto maior for número de parâmetros e medidas de segurança. Esse é outro desafio no caso das cidades originárias do período colonial. As características construtivas vernaculares e a tipologia das edificações, individualmente e em conjunto, e as respectivas condições de conservação tendem a elevar a probabilidade de risco de incêndio. Por outro lado, as soluções de segurança possíveis que “atendam às condições mínimas aceitáveis para a proteção das edificações que compõem o patrimônio cultural protegido” (CBMMG, 2018), e que ao mesmo não causem descaracterizações ao bem ou demandem grandes investimentos financeiros, são bastante limitadas, o que tende a abaixar o valor do coeficiente de segurança.

A resistência dos sistemas construtivos ao fogo, em um tempo requerido (TRRF) que pode variar de 30 a 120 minutos, é um dos fatores que devem ser considerados para a análise global de risco. As normas NBR 05628-2001, NBR14432-2001 e NBR 10636-1989 definem critérios e método ensaio de resistência ao fogo de componentes estruturais, elementos construtivos e parede divisória sem função estrutural, em edificações, respectivamente: o sistema construtivo, sob efeito da ação do calor, deve ter resistência mecânica a deformações, estabilidade de forma e de posição, para manter-se íntegra, sem apresentar colapso; estanqueidade, para impedir a passagem chamas e gases para o outro lado da parede; isolamento térmico (baixa condutividade térmica), para resistir à transmissão de calor para os compartimentos adjacentes.

No caso das construções tradicionais, ainda preservadas em Ouro Preto, os dados sobre a resistência a incêndios dos sistemas construtivos originais são escassos. Não se sabe, por exemplo, qual a resposta do pau a pique às altas temperaturas. Existem dados sobre a resistência do sistema construtivo *wattle and daub* (Figura 3-29), utilizada no Reino Unido (CLARET-GOUVEIA, 2006), e sobre o tabique utilizado em Portugal (ARAÚJO, 2005), aos quais admite-se a semelhança com o pau a pique (Figura 3-30), porém várias características diferem desse sistema, como a espessura da parede e a forma e disposição das peças da estrutura de madeira.



Figura 3-29: Parede em *wattle-and-daub*. Fonte: <https://www.geefix.com/wattle-and-daub>. Acesso em 01 de dez. 2020.



Figura 3-30: Trecho de parede em pau a pique. Fonte: arquivo pessoal.

No que se refere à estabilidade de forma e posição, quando espera-se que os elementos estruturais não apresentem deformações excessivas, o sistema construtivo em gaiola de madeira, com fechamento em pau a pique, onde as peças muitas vezes são apenas encaixadas umas às outras, prevalecem as ligações de baixa rigidez (Figura 3-31) que, “mais que a degradação da resistência mecânica com a temperatura, é responsável pelos danos estruturais, uma vez que a simples expansão térmica pode levar à perda da estabilidade” (CLARET-GOUVEIA, 2006, p.38).



Figura 3-31: Encaixes comuns das peças estruturais em madeira, encontrados na arquitetura colonial na região de Ouro Preto. Fonte: arquivo pessoal.

Além da escassez de dados sobre as propriedades do comportamento dos diversos sistemas construtivos tradicionais ao calor, o estado de conservação das edificações também é considerado um grande desafio na prevenção e combate a incêndio. Com o tempo de utilização, o pau a pique perde a água interna, por tratar-se de terra crua, o que normalmente

pode ocasionar trincas e fissuras, facilitando a passagem de chamas e radiação de calor pelas frestas e atingindo a madeira da sustentação da parede, que muitas vezes já se encontra deteriorada (Figuras 3-32 e 3-33). Lembrando ainda que em Ouro Preto, segundo Vasconcellos (2011), as madeiras utilizadas em grande parte dos sistemas construtivos das residências não eram de melhor qualidade ou eram procedentes do aproveitamento de madeiras recuperáveis das substituições, durante as constantes reformas dos monumentos. Esses sistemas construtivos demandam ações de conservação contínuas, com o objetivo de prevenir ações de agentes causadores de patologias de natureza biológica, química e/ou física.



Figura 3-33: Casa em pau a pique, com parede em estado ruim de conservação, em Ouro Preto, MG. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-32: Casa em pau a pique, com parede em estado ruim de conservação, em Ouro Preto, MG. Fonte: arquivo pessoal.

A resposta estrutural da edificação ao incêndio está estritamente relacionada aos fenômenos dos modos de produção de calor do fogo e, por isto, é indispensável entendê-los, sendo um dos principais parâmetros na delimitação dos cenários de incêndio e na avaliação de risco global. Para isso, modela-se a produção de calor liberada pela combustão completa em função do tempo de cada objeto que integra a edificação e, então, identifica-se a grandeza da carga de incêndio individual e total do compartimento, ou seja, a soma das energias térmicas liberadas na combustão completa de todos os materiais combustíveis, contidos em um espaço, inclusive os revestimentos e sistemas construtivos (SEITO, 2008).

De acordo com Claret-Gouveia (2006), a quantidade de energia liberada sob forma de calor pela combustão completa de uma unidade de massa de um determinado material é denominada de poder calorífico. Os valores das taxas de desenvolvimento do incêndio (potência da combustão pelo tempo) e o poder calorífico de vários materiais são medidos em ensaios normatizados e disponibilizados na literatura, em manuais e em fichas técnicas de fabricantes. No entanto, a variedade de objetos e elementos construtivos das edificações pode

ser muito grande, e não há dados disponíveis de todos os materiais. O desafio em relação às tecnologias construtivas presentes no patrimônio cultural edificado é que normalmente são realizadas artesanalmente, com materiais muitas vezes no seu estado natural, e sem normatizações para a construção²³, assim como os objetos contidos na edificação e, por este motivo, os dados são ainda mais escassos se comparados aos materiais contemporâneos.

A investigação sobre a energia liberada na combustão de vários tipos de madeira é objetivo de diversos trabalhos já publicados e disponibilizados, mas ainda não abrange os milhares de espécies de árvores brasileiras existentes, incluindo as que eram comumente utilizadas na arquitetura colonial. Além do mais, durante as obras de conservação e restauro do patrimônio arquitetônico, são utilizadas as mais diversas substâncias e procedimentos de tratamento e proteção da madeira. Na sua grande maioria, não há estudos sobre os modos de produção de calor da interação entre esses produtos e a madeira, e se esse conjunto pode ser o fator de acréscimo à carga de incêndio dessas edificações, ou não. Como já exposto, o objetivo deste trabalho é contribuir para a superação de pelo menos uma mínima parcela desse desafio.

Para equilibrar a relação entre os fatores e parâmetros e risco citados, a identificação e a proposição de medidas e fatores de segurança são também indispensáveis para a análise do risco global de incêndio e na elaboração do PSCIP, quando deve-se determinar o conjunto de medidas ativas e passivas de segurança, capazes de reduzir o risco de incêndio ao máximo aceitável, e aumentar o coeficiente de segurança acima do mínimo admissível. A portaria 366 do IPHAN (2018) define diretrizes para projetos de prevenção e combate a incêndio e pânico, em bens edificados tombados, e determina que, para a elaboração do PPCIP (Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico, ou PSCIP), deve-se observar o mínimo de impacto no bem e, concomitantemente, seguindo a Instrução Técnica-IT nº35 (CBMMG, 2005), adequar-se às condições que assegurem a proteção contra incêndio e pânico o mais próximo possível das “exigências das normas técnicas atuais, visando proporcionar as condições mínimas aceitáveis de segurança aos usuários e ao patrimônio” (CBMMG, 2018, item 5.4, pag. 8). Mas não é simples atingir esse contrabalanceamento nas primeiras edificações da cidade de Ouro Preto.

²³ A primeira tecnologia de construção tradicional a ter norma publicada pela ABNT foi o tijolo de adobe, no ano de 2020: a ABNT NBR 16814:2020 - Adobe - Requisitos e métodos de ensaio, elaborada pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB - 002).

Além dos fatores de risco citados, que influenciam diretamente sobre as medidas de segurança passivas, a adoção de soluções sinalizadoras, extintivas e de infraestrutura devem ser pensadas com cuidado, porque praticamente todas interferem de alguma forma na edificação preservada, podendo várias delas causarem descaracterizações ou mesmo se tornarem agentes motivadores de degradações. Um exemplo são os chuveiros automáticos. A umidade é o principal agente indutor de danos na arquitetura tradicional, que pode afetar a inteireza tanto dos elementos artísticos e integrados, quanto os sistemas construtivos. As tecnologias em terra crua, por exemplo, são bastante suscetíveis à presença da água, podendo até mesmo se desfazerem, dependendo da pressão da água utilizada na extinção do fogo.

Assim como as relações dos materiais e sistemas construtivos das edificações com o risco de incêndio e a segurança contra o incêndio, a compartimentação das construções é um dos parâmetros de risco primordiais, a ser ponderado na análise global de risco de incêndio. Os compartimentos são as divisões internas, “cujas paredes, pisos e forros têm no mínimo a resistência requerida em norma, ou aquela suficiente para garantir os objetivos específicos de segurança contra incêndio” (CLARET-GOUVEIA, 2006, p.35). As dimensões do compartimento são importantíssimas na definição das medidas de segurança. Quanto maiores os volumes dos compartimentos, mais especiais deverão ser as medidas a serem adotadas (CLARET-GOUVEIA, 2006). A tipologia das plantas das edificações coloniais e a implantação dessas casas no conjunto urbano estão, ao mesmo tempo, entre as características singulares que motivaram o reconhecimento de Ouro Preto como patrimônio cultural e são um desafio enorme para a prevenção e o combate a incêndios.

Na organização espacial das plantas, em cômodos interligados e com a presença de alcovas²⁴, os acessos se dão apenas pela frente e fundos da edificação, já que as laterais estão dispostas de um lado e de outro com as casas vizinhas, formando um conjunto geminado de edificações, alinhadas à rua. Essa composição interna e a conformação urbana dificultam a circulação e o escape dos usuários em caso de um início de incêndio. A IT nº35 (CBMMG, 2005), estabelece, para essa situação, que as edificações que não apresentam distâncias mínimas de separação entre elas, como previsto na IT nº05 (CBMMG, 2005), serão consideradas como parte de um conjunto arquitetônico.

²⁴ Cômodo localizado no interior da residência, sem aberturas de janelas ou portas para o exterior, com acesso somente por outro cômodo (ALBERNAZ E LIMA, 2000). É comum serem vistas alcovas nas casas do conjunto urbano de Ouro Preto.

Ainda, e como já mencionado, várias paredes em pau a pique das divisórias internas e entre as edificações continuam preservadas e, em muitas situações, encontram-se em condições precárias de conservação, não apresentando qualidades mínimas exigidas de resistência a incêndios. As empenas das coberturas, ainda vedadas com o pau a pique ou em tabuado em madeira, são outro caminho provável para a passagem do fogo de uma casa à outra. Dessa forma, tanto os cômodos, quanto cada casa isoladamente, não podem ser classificados como um compartimento. O conjunto inteiro de edificações em uma rua, ou mesmo em um quarteirão, acaba por ser considerado como um grande volume compartimentado, na projeção das medidas de segurança no PSCIP. Um volume único e bastante complexo, por sinal, com diversidade e multiplicidade de usos e funções, e em constante transformação, onde a população atua no cotidiano da cidade de forma autônoma e, “à revelia de normativas e princípios, (re) constroem os seus espaços, (res) significando-os” (RIBEIRO, SIMÃO, 2016, p.188).

O espaço urbano (Figura 3-34 e 3-35), em que esses compartimentos de edificações se inserem, também impõe muitas restrições à atividade de combate ao incêndio, seja pela própria geminação das casas, que forma longas faces de quadras, ou devido à reduzida largura das ruas (em média 6m de largura) e becos, e pela acentuada declividade de várias vias, o que dificulta a circulação do Corpo de Bombeiros, e pela facilidade de o fogo passar de uma edificação para outra (CLARET-GOUVEIA, 2006).



Figura 3-34: Vista aérea de Ouro Preto, da região da Praça Tiradentes. É possível perceber o conjunto de edificações geminadas, formando um único compartimento, e vias estreitas. Fonte: Próxima Trip. Disponível em: www.proximatrip.com.br, acessado em 04 nov. 2020.



Figura 3-35: Vista dos telhados e empenas do conjunto urbano, a partir da torre do lado da epístola. Foto: Ivany Walendy, 2016.

Por fim, sobre o fator humano, que é origem dos fenômenos psíquicos que interagem em um incêndio, o desafio está na insuficiência de políticas públicas, voltadas às ações de capacitação para prevenção e combate a incêndios e gerenciamento de risco junto às comunidades que usufruem dos monumentos e do conjunto urbano tombado. Mas não é um desafio exclusivo da cidade de Ouro Preto, nem de qualquer outra cidade-patrimônio brasileira. É um assunto complexo, pois, segundo CLARET-GOUVEIA (2017), não se trata exclusivamente de problemas técnico-científicos, ligados às questões do comportamento da edificação e dos seus materiais e sistemas construtivos ao fogo. Esses últimos interagem fortemente com os problemas sociais de distribuição renda, igualdade de direitos, precariedade da educação e saúde pública, déficit de moradias etc. - problemas considerados mais urgentes e que estatisticamente causam mais perdas de vidas, se comparados à falta de segurança contra incêndios. É evidente que a existência de outros tantos problemas não justifica a falta de ações em favor da prevenção e do combate aos incêndios, mas, certamente, na falta de recurso, a segurança contra incêndio não será a prioridade de investimento.

Concluindo, cada uma dessas características e aspectos apresentados aqui tem um impacto próprio na severidade do incêndio nas edificações coloniais, e, em conjunto, “elas fazem do risco de generalização de incêndio um evento provável nos sítios históricos” (CLARET-GOUVEIA, 2006, p.11). Ouro Preto pode ser classificada perfeitamente como uma “cidade inflamável”, expressão sugerida por Claret-Gouveia (2017). A cidade apresenta todas as condições que favorecem a viagem do fogo pela edificação de origem, e dela para a

edificação vizinha, sem qualquer barreira que impeça seu avanço, enquanto houver materiais e sistemas construtivos capazes de sustentar o processo de combustão, ou enquanto houver impedimentos para a passagem e a ação do Corpo de Bombeiros, a tempo da possibilidade de extinção do incêndio.

3.2 Características, propriedades e preservação da madeira

São vários fatores que influenciam o comportamento da madeira, quando submetida a altas temperaturas, como as características da espécie, o estado de conservação em que ela se encontra, e os tratamentos aos quais foi submetida. Por isso, aqui serão abordadas as características específicas da Imbuia, espécie objeto de estudo desta dissertação, como também os principais insetos xilófagos, que degradam as madeiras em geral, e os métodos de tratamento e prevenção contra estes agentes.

3.2.1 Características da Imbuia – *Ocotea porosa*

A espécie da madeira, cedida pelo IPHAN e pela Diocese de Mariana para os testes desta pesquisa, foi identificada no Departamento de Botânica da Universidade Federal de Minas Gerais, pelo Prof. Dr. Fernando Henrique Aguiar Vale, que após análise macroscópica e microscópica concluiu, em relatório, ser da espécie *Ocotea porosa*, da família Lauraceae (Figura 3-36 a 3-38), com nome popular de Imbuia (figuras 3-5 a 3-7).



Figura 3-36: Face tangencial da madeira Imbuia. Acessado em 25 de out. 2018. Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm.



Figura 3-37: Face radial da madeira Imbuia. Acesso em 25 de out. 2018. Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm.

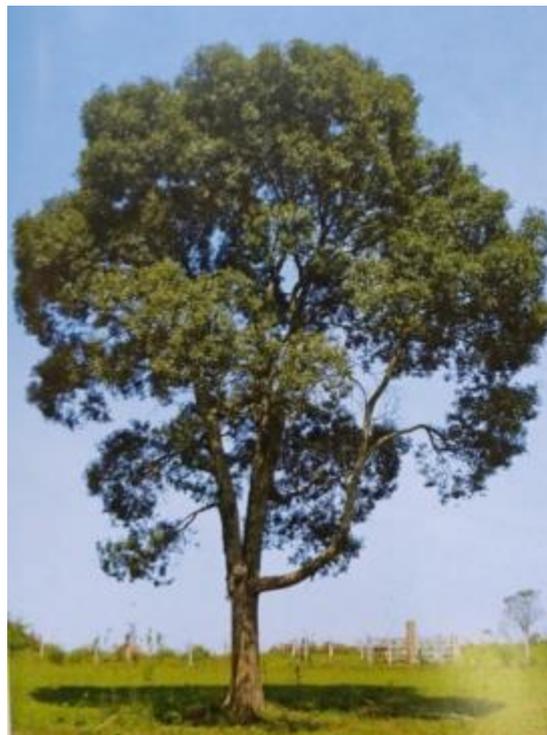


Figura 3-38: *Ocotea porosa*, árvore. Fonte: LORENZI, 2008, p.221.

A Imbuia, ou Canela-Imbuia, é uma árvore brasileira que, segundo CNCFlora (2012), ocorre nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e, especialmente, no estado do Paraná, podendo atingir de 7 a 20m de altura, e 50 a 150cm de diâmetro de tronco (LORENZI, 2008). A espécie hoje consta na lista das ameaçadas de extinção, de acordo com Portaria 443/2014, do então Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014). Algumas medidas têm sido tomadas para conter a exploração da Imbuia, no entanto, pelo seu alto valor econômico, a ameaça ainda persiste (CNCFlora,2012).

Sendo a Imbuia uma angiosperma, a anatomia da madeira pode ser descrita de forma bastante sucinta e generalizada, em corte transversal, como formada por círculos concêntricos chamados de anéis de crescimento inicial e anéis de crescimento tardio, formando (figura 3-39 e 3-40) as seguintes camadas: a casca, inerte com função protetora; o floema, que tem a função de transportar a seiva elaborada; o cambium, um tecido de espessura microscópica, que produz o crescimento no sentido diametral; o xilema, que é a madeira propriamente dita, formada pelo alburno, o cerne, onde estão os óleos, resinas e ceras, e a medula. Na direção axial, estão células e tecidos - dentre eles as fibras, que têm a função de sustentação e se apresentam no sentido longitudinal, ou seja, no sentido do comprimento o tronco (figura 3-39). E no sentido radial estão os raios, que têm a função de armazenamento, transformação e condução transversal de substâncias nutritivas” (GUERRA, 2011. p.387).

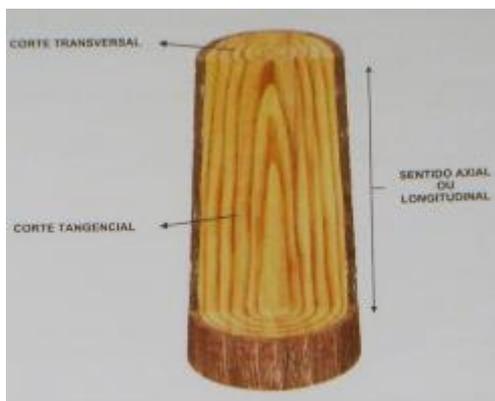


Figura 3-40: Corte longitudinal esquemático. Fonte: GONZAGA, 2006, p.23.

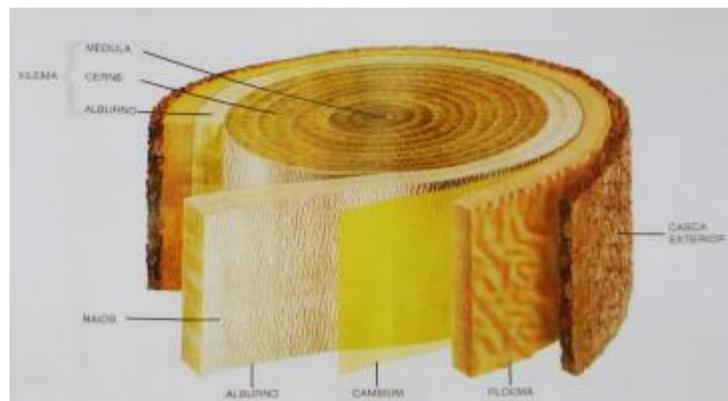
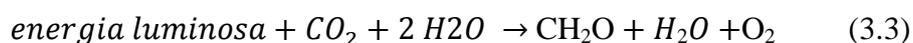


Figura 3-39: Corte transversal esquemático de uma folhosa. Fonte: GONZAGA, 2006, p.21.

Assim como as demais madeiras, a Imbuia é formada quimicamente a partir da fotossíntese, que consiste na absorção da energia dos raios solares em uma reação química da água retirada do solo e contida nas células com o dióxido de carbono (gás carbônico), retirado do ar e retido pelas folhas. Essa reação forma o CH_2O , que é o constituinte básico na formação dos açúcares

(glicose), elemento principal da estrutura molecular da árvore, uma molécula de água e o oxigênio que é liberado para o ar (GONZAGA, 2006), de acordo com a reação:



Os principais elementos constitutivos da estrutura molecular da madeira são a celulose - $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, que forma a parede dos tecidos do xilema, pela consolidação das ligações entre os milhares de cadeias de celulose; a hemicelulose, que compreende entre 20% e 28% dos tecidos da folhas; a lignina, que atua como adesivo entre os tecidos da madeira, conferindo dureza, resistência mecânica e ao ataque de insetos xilófagos e impermeabilidade

Segundo LORENZI (2008), a Imbuia é uma madeira pesada, com densidade de $0,65\text{g/cm}^3$, dura ao corte, de grande resistência, mesmo quando expostas às intempéries, como quando aplicada em dormentes, ponte e mourões.

A Imbuia é considerada uma madeira nobre, muito aproveitada na confecção de mobiliários de luxo e, na construção civil, é utilizada tanto em revestimentos e acabamentos, como pisos (tacos, laminados e tabuados), forros (lambris e tabuados) e esquadrias, quanto em estruturas pesadas (LORENZI, 2008), como foi empregada na carpintaria do telhado da Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias.

A *Ocotea porosa* é considerada resistente ao ataque de insetos xilófagos, sendo pouco atacada por cupins. Por conseguinte, o cerne e o alburno são moderadamente resistentes à impregnação por substâncias preservantes (BERNI *et al.*, 1979) e, de acordo com o IPT (1989a), em ensaios de laboratório a espécie revelou impermeabilidade às soluções inseticidas, quando submetida a tratamentos sob pressão.

As propriedades físicas e mecânicas da Imbuia - *Ocotea porosa*, de acordo com o IPT²⁵, são as mostradas na Tabela 3-1.

²⁵ http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm.

Tabela 3-1: Características da Imbuia (*Ocotea porosa*).

Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
Densidade aparente a 15% de umidade (pap, 15)	650kg/m ³	Densidade Básica (pbásica)	540kg/m ³
Contração radial	2,7%	Contração tangencial	6,3%
Contração volumétrica	9,8%		
Resistência à flexão – madeira verde	76,9MPa	Resistência à flexão – madeira 15% umidade	91,6MPa
Limite de proporcionalidade na flexão – madeira verde	28,4MPa	Modulo de Elasticidade na flexão – madeira verde	7.738MPa
Resistência à compressão – paralela às fibras – madeira verde	32,0MPa	Resistência à compressão – paralela às fibras – madeira 15% umidade	44,1MPa
Coefficiente de influência de umidade na resistência à compressão	4,8%	Limite de proporcionalidade na compressão – madeira verde	23,0MPa
Módulo de elasticidade na compressão	8.826MPa	Resistência ao impacto na flexão - madeira a 15% (choque): trabalho absorvido	20,6MPa
Cisalhamento – madeira verde	9,6MPa	Dureza janka – madeira verde	4276N
Tração normal às fibras - madeira verde	6,7MPa	Fendilhamento – madeira verde	0,8MPa

Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-imbuia.htm. Acesso em: 28 de out. 2017.

3.2.2 Degradação dos elementos construtivos em madeira por insetos xilófagos

A madeira, em geral, é degradada por diversos agentes de origem biológica - os microrganismos e as espécies xilófagas - e também por fatores não biológicos. Como material natural e orgânico, a degradação por agentes biológicos é a causa mais frequente de deterioração de estruturas dessa matéria-prima (NEVES, 2013), e nos climas tropical e subtropical, como no Brasil, a ação dos agentes biológicos costuma ser mais intensa do que em clima frio (GONZAGA, 2006).

Segundo Gonzaga (2006), entre os agentes não biológicos pode-se citar a combustão (como no caso de incêndios), os raios solares ultravioletas e infravermelhos, a água (pela chuva, umidade de solo e umidade relativa do ar), as variações térmicas, os esforços mecânicos e a ação de substâncias químicas. As madeiras utilizadas em obras externas são as que mais sofrem danos, causados pelos agentes ambientais, como a retração, a perda de extrativos, a despigmentação, o fendilhamento e o empenamento. É relevante destacar que, em grande parte das vezes, os danos causados pelos agentes biológicos estão associados a aqueles de origem ambiental, ou seja, os últimos podem abrir caminho ou criar condições favoráveis à ação dos primeiros. A durabilidade da madeira vai depender, então, da interação

entre as condições ambientais do espaço de utilização da madeira e das características da espécie selecionada.

Em se tratando da degradação por agentes biológicos, podem-se citar bactérias, fungos, xilófagos marinhos e insetos que degradam a madeira. As bactérias, que são agentes auxiliares dos fungos, alimentam-se de substância de reserva da parede celular, decompondo a celulose e hemicelulose, por meio de enzimas, facilitando a penetração das hifas dos fungos apodrecedores. Assim, ligações químicas da madeira são quebradas, tornando-a material solúvel. As bactérias também propiciam transporte e armazenamento de substâncias nutritivas do fungo (RODRIGUES, 2004).

De um modo geral, a degradação da madeira pelos fungos ocorre quando a madeira apresenta umidade acima de 20% e à temperatura ideal entre 25°C e 30°C, porém pode ocorrer acima de 0°C e abaixo de 60°C (GONZAGA, 2006), ou seja, agem sob a interferência de agentes ambientais, que propiciam condições perfeitas para desenvolvimento desses microrganismos.

Entre os cinco grandes grupos degradadores biológicos das madeiras estão os insetos, agentes de degradação mais comuns de se encontrar. Dentre esses, cinco das vinte e seis ordens, que compõem a classe, causam danos à madeira; são elas: lepidóptera (borboletas e mariposas), díptera (moscas e mosquitos), hymenóptera (vespas, abelhas e formigas), coleóptera (carunchos e brocas) e isóptera (térmitas ou cupins).

A lepidóptera possui coloração escura e o período de voo é compreendido entre junho e julho. Suas larvas situam-se nas fendas da madeira e fazem galerias elípticas no sentido das fibras. Degradam, geralmente, madeira de folhosas, com elevado teor de umidade (RODRIGUES, 2004).

A ordem hymenóptera é um dos maiores grupos entre os insetos que se caracterizam por possuírem olhos situados atrás da cabeça, com tamanhos variando entre 70 a 90mm. As larvas abrem galerias cilíndricas com 20 a 30cm de comprimento e preferem madeiras folhosas (RODRIGUES, 2004).

Os coleópteros, depois dos cupins, são os insetos que mais degradam a madeira (MENDES e ALVES, 1988). São considerados de ciclo larvar e possuem dois pares de asas como característica. O inseto fêmea deposita os ovos nos orifícios da madeira, dando origem, depois de certo tempo, a uma larva que se alimenta da madeira, formando galerias, podendo fazer

com que a madeira perca capacidade de resistência (RODRIGUES, 2004). Depois, a larva passa por metamorfose, transformando-se em pupa e, por último, em indivíduo adulto.

A ordem dos isópteros, que compreende os cupins ou térmitas, são insetos sociais, ou seja, que vivem em grandes colônias, em comunidade organizada e hierarquicamente representada e são incapazes de viver isoladamente. Cada casta possui uma função específica na comunidade. As castas são divididas em operários, que constroem, coletam alimento, nutrem e defendem a colônia; soldados, que defendem a colônia, através de um sistema mecânico e/ou químico; e insetos reais, que se dividem em sexuais funcionais (que possuem a função de formar novas colônias) e indivíduos sem asas sexuais não funcionais, sendo os mais novos da comunidade (RODRIGUES, 2004).

Em geral, os cupins alimentam-se de matéria vegetal, mas também podem se alimentar de indivíduos mortos ou mutilados, papel e tecidos. De acordo com Mendes e Alves (1988), a digestão inicial ocorre através de um protozoário que vive no trato digestivo do animal, o que constitui uma verdadeira simbiose. O tratamento utilizado neste trabalho é comumente utilizado exatamente para a eliminação desses agentes de degradação da madeira.

Os cupins de solo ou subterrâneos (*Heterotermes tenui*, por exemplo) (Figura 3-41) são aqueles responsáveis pelo maior volume de madeira destruída no mundo, segundo Mendes e Alves (1988). Esses insetos não possuem quitina, responsável por endurecer a pele dos insetos, não suportam a luz solar e a maioria é cega. A quitina também confere ao corpo do inseto resistência à baixa umidade. Por isso, necessitam de elevada umidade relativa, presente na superfície do solo (MENDES e ALVES, 1988). Sendo assim, em contato com o ar seco, podem perder muita umidade.

O ataque desses insetos pode se estender a peças mais secas, pois esses cupins constroem túneis estruturados com argila e outros materiais, mantendo as condições necessárias de umidade. Detecta-se o seu ataque a partir da observação da camada externa da peça, pois ela estará fina e, quando pressionada, poderá se romper. Mendes e Alves (1988) explicam que, para certificar o ataque desses cupins, deve-se dar pequenas batidas na superfície suspeita. Se ela estiver sido atacada, um som oco indicará a presença desses insetos na peça.

Os cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis* e *Neotermes sp*, por exemplo) (Figura 3-42) são encontrados geralmente em regiões de clima quente e nas áreas subtropicais. Constroem seus ninhos no interior da madeira com baixo teor de umidade, entre 10 a 12%, não exigindo

contato com o solo. Iniciam o ataque pelo ar, através de rachaduras ou outras fendas naturais e iniciam a escavação das longas galerias para o interior da madeira, fechando a entrada com partículas da própria madeira (MENDES e ALVES, 1988). Segundo Gonzaga (2006, p.47), “as galerias possuem pequenos furos para aeração e despejo dos excrementos, que são granulados escuros, formando montículos no piso onde caem”. As pelotas fecais desses cupins auxiliam na detecção do ataque, pois a superfície externa da madeira não revela a presença deles. Porém, grande parte da estrutura da peça pode já estar comprometida pelas galerias formadas.

Esses insetos podem ser encontrados nos mais diversos tipos de estruturas, como tesouras estruturais, móveis, pisos, janelas, portas, molduras de quadros, vigas da cobertura, entre outros (Figuras 3-43 a 3-45). Exemplificando, Rodrigues (2004) ressalta que um ataque dos cupins de madeira seca pode destruir uma peça em questão de meses ou anos, dependendo da sua estrutura, e da resistência da madeira ao ataque desses insetos.



Figura 3-41 : Cupim de solo (*Heterotermes tenuis*). Fonte:<https://proec.ufabc.edu.br/cupim/heterotermes-tenuis/>. Acessado em 25 de jul.2019.



Figura 3-42: Cupim de madeira seca. Fonte:<http://imdap.entomol.ntu.edu.tw>. Acessado em 25 de jul.2019.



Figura 3-43: Madeira retirada da Matriz de N. Sr.^a da Conceição, com furos, indicando a presença de xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-44: Madeira retirada da Matriz de N. Sr.^a da Conceição, deteriorada por xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 3-45: Madeira retirada da Matriz de N. Sr.^a da Conceição, bastante deteriorada por cupins. Fonte: arquivo pessoal.

3.2.3 Tratamento e restauro das madeiras contra os xilófagos

Na escolha da substância e do método de aplicação para o tratamento da madeira, seja ele curativo, preventivo e/ou impermeabilizante, em primeiro lugar deve-se conhecer a espécie em termos de durabilidade e impregnabilidade diante dos produtos químicos a serem utilizados. A definição dos produtos e sua aplicação vão depender, também, da composição química, do estado (líquido, sólido ou gasoso), da compatibilidade com outros materiais e do campo de aplicação. (RODRIGUES, 2004).

Escolher a época do ano para a extração da árvore é uma técnica de obtenção de madeiras mais resistentes às deformações e ao ataque de xilófagos já citada por Vitruvio (2006) no século I AD. Segundo Vasconcellos (1979, p.33):

“Dentre esses convém ressaltar a norma de só se derrubar as árvores em tempo seco, em fases certas da lua (quarto minguante). Especificava-se ainda, que entre a derrubada e a utilização decorresse certo lapso de tempo, destinado a proporcionar uma secagem melhor dos troncos”.

Uma das principais condições para a escolha do preservante a ser utilizado na madeira, segundo Silva (2007), é não alterar as propriedades da madeira, ou seja, suas características físicas, químicas, mecânicas e decorativas. Ainda mais no caso da preservação do patrimônio cultural edificado e seus elementos artísticos, é essencial que madeira tratada não tenha sua superfície alterada ou provoque alterações nos elementos integrados.

Os produtos de tratamento da madeira podem ser os naturais ou industrializados. Os últimos são compostos por substâncias com propriedades inseticidas ou fungicidas, produtos fixadores

(classificadas em permanentes, voláteis, solúveis) e por solventes, que têm a função de transportar os constituintes citados. Os solventes utilizados são os orgânicos (como o querosene e a isoparafina) e a água. Os orgânicos possuem maior poder de difusão, mas também possuem secagem lenta, odor persistente e propiciam o aparecimento de manchas e problemas de colagem (RODRIGUES, 2004), além de se somarem aos fatores de risco de incêndios, por se tratar de produtos combustíveis. Esses inseticidas e fungicidas químicos podem ser hidrodispersáveis (ou emulsões) ou dissolventes orgânicos, e terem como materiais ativos os compostos nitratos, clorados, organometálicos ou organitrogenados.

Os tratamentos podem ser classificados em preventivo, curativo ou protetivo. Os tratamentos preventivos são classificados de acordo com o grau de penetração do protetor, a umidade da madeira e o método de aplicação do protetor (RODRIGUES, 2004). Nesse tipo de tratamento adotam-se medidas que eliminem ou reduzam o risco de ataques e impeçam a ação de agentes degradantes da madeira (CRUZ e NUNES, 2012 *apud* NEVES, 2013). Os tratamentos protetivos contra os agentes biológicos muitas vezes são realizados com a utilização de biocidas, produtos tóxicos aos organismos, de forma que permaneçam na madeira durante determinado período de tempo, sem alterar suas propriedades (RODRIGUES, 2004).

Já os tratamentos curativos costumam ser mais onerosos e complicados e incluem várias fases: a detecção da patologia, a identificação da espécie dos xilófagos, o diagnóstico da degradação e as medidas de tratamento; e podem envolver restituição de partes faltantes, substituição de partes deterioradas e/ou junção de peças soltas ou entre elementos novos e os existentes.

De acordo com Gonzaga (2006), os produtos naturais, aplicados de forma isolada ou diluídos com solventes, podem ter bom desempenho na preservação da madeira, podendo alguns ainda apresentarem ação superior à aplicação de óleos e resinas derivadas de petróleo. Esses eram os tratamentos disponíveis e largamente utilizados desde a antiguidade, e os conhecimentos do emprego de algumas dessas substâncias e técnicas vem até os dias de hoje. De acordo com a classificação do autor, os tratamentos naturais podem ser:

- (i) água do mar: eficiente e sempre disponível, desde que a madeira não permaneça submersa;
- (ii) betume: excelente na preservação, porém não aceita revestimentos ou pinturas decorativas, altera a cor natural da madeira e é facilmente inflamável;

- (iii) carbonização superficial: operação realizada com maçarico que oferece proteção, porém deve-se tomar cuidado extremo na execução, devido ao aumento do risco de incêndio, e mesmo evitar em sítios históricos;
- (iv) cera de abelha: uma boa impermeabilização, proteção e oferece aspecto mais natural;
- (v) cera de carnaúba: está entre os tratamentos mais utilizados no Brasil, sendo adotado inclusive como matéria-prima na fabricação de ceras industriais; é um impermeabilizante e protege a madeira da umidade que propicia a infestação de fungos; de fácil aplicação, mas requer o uso de solventes;
- (vi) óleo de linhaça: também ainda muito aplicado, tem ótimo desempenho secativo, proporciona boa impermeabilização e ressalta o aspecto natural; necessita de renovação anual e pode ser combinado a fungicidas e cupinicidas, para melhor tratamento.

Os preservantes industriais, segundo Gonzaga (2006), podem ser eficientes, embora sejam ecologicamente perigosos e apesar de alguns possuírem alta toxicidade ao manuseio e aplicação. Alguns exemplos desses compostos são: alcatrão, alvaiade, aarbolineum, ACA (arseniato de cobre amoniaco), CCA (arseniato de cobre cromatado), CCB (borato de cobre cromatado em solução aquosa), creosoto (procedente da combustão de carbonos graxos - hulha), entaclorofenol, tintas à base de cobre e chumbo, zarcão à base de chumbo ou à base de óxidos de ferro. Grande parte deles são altamente tóxicos, e, por isso, alguns deles possuem restrições na utilização ou mesmo foram proibidos ao uso comercial.

Gonzaga (2006) ressalta que o pentaclorofenol é um dos mais violentos organoclorados para preservação da madeira. Embora muito eficiente de imediato, tem uma duração média de cinco anos (os cupins da madeira seca podem esperar dez anos para atacar). A degradação depende das propriedades da própria espécie da madeira (a reação com os extrativos) e de sua resposta à exposição ao tempo (ar, chuva e luz solar).

Atualmente, com o avanço da ciência e da tecnologia, estão disponíveis no mercado produtos inseticidas e fungicidas um pouco menos danosos à saúde humana e ao meio ambiente, considerados de segunda e terceira gerações. No entanto, mesmo considerados menos tóxicos, a compra e a aplicação desses produtos, principalmente quando não diluídos, assim como os anteriores, requerem a formação profissional e capacitação específica, como também a utilização de EPIs. Mesmo quando são manipulados para a venda liberada, os cuidados no

manuseio não devem ser dispensados. Dentre esses produtos, GONZAGA (2006) destaca alguns deles, descritos a seguir.

- (i) Naftenato de cobre: eficiente e de baixa toxicidade para o homem.
- (ii) Piretrinas: possuem estrutura química similar às piretrinas, substâncias naturais extraídas das flores do crisântemo (*Chrysanthemum cinerariaefolium*) (DOS S. MELO *et al.*, 2008), atualmente produzidos sinteticamente, são chamados de piretróides, aletrina, deltametrina, permetrina (que é a substância utilizada neste trabalho), bioresmetrina (mais segura para humanos). Os piretróides são classificados como inseticidas hidrossolúveis e conferem proteção por até 6 meses.
- (iii) Preventol Of: ortofenilfenol - OPP, utilizado no tratamento da madeira recém-cortada.
- (iv) Quelotado de Cobre: possui baixa toxicidade em meio alcalino.
- (v) Sais de amônio: quaternário e aminas terciárias; podem ser utilizados em veículo aquoso ou oleoso. Muito utilizados nas obras de restauro, como fungicidas e herbicidas, e têm a indicação de garantir a proteção de até 6 meses.

Um outro biocida industrial, ainda muito utilizado no patrimônio cultural como tratamento contra os insetos xilófagos, é o fipronil. Trata-se de um composto do grupo fenil-pirazol, considerado um inseticida de segunda geração, e da classificação toxicológica de classe II (altamente tóxico). É também largamente usado na agricultura, como nas culturas de algodão, arroz, batata, e nas formulações utilizadas em medicamento veterinário.

Atualmente, existem os tratamentos considerados ainda mais naturais e ambientalmente inofensivos. Gonzaga (2006) cita alguns exemplos desses tratamentos: hormônios sexuais e feromônios, que atraem insetos para armadilhas; papel-cola, com a iluminação noturna, que atrairá e capturará insetos (fototropismo); extrativos vegetais, que possuem na formulação extratos de planta que repelem naturalmente fungos e insetos xilófagos.

No estudo de caso desta dissertação, o tratamento aplicado é o voltado para a eliminação de insetos xilófagos de madeira seca como, por exemplo, dos cupins da família *Kalotermitidae*, principalmente da espécie *Cryptotermes brevis*. A eliminação do cupim pode ser um processo

de ação curativa ou preventiva, para evitar eventuais ataques futuros, e os métodos de tratamento vão ser classificados em físicos ou químicos (SILVA, 2007).

Os métodos físicos, de ação curativa, vão modificar as condições ambientais para a eliminação do inseto. Já os métodos químicos consistem na aplicação de substâncias tóxicas para a eliminação do agente degradante. Os produtos aplicados podem ser gasosos ou líquidos, sendo os gasosos de caráter somente preventivo, uma vez que a sua ação acaba ao fim da aplicação. As substâncias líquidas, quando diluídas em solventes, conseguem penetrar melhor na madeira em função da sua espécie, da impregnabilidade e da quantidade e qualidade do método utilizado (SILVA, 2007).

Os procedimentos podem ainda ser classificados em passivos e ativos. O passivo se baseia na propriedade da madeira em absorver o protetor, sendo a quantidade de produto absorvido irregular e não controlável. As técnicas de aplicação incluem pincelagem, aspersão, pulverização e imersão breve. O método ativo é baseado em técnicas artificiais que permitem o controle da quantidade de produto que será absorvido pela madeira; serão técnicas de vácuo-pressão e sistemas que utilizam autoclave (SILVA, 2007).

De acordo com Rodrigues (2004), o tratamento para a espécie *Cryptotermes brevis* deve ser efetuado da mesma forma que o tratamento para os insetos da família cerambycídeos. No primeiro momento, detectado o indício de ataque dos cupins de madeira seca, deve-se avaliar se o ataque é ativo ou inativo. Para ataques inativos, Rodrigues (2004) indica que é suficiente um tratamento preventivo por meio da aplicação superficial de produto químico, mas, quando a peça possuir espessura inferior a 20mm, deve ser efetuado o tratamento curativo.

O tratamento baseia-se na eliminação da capa externa danificada para eliminação de resíduos que possam impedir a aderência e penetração do produto químico. Deve-se observar se a seção da madeira danificada necessitará de reforço ou substituição (RODRIGUES, 2004).

Detectada a necessidade de tratamento, Rodrigues (2004) indica que seja realizada a injeção do produto químico, com soluções orgânicas, na superfície de maior dimensão da seção transversal da peça ou alinhada na altura da peça, na superfície de menor dimensão da seção transversal. São indicados três furos por metro linear, com profundidade de 2/3 da espessura da peça. O produto é introduzido por meio de válvulas de injeção que vão variar de acordo com as dimensões das peças. Para peças entre 50 e 200mm de espessura, recomendam-se válvulas de 6mm de diâmetro; se a espessura da peça for superior, usam-se válvulas de 9mm

(RODRIGUES, 2004). Além da injeção, uma outra forma de encharcar a peça e o gotejamento, através desses furos e com a utilização de equipo de macrogotas, como os de soro em hospitais. Realizado o tratamento em profundidade, executa-se o tratamento superficial por pulverização ou pincelagem. Nesse caso, Rodrigues (2004) considera que seja 250 a 300 g/m², em duas demãos.

Se detectado o ataque do inseto em ciclo larvar, pode-se efetuar o tratamento em forma de fumos. O tratamento é realizado com inseticida na forma de fumo que vai se depositar na madeira como uma película muito fina. Entretanto, esse procedimento não vai eliminar as larvas e é considerado tóxico, segundo Rodrigues (2004). A autora descreve o procedimento da seguinte forma: o edifício deverá ser selado por pelo menos 12 horas, para evitar a perda do fumo. No movimento ascendente, o inseticida se depositará na face inferior da madeira e alcançará o telhado. No telhado, o inseticida atinge temperaturas mais baixas e desce, depositando-se na face superior da madeira. Devido à sua toxicidade, o produto utilizado deverá ser retirado por vácuo industrial. De acordo com a autora, o ideal é que esse procedimento seja realizado em dia com temperatura aproximada de 15°C, e que seja realizado por sete anos consecutivos, para atingir todo o ciclo larval do inseto.

Outros tipos de tratamentos indicados por Rodrigues (2004) são a esterilização a elevadas temperaturas (superior a 50°C), durante 30 a 60 minutos, que provocará a morte das larvas e insetos, e o tratamento curativo por choque térmico, que se aplica a peças de madeiras móveis, consistindo-se no tratamento realizado em câmara, para redução gradual da temperatura durante alguns dias. Quando se recupera a temperatura, aplica-se produto químico por impregnação.

Já o tratamento em madeira policromada, Rodrigues (2004) salienta que requer estudo prévio sobre a compatibilidade do produto químico aplicado e o tipo de policromia. Em geral, o procedimento pode ser realizado por injeção no verso da peça. Nesse caso, aproveitam-se os orifícios de saída, deixados pelo inseto, mas se a injeção não for possível, pode-se utilizar gases tóxicos, de preferência gases inertes.

Além do que indica a bibliografia existente, é fundamental conhecer também as práticas de tratamento contra os cupins de madeira seca, adotadas nas obras e trabalhos de conservação e restauro no Brasil, especificamente em Minas Gerais. A seguir, alguns exemplos.

- **Fazenda Samambaia – Intervenção Arquitetônica e Paisagística**

Para essa obra no município de Pedro Leopoldo, Minas Gerais, em projeto realizado pela HSA – Harue Sofal Arquitetura Ltda. (2014), foi indicada no memorial descritivo imunização preventiva para todo o madeiramento do edifício, tanto em peças novas quanto em peças antigas.

Para as peças não removíveis, foi indicada a imunização por meio de pulverização de produto químico à base de isoparafina e piretróide sintético, diluído em aguarrás mineral, na proporção indicada pelo fabricante (referência comercial Dragnet 384 CE, Novartis ou equivalente). Indicou-se também a aplicação do mesmo cupinicida por gotejamento ou injeção nos orifícios da madeira, causados pelos insetos xilófagos. No caso da necessidade de aplicação do produto por pulverização, instruiu-se utilizar bombas convencionais individuais que soltam o cupinicida, até o encharcamento da peça.

Para as peças novas ou passíveis de remoção, foi recomendado o tratamento por imersão. O produto indicado é o mesmo para o caso de peças não removíveis: produto químico à base de isoparafina e piretróide sintético, diluído em aguarrás mineral, na proporção indicada pelo fabricante (referência comercial Dragnet 384 CE, Novartis ou equivalente). O memorial indica o tempo de três dias para submersão das peças. Para essa obra, foi proibida a utilização de qualquer composto com pentaclorofenato.

- **Intervenções de Conservação e Restauração da Fundação de Arte de Ouro Preto, FAOP**

A Fundação de Arte de Ouro Preto, FAOP, vinculada à Secretaria de Estado de Cultura de Minas Gerais possui, como um dos seus serviços, a Escola de Arte Rodrigo Melo Franco de Andrade, que oferece o Curso Técnico em Conservação e Restauro. Uma das estratégias desse curso é realizar o estágio supervisionado e obrigatório, dentro da própria Fundação, com obras de valor cultural de acervos da região. Os suportes trabalhados na FAOP são madeira esculpida policromada e dourada, pintura sobre cavalete e papel (que não há aplicabilidade para este estudo).

Para o estudo do método de tratamento do cupim de madeira seca, realizado na FAOP, foram analisados alguns relatórios técnicos de obras concluídas²⁶. Assim, observou-se que a instituição usa majoritariamente o inseticida cujo ingrediente ativo é o fipronil²⁷, com os solventes aguarrás e querosene, diluídos em 2% e 10% respectivamente. O tratamento é quase sempre indicado e executado como imunização preventiva: havendo ou não focos de ataque de insetos xilófagos o procedimento é realizado.

Para obras com suporte em madeira esculpida, policromada e dourada, a aplicação pode ser realizada por injeção, aproveitando-se os orifícios deixados pelos insetos xilófagos, ou por pincelamento, quando a escultura possui madeira aparente. Alguns exemplos da aplicação dessa metodologia foram encontrados nos relatórios da Restauração das imagens sacras da Igreja de Nossa Senhora da Conceição em Cachoeira do Brumado, distrito de Mariana em Minas Gerais, e no Relatório da Restauração de imagens sacras do Museu Arquidiocesano de Arte Sacra, também da cidade de Mariana.

Ressalta-se também o exemplo da restauração dos elementos artísticos da Igreja de Nossa Senhora da Soledade Lobo Leite, distrito de Congonhas. Para as peças maiores, nesse caso, admitiu-se a aplicação do fipronil a 10%, diluído em querosene, aplicado por pincelamento no verso e por aspersão nas peças maiores, procedimento realizado com bomba de pressão.

Já em relatórios mais antigos da Fundação, observa-se a utilização do produto da permetrina²⁸, diluída em aguarrás a 6,5%, indicado como tratamento curativo e preventivo de escultura em madeira policromada. A aplicação sempre foi realizada por injeção nos orifícios da peça, deixados pelos insetos xilófagos, e, após a aplicação, a peça foi armazenada em capela por três dias.

- **Restauração na Casa dos Contos – Ouro Preto**

Na obra de restauração realizada na Casa dos Contos em Ouro Preto, Minas Gerais, em 1982 e 1983 (FERRAZ, 1985, p.31), foram realizados alguns procedimentos de tratamento de ataque de insetos xilófagos.

²⁶ Os relatórios técnicos das obras realizadas pela FAOP fazem parte do acervo da Instituição, que pode ser consultado na Biblioteca Murilo Rubião, gerenciada e localizada também na Fundação.

²⁷ Termidor® 22 CE.

²⁸ Tipo Dragnet® 384 CE, da marca Bayer.

Foi executada fumigação para todo o madeiramento em câmara de gás (criação nos locais de peças irremovíveis, como o pendural do Mirante e o forro artístico da sala nobre), como também no mobiliário, e portas e janelas (FERRAZ, 1985).

Já para as peças novas, foi realizado o tratamento com imersão em tanque, contendo solução imunizante, e pincelagem em três demãos, antes da instalação das peças e também após a instalação, *in loco* (FERRAZ, 1985). Foram necessárias barreiras tóxicas nas peças estruturais em contato com as alvenarias, executadas por injeção com furos de 60cm de distância entre barreiras (FERRAZ, 1985).

Efetuuou-se o polvilhamento com imunofungicida nas pontas e cabeças das peças em contato com alvenarias. Injeções em peças irremovíveis, como portais e ombreiras em toda a extensão das peças. Impermeabilização das bases em rocha onde se encontra instalada a estrutura inferior de pisos (FERRAZ, 1985). Ao final da obra, ocorreu pincelagem em toda a estrutura, dedetização geral e pintura de barrotes aparentes, com solução preservativa indicada pela SPHAN/FNpM (FERRAZ, 1985).

- **Tratamento da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição – Ouro Preto**

O projeto de Desinfestação e Imunização (ANJOS, 2009) indica para o madeiramento do telhado da nave que, em todas as peças, deverão ser aspergidas camadas finas de imunizantes, diluídos em água, até se obter a saturação da superfície das madeiras. Aplicar o encharcamento do ápice das paredes, com imunizantes de longo efeito residual, diluídos em água. Aplicação de manta asfáltica na parte apical das madeiras que ficam em contato com as paredes.

Na substituição das madeiras que não cumprem mais suas funções estruturais originais, o projeto aconselha o emprego da *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. (*Sapotaceae*), cujo nome popular na região de Paragominas-PA é “Maçaranduba”, por ser considerada resistente a fungos apodrecedores e altamente resistente ao ataque de cupins. Para os forros e piso, sugere-se utilizar a *Tabebuia serratifolia* (Nome popular: “Pau-d’arco-amarelo”), e a *Cedrella odorata* (Nome popular: “Cedro-rosa”, “Cedro-vermelho”, “Cedro-pardo”), respectivamente (ANJOS, 2009).

Durante as obras de intervenção de conservação e restauro da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias, em Ouro Preto, iniciada em 2015 e finalizada em 2016, como

mencionado e de acordo com o diário de obra (CONSTRUTORA AMBIENTAL, 2016), inicialmente, tanto as peças novas quanto as que permaneceram na edificação receberam imunização com a permetrina (Dragnet 384 CE), diluída em isoparafina, na seguinte proporção: “1 litro de permetrina diluído em 25 litros de isoparafina 7/2” (p.210). A aplicação do inseticida foi realizada por aspersão (Figuras 3-46 e 3-47), após a limpeza de todo o telhado, com a retirada de pó, entulhos, excrementos de aves e insetos.

Mais adiante, na execução da obra em julho de 2015 a diluição da isoparafina foi substituída pela água na seguinte diluição: 50 mililitros de permetrina em 20 litros de água (CONSTRUTORA AMBIENTAL, 2016, p.227), com a justificativa da inflamabilidade da isoparafina.

No madeiramento de suporte do forro em estuque da capela-mor, a permetrina foi diluída em aguarrás, o que é uma prática na imunização de elementos integrados que contêm pinturas artísticas, assim como é adotado pela FAOP. Segundo a restauradora responsável pela consolidação do forro, Ivani Walendi, a opção se deu pelo fato de que a água como diluente poderia causar danos irreversíveis à pintura e, em relação à utilização da isoparafina como veículo do inseticida, não havia até então estudos sobre a interação dessa substância com as pinturas artísticas.



Figura 3-47: Trabalho de imunização por aspersão da estrutura do telhado. Foto: CONSTRUTORA AMBIENTAL, 2015.



Figura 3-46: Trabalho de imunização por aspersão das madeiras novas que substituíram as madeiras danificadas. Foto: CONSTRUTORA AMBIENTAL, 2015.

A permetrina é um pesticida sintético, tipo I do grupo químico da família dos piretróides, que, por sua vez, possuem estrutura química similar às piretrinas, (DOS S. MELO *et al.*, 2008). É considerada, comercialmente, um dos mais importantes inseticidas naturais, e destaca-se por

ser considerada de baixa toxicidade e segura para humanos, além de possuir grande espectro de atuação, nas mais diversas aplicações, desde sabões líquidos para tratamento de piolhos em humanos à eliminação de pragas em plantações de alimentos.

A fórmula química da permetrina é representada por seis ésteres, $C_{21}H_{20}Cl_2O_3$ e, em relação aos perigos de incêndio, é moderadamente combustível, sendo a temperatura de ignição instantânea $82,2^\circ C$ ($179,96^\circ F$). Na decomposição térmica, pode formar subprodutos tóxicos e, além disso, libera vapores que, quando misturados ao ar, podem queimar ou ser explosivos (DRAGNET® SFR TERMITICIDE/INSECTICIDE, 2007).

A isoparafina é um solvente orgânico obtido a partir do propileno petroquímico, utilizada como diluente substituto de solventes comuns, compatível com inúmeros componentes, inclusive com pesticidas. É considerada de baixa toxicidade, ecológica e, por passar por vários processos de refino, é menos prejudicial e agressiva ao meio ambiente.

Já a isoparafina líquida pode penetrar facilmente entre os tecidos da madeira e, por isso, pode ser empregada em soluções preventivas contra insetos xilófagos, além de não possuir odor forte, o que melhora o conforto do aplicador do produto inseticida²⁹. É por esses motivos que foi adotada como veículo no tratamento das madeiras da Matriz de Nossa Senhora da Conceição.

Segundo a Construtora Ambiental (2016), além do tratamento inseticida, foi aplicado também o betume no madeiramento imunizado³⁰ da Matriz, por pulverização, como também foi instalada manta termoacústica, em polietileno com filme aluminizado.

3.2.4 O comportamento da madeira quando submetida a altas temperaturas.

A madeira, por ser um material combustível sólido, à proporção que atinge altas temperaturas tem os principais componentes químicos da sua estrutura molecular degradados - celulose, hemicelulose e lignina -, prejudicando seu desempenho estrutural. A hemicelulose inflama em temperatura mais baixa, a celulose em temperatura mais alta e a lignina em mais alta ainda

²⁹ Consultado em: <https://solven.com.br/solvente-ecologico/uso-da-isoparafina-na-dedetizacao/>. Acesso em 13 de dez. de 2020.

³⁰ No diário de obra não é detalhada a concentração dos produtos utilizados no tratamento, nem mesmo o método de aplicação; há apenas em um relato indicando que o betume foi pulverizado em algumas peças.

(BABRAUSKAS, 2001). Essas alterações, que a madeira sofre, dependem da espécie, do teor de umidade, da temperatura, do tempo de exposição (DIETENBERGER e HASBURGH, 2016), das dimensões da peça, da forma das seções e da massa específica (ROCHA, 2014). Pelo fato de a madeira ser um material heterogêneo e diversificado, é necessário que sejam conhecidas as características e as propriedades físicas de cada espécie de madeira, para obter melhor emprego do material.

De acordo com Gonzaga (2006), a madeira possui defesas para evitar e retardar a ação do fogo e, ao contrário do que se imagina, possui combustão lenta e resiste bem ao calor. Almeida (2013) ressalta que a madeira pode ser responsável por propagar o fogo, porém ela suporta a ação dele durante um grande período, dependendo das suas características. Quando comparada a outros materiais diante de um incêndio, percebe-se que ela apresenta um bom desempenho, devido a uma camada de carvão que é formada na sua superfície e que age como isolante, já que o carvão possui condutibilidade térmica de 1/6 da madeira sã (PINTO, 2011). Essa camada de carvão protege a peça contra a radiação, as altas temperaturas e, conseqüentemente, a degradação. Segundo Pinto (2001), peças mais robustas de madeira (mais de 50mm de espessura) podem ter vantagens frente aos demais materiais, pois em um incêndio as temperaturas ultrapassam facilmente os 700°C, o que já representa perda da estabilidade estrutural para outros materiais, como o concreto e os metais, caso não estejam devidamente tratados contra incêndio. A seção transversal da peça vai influenciar na segurança da edificação, pois, quanto maior a espessura, maior será a seção resistente, já que a camada de carvão, embora sendo um isolante térmico, não possui resistência mecânica suficiente (PINTO, 2011).

Dietenberger e Hasburgh (2016) explicam que a profundidade da carbonização da madeira, formada ao longo do tempo, denomina-se espessura de carbonização. Nesse mesmo estudo, fala-se de um teste de exposição ao fogo ASTM E 119 padrão, explicando que em cerca de 2 minutos ocorre a ignição. A taxa de aprofundamento da carbonização de determinada madeira prossegue em 0,8mm/min durante 8 minutos após a ignição. A partir daí, o efeito isolante da camada de carvão se faz sentir, e a taxa de carbonização diminui para 0,6mm/min. Mas é preciso considerar que propriedades da madeira que variam entre espécies afetam a taxa de carbonização.

Portanto, a capacidade de carga da estrutura de madeira depende das dimensões da seção transversal da peça considerada. A taxa de carbonização da seção transversal é o principal

fator na resistência ao fogo (FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010). Pinto (2001) complementa que, com o aumento da temperatura, surgem esforços solicitantes termomecânicos que podem comprometer a estabilidade da peça.

Ao contrário, o uso de madeiras de pouca espessura não garante o mesmo comportamento, diante de altas temperaturas, que as peças de maiores seções, como é o caso dos revestimentos de pisos e forros em madeira. A espessura da madeira carbonizada, devido à ação do fogo, pode chegar a 2,4mm, considerando taxa de carbonização inicial de 0,8mm/min em madeiras secas de baixa densidade (PINTO, 2011), degradando por completo os elementos em madeira de espessuras delgadas.

A espessura da madeira também está relacionada à ignição sustentada da madeira, ou seja, a madeira continua a inflamar após a retirada da fonte de calor — a chama. Quando um pedaço fino de madeira é aceso em uma das suas extremidades, a queima pode continuar. No entanto, um pedaço mais espesso de madeira não irá sustentar a combustão sob as mesmas circunstâncias. A espessura máxima para uma queima autossustentada, considerando a ignição flamejante na parte inferior de uma peça vertical, é aproximadamente de 19mm. Na orientação horizontal, espécimes de 12mm de espessura são considerados muito espessos para queima autossustentada. Em testes realizados em inúmeros produtos de madeira, foi observado que nenhuma ignição ocorre em peças com espessuras de 10 a 21mm. Quando a superfície da madeira é exposta a uma chama por 30s, a ignição raramente acontece e nunca se estende a 150mm, mesmo com amostras mais finas, de 2mm, por exemplo (BABRAUSKAS, 2002)

Além da espessura da madeira, o estado de conservação também interfere na sua resposta ao fogo. Quando a madeira, exposta a intempéries, é acometida por radiação solar, por exemplo, os raios infravermelhos podem penetrar profundamente nela, aquecendo-a, e causar a evaporação de extrativos, provocando o aparecimento de fendas (GONZAGA 2006). Essas fendas podem facilitar o acesso do calor ao interior da madeira, em caso de incêndio, e degradar a parte mais interna, que poderia estar protegida pela camada de carvão, caso possuísse integridade da superfície. Da mesma maneira, acontece com o ataque de insetos xilófagos, que deterioram o interior da madeira, diminuindo a área sã e facilitando a ação do fogo.

Segundo Pinto (2001), somente em casos especiais a madeira entra em combustão diretamente. Para o IPT (1986) *apud* Pinto (2001, p. 36), isto pode ocorrer quando a superfície sofrer irradiação de calor muito intensa, ou quando o pó de madeira seca estiver suspenso no ar, em proporção que garanta a presença de oxigênio suficiente para sua combustão.

Dietenberger e Hasburgh (2016), descrevem que, em temperaturas superiores a 100°C, várias ligações químicas começam a ser quebradas, iniciando-se a degradação da estrutura da madeira — pirólise da madeira. De acordo com Pinto (2001), existem quatro fases da degradação térmica (Figura 3-48). São elas: pirólise lenta, pirólise rápida, combustão flamejante e combustão incandescente.

A pirólise lenta (Figura 3-48b) ocorre quando a madeira, aquecida lenta e constantemente, abaixo de 200°C, libera vapor d'água, gases e perde massa. Os gases liberados durante esse processo são predominantemente dióxido de carbono (CO₂), H₂O e traços de ácidos orgânicos. Esse processo primeiramente é endotérmico (PINTO, 2001).

No processo da pirólise rápida (Figura 3-48c), que ocorre em temperaturas que variam entre 260 e 360°C, gases inflamáveis, como monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido acético, alcatrões, entre outros, são liberados. A pirólise completa da madeira tem como resíduo o carvão vegetal. Entre 400 e 500°C ocorre a carbonização completa (PINTO, 2001).

Na terceira fase, que é a combustão flamejante (Figura 3-48d), os gases inflamáveis, liberados da fase anterior, reagem com o oxigênio. A ignição da madeira é, nesse caso, visual e sustentada, indicando que a combustão é alimentada pela pirólise da madeira. Segundo Pinto (2001, p.39):

“A ignição de gases inflamáveis ocorre conforme a temperatura aumenta. O ar circundante interfere na temperatura mínima de ignição, pelo processo exotérmico associado à decomposição por pirólise.”

É necessário que haja calor suficiente da chama na madeira, para que a combustão continue. A camada de carvão, que foi recém-formada, possui efeito isolante para as camadas subjacentes, retardando o tempo necessário para que a madeira atinja temperaturas de pirólise exotérmica.

A quarta fase, conhecida como combustão incandescente (Figura 3-48e), caracteriza-se pela incandescência do carvão sólido residual aquecido, que emite luminosidade, fazendo a chama desaparecer. Nessa fase, o calor total produzido é suficiente para manter o carbono da superfície variando de 600°C a 700°C (PINTO, 2001).

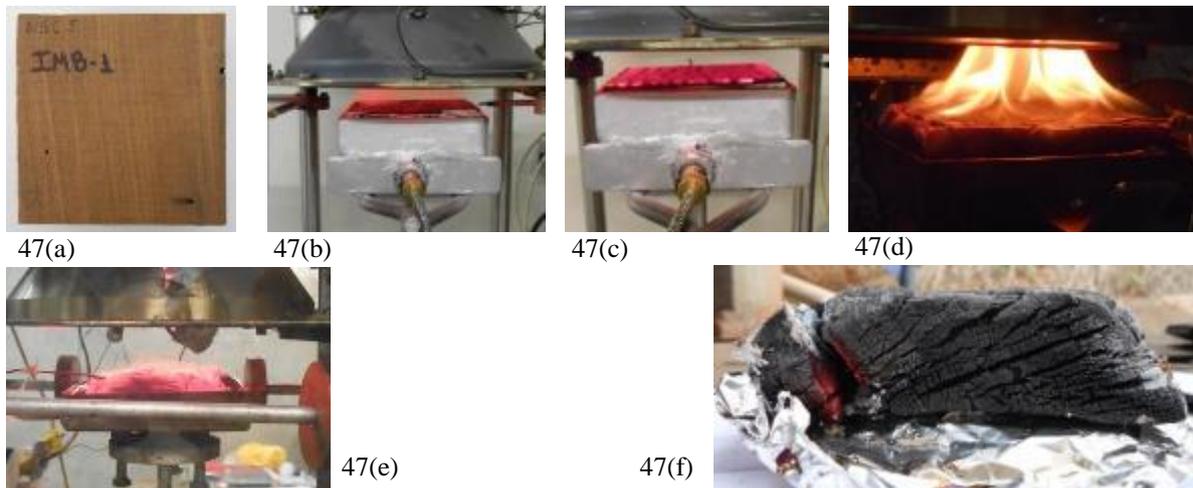


Figura 3-48: Fases da queima da madeira. 47(a) Madeira sã. 47(b) Pirólise lenta. 47(c) Pirólise rápida. 47(d) Combustão flamejante. 47(e) Combustão incandescente. 47(f) Madeira queimada, em resfriamento, ainda incandescente. Fonte: arquivo pessoal.

A combustão da madeira está associada a maior ou menor quantidade de fumaça. Materiais que liberam sua energia potencial relativamente rápido, devido à oxidação dos gases e vapores voláteis produzidos pela pirólise, incluindo fumaça e gases tóxicos, são mais perigosos do que aqueles que a liberam mais lentamente (FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010), como é o caso da madeira.

A posição dos tecidos da madeira, em relação à radiação de calor, também tem influência no comportamento da madeira em uma combustão. Almeida (2013) realizou simulações de incêndio utilizando corpos de prova em determinadas temperaturas: 20°C, 80°C, 120°C, 160°C, 200°C e 240°C. Foi verificado que esta sequência de temperaturas é bastante para mostrar a progressão da desorganização da estrutura anatômica da madeira, através de fotomicrografias. Os primeiros sintomas da ação do fogo deram-se ao nível dos raios

parenquimáticos³¹, criando espaços e levando a uma desorganização celular, permitindo uma maior ação do fogo, o que pode ser observado a partir de 80°C. Microscopicamente, os elementos de vaso com maior diâmetro favorecem a permeabilidade do oxigênio, tornando-os mais vulneráveis às altas temperaturas, com o agravamento da ruptura dos vasos. “O calor penetra, deste modo, com maior rapidez, impactando e desconfigurando a anatomia original da madeira” (ALMEIDA, 2013, p.20).

Certamente essas alterações provocadas no lenho refletem-se nas propriedades físicas, como a densidade, e nas propriedades mecânicas da madeira. Com relação à resistência mecânica à compressão paralela às fibras, e às demais propriedades físicas, após o aumento da temperatura, Almeida (2013) coloca que foram observadas reduções, com uma maior declividade para a resistência. E teve-se como conclusão o seguinte:

Conforme ocorre o aquecimento, a densidade diminui devido à desidratação e degradação de compostos. A resistência mecânica a partir de 100°C é reduzida e pode ser relacionada à estrutura anatômica: primeiramente pelo surgimento de fendas radiais ocasionadas por rupturas do raio parenquimático, levando a cisalhamentos e rachaduras pela progressiva lesão e desconfiguração do tecido da madeira. Na temperatura de 100°C ocorre o ponto máximo da resistência, fato que até o momento não está elucidado, e a partir dessa temperatura até 240°C há redução da resistência mecânica de 42,9%. (ALMEIDA, 2013, p.22)

De outro modo, Carrasco *et al.* (2016) avaliaram a influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos, seguindo os procedimentos da NBR 7190/1997, e chegaram à conclusão de que, com o aumento da temperatura, há uma diminuição linear no teor de umidade da madeira, até 160°C. Após essa temperatura, a madeira perde até 20% da massa (material orgânico), quando atinge 240°C. A massa específica permanece constante até 100°C, e a resistência à compressão paralela às fibras aumenta linearmente e, após essa temperatura “o comportamento se inverte com decréscimo linear até a temperatura de 180°C” (p.389). A 240°C, a resistência é 32% menor que à temperatura de 20°C. Já o modo de elasticidade diminui linearmente, com o aumento da temperatura até os 240°C.

³¹ Os raios parenquimáticos, de acordo com IPT (2007) “são feixes de células alongados, formados por células dispostas horizontalmente, orientados do centro para a periferia da árvore” (p.16), e atuam na condução de seiva do centro da árvore para a casca.

3.3 Investigação das propriedades de combustão da madeira em calorímetro cônico

Entender como ocorre a transferência de energia e calor entre um corpo sólido em combustão e um fluxo gasoso, e o conseqüente aumento de temperatura, são de grande importância, por exemplo, na detecção de incêndio nas edificações e na avaliação do desempenho de uma barreira contra incêndio (BABRAUSKAS, 2002).

Como descrito no capítulo anterior, a madeira, assim como outros materiais, quando exposta ao calor, sofre pirólise. Nesse processo, o material se aquece, degrada, inflama e queima, através de numerosos fenômenos físicos e reações químicas complexas e em diferentes regimes de temperatura. Modelar matematicamente a pirólise de um material pode ser uma tarefa extremamente difícil e, por isso, para a determinação de propriedades de combustão, ensaios são o meio preferido (BABRAUSKAS, 2002).

Variáveis de interesse da Engenharia de Incêndio são vistas como propriedades de reação ao fogo dos materiais. Essa é uma visão útil, mas deve-se ter em mente que tais "propriedades" não são definidas apenas pela natureza físico-química da substância. Em vez disso, elas também são determinadas pelas condições de exposição ao calor. É assim que a intensidade da radiação incidente sobre uma peça, e a orientação das fibras em relação à radiação incidente influem na medição dessas propriedades.

Propriedades de comportamento ao fogo dos materiais são fundamentais para entender o modo de produção de calor e, por conseguinte, possibilitar o modelamento do incêndio. Nesse trabalho, as propriedades pesquisadas são descritas a seguir.

a) Taxa de Liberação de Calor ou potencia de incêndio (HRR)

Segundo Babrauskas (2002), a principal propriedade que pode descrever quantitativamente o calor produzido pelos materiais no ambiente em um incêndio, e que responde à pergunta “qual o tamanho do fogo?”, é a taxa de liberação de calor (HRR — Heat Release Rate). Ela pode ser considerada o parâmetro mais importante. É a variável primária que determina a contribuição dos materiais para o perigo de incêndio no compartimento.

Conceitualmente, HRR é a taxa na qual as reações de combustão produzem calor, em razão de um determinado tempo e em função da unidade de massa de O₂, consumido no processo.

Janssens (2002) observa que existem várias razões pelas quais a taxa de liberação de calor é tão importante: ela está diretamente relacionada à taxa de perda de massa e ao risco de liberação de material tóxico em um incêndio. Ele cita, como exemplo, que vários produtos retardadores de chamas podem aumentar a emissão de gases tóxicos, porém, reduzem a taxa de perda de massa, resultando em menor risco de incêndio.

b) Quantidade Total de Calor liberado – THR (Total Heat Release)

É a quantidade de calor que uma unidade de massa do corpo libera em ensaio em calorímetro cônico sob a ação de uma determinada radiação incidente (kW/m^2) e em uma determinada posição (paralela ou perpendicular às fibras). É obtida pela integração no tempo da taxa de liberação de calor instantânea dividida pela massa do corpo de prova.

THR pode ser medido do início de ignição até a extinção das chamas, mas também são de interesse as medidas feitas em instantes notáveis a partir do início de ignição como 180s, 360s e 1200s.

c) Tempo de ignição - t_{ig}

É o tempo necessário para que um material entre em ignição com chama visível sob a ação de uma determinada radiação incidente e em posição paralela ou perpendicular às fibras.

Essa grandeza é importante no modelamento de incêndio, uma vez que, em um dado cenário de interesse, identifica-se o objeto que inicia o incêndio e, a partir da sua posição, pode-se estimar a intensidade da radiação incidente no seu entorno. O t_{ig} medirá, portanto, o tempo em que se espera o início de ignição nos diversos materiais do ambiente.

d) Temperatura de ignição: T_{ig}

Babrauskas (2001) afirma que a temperatura de ignição (T_{ig}) é aquela em que determinada superfície de um objeto se inflama. Nos ensaios, utiliza-se um termopar localizado na superfície de uma amostra, para registrar o momento da inflamação e a temperatura correspondente. É fundamental conhecer também o fluxo de calor incidente no momento da ignição, a temperatura na superfície do corpo de prova no início de ignição (T_{igcp}), a temperatura da superfície da fonte de calor no momento de início da ignição (T_{igcon}) e o tempo medido para o início de ignição (t_{ig}).

e) Taxa de perda de massa - \dot{m}

A taxa de perda de massa (g/s) é quantidade de massa que o material perde durante a combustão, em um determinado intervalo de tempo. Segundo Rocha (2014), ela pode ser medida para qualquer intervalo de tempo durante um teste, e esse intervalo pode ser determinado pelo investigador. Naturalmente, \dot{m} se relaciona a **THR** em um dado intervalo de tempo.

Existem duas maneiras básicas de experimentação sobre essas propriedades de comportamento dos materiais em incêndio. A primeira delas consiste na avaliação experimental em escala real, o que requer vários testes abrangendo todas as condições necessárias de uso e de risco de incêndio reais. A segunda opção é a utilização de amostras em escala para teste em equipamento de bancada, junto a procedimentos de cálculo para estimar o desempenho do material e do fogo em escala real. Certamente, essa última é consideravelmente mais versátil e eficiente em termos de precisão, custo, tempo e possibilidade de materiais testados (BABRAUSKAS, 2002).

Na avaliação de risco de incêndio em um compartimento, há a necessidade de dados de alta qualidade da taxa de liberação de calor e, conseqüentemente, de dispositivos e métodos para medi-la com precisão (JANSSENS, 2002). Na década de 1980, Vytenis Babrauskas e equipe desenvolveram, no National Institute of Standards and Technology – NIST / USA, o calorímetro cônico para testes de materiais a incêndio, especialmente com o objetivo de medir diretamente a taxa de liberação de calor (HRR) e a taxa de perda de massa (\dot{m}) e, também, o calor efetivo de combustão, a inflamabilidade, a análise de gases e a quantidade de fumaça e fuligem produzidas. É atualmente o aparelho para medição de liberação de calor em escala de bancada mais comumente usado (JANSSENS, 2002). Os testes e o aparato do equipamento são normatizados pela norma ASTM E1354–17 “Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption (Método Padrão de Medidas das Taxas de Liberação de Calor e de Fumaça para Materiais e Produtos Empregando-se um Calorímetro de Consumo de Oxigênio).

No calorímetro cônico, a medição da taxa de liberação de calor é determinada pelo método de consumo de oxigênio, e a taxa de fluxo de gases no duto de exaustão é medida a partir da queda de pressão e da temperatura em uma placa de orifício no ducto. A configuração padrão é aberta, com livre acesso de ar à região de combustão. (JANSSENS, 2002). As componentes

principais do equipamento e suas respectivas funções, segundo a ASTM E1354-17, estão descritas a seguir (figura 3-49).

- (i) **Aquecedor Cônico:** o aquecedor deve ser revestido, do lado de fora, com um cone de aço inoxidável de parede dupla e revestido com um material refratário. No lado interno do cone, ficam a resistência elétrica que deve ser capaz de produzir irradiâncias uniformes na superfície da amostra de até 100 kW/m². A irradiância do aquecedor deve ser capaz de se manter em um nível predefinido, por meio de um controlador de temperatura e termopares.
- (ii) **Sistema de Exaustão:** deve ter um exaustor centrífugo de alta temperatura, dutos de entrada e exaustão para o ventilador, um fluxômetro de placa de orifício e medidores de temperatura e pressão. O sistema de exaustão deve ser capaz de desenvolver fluxos de 0,012 a 0,035m³.
- (iii) **Célula de carga (balança):** deve estar localizada abaixo da amostra, como mostrado no esquema abaixo (figura 3-48) A célula deve ter uma precisão de 0,1g e deve ter uma faixa de pesagem total de pelo menos 3,5kg.
- (iv) **Porta-amostra (cadinho):** deve ser feito de metal fundido resistente às altas temperaturas. A parte inferior do porta-amostra deve ser revestido com uma camada de baixa densidade (densidade nominal 65 kg/m³) de manta de fibra refratária, com espessura de pelo menos 13mm. A distância entre a superfície inferior do aquecedor de cone e a parte superior da amostra deve ser ajustada entre 25mm e 60mm, dependendo da reação do material na combustão. Isso é realizado usando o ajuste de altura do cone deslizante. A amostra de material deve ter dimensões da superfície exposta de 100mm x 100mm e espessura de até 50mm, conforme ISO-5560-1 (2015).

Além dos componentes acima, o calorímetro cônico ainda deve possuir: medidor de fluxo de calor capaz de medir até 100kw/m²; controlador de temperatura, com faixa de entrada de 0°C a 1000°C; elemento de proteção de radiação, para evitar a exposição do espécime ao fluxo de calor inicial - antes de inicializar um teste - feito com material não combustível e espessura total não maior que 12 mm, revestido na cor preto fosco; ignitor com descarga de 10kv; regulador de ignição, para medir o tempo de chama sustentada com precisão de 1s; analisador de gases; sistema de medição de obscuração de fumaça; calibrador de taxa de liberação de calor; filtros de calibração ótica e um sistema de coleta de dados (ASTM,2017).

Em geral, o calorímetro cônico deve ser capaz de atingir irradiância adequadamente alta e uniforme, em toda a face exposta da amostra do material, e ser projetado de modo a não alterar sua irradiância durante o teste. O aquecimento convectivo deve ser relativamente pequeno, visto que uma melhor uniformidade também pode ser esperada em condições nas quais o componente convectivo é minimizado (BABRAUSKAS, 2002).

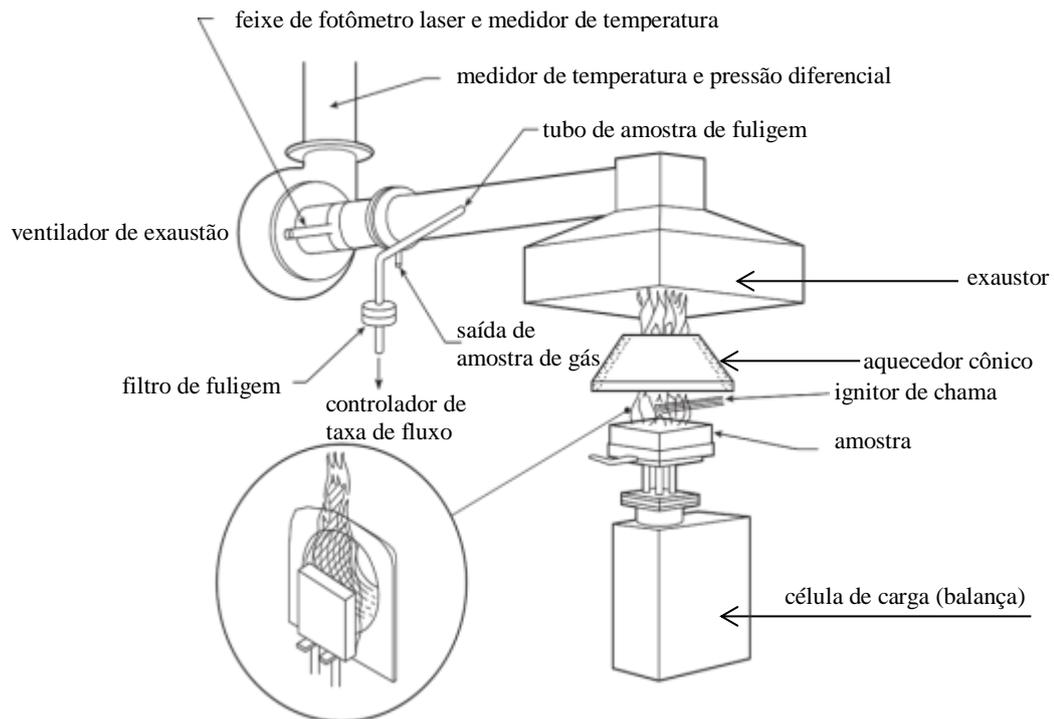


Figura 3-49: Representação do calorímetro cônico, e seus componentes. Fonte: BABRAUSKAS, 2020, p.4 (tradução da autora).

3.3.1 Investigações publicadas sobre a combustão da madeira em calorímetro cônico

Para muitos materiais e produtos, os dados sobre as propriedades e o comportamento de incêndios, incluindo a taxa de liberação de calor, não estão disponíveis; portanto ainda há muito a ser pesquisado. Para outros tantos produtos, dados sobre a resposta de seus materiais ao fogo foram publicados e estão disponíveis ao público. Os dados de teste tabulados podem ser muito úteis como representantes genéricos desses materiais e dos objetos construídos com eles (BABRAUSKAS, 2002).

Desde o desenvolvimento do calorímetro cônico, numerosos trabalhos sobre o comportamento de diversas madeiras em altas temperaturas têm sido publicados, como artigos, dissertações e teses. Portanto, aqui não se pretende fazer uma revisão completa.

Foram selecionados alguns estudos considerados relevantes, contendo dados de propriedades das madeiras, tratadas ou não, para uma breve revisão dos trabalhos.

Um dos trabalhos representativos da utilização do calorímetro cônico na investigação das propriedades da madeira em altas temperaturas é a tese de Spearpoint (1999), que comparou medidas sobre a ignição e a taxa de liberação de calor de quatro espécies de madeira em um calorímetro cônico. As amostras de 50mm de espessura foram expostas a um fluxo de calor de 75kW/m², tanto na posição paralela quanto na perpendicular às fibras.

Para uma análise teórica comparativa, Spearpoint (1999) utilizou um modelo integral unidimensional. Esse modelo utiliza a integração da equação diferencial que expressa a troca de calor entre a chama da fonte, a chama instalada no corpo de prova e a penetração do calor nele.

Spearpoint concluiu que o fluxo radiante suficiente para a madeira causar a ignição inicial (radiação crítica), depende da espécie, da orientação das fibras, do teor de umidade, das condições de exposição ao calor e das variáveis próprias da madeira, tendo sido 10kW/m² o menor valor encontrado. Outra conclusão importante é que o modelo integral gera para o tempo de ignição valores próximos dos observados experimentalmente, no caso de fluxos de calor maiores que 20kW/m².

A influência da posição das fibras da madeira e da intensidade do fluxo incidente de calor também foi analisada por Harada (2001). Foram testadas nove espécies distintas de madeira, entre as de fibra longa e folhosas, com espessuras das amostras de 10, 20 e 40mm, e submetidas a níveis de irradiância de 20, 25, 30, 40 e 50 kW/m². O trabalho confirma a conclusão de Spearpoint (1999), quando afirma que combustibilidade da madeira seca é afetada pela espécie, densidade do espécime, dimensões da amostra, orientação das fibras e condições de aquecimento.

Harada (2001) explica que a densidade é o fator com maior influência sobre a resposta da madeira a altas temperaturas, porque a condutividade térmica e a capacidade de absorção do calor dependem da densidade do espécime. Diante dos resultados obtidos nos testes, o autor concluiu que quanto maior a densidade, maior o tempo para a madeira entrar em ignição e maior a taxa de perda de massa. A condutividade térmica depende também da posição das fibras em relação ao fluxo de calor. Para a direção paralela às fibras, a condutividade térmica é duas vezes maior que na direção ortogonal, para espécies de densidade aparentemente

iguais, afetando as condições de combustibilidade. Tanto o tempo necessário para a ignição quanto a taxa de perda de massa foram aumentados com a superfície orientada transversalmente em relação às superfícies radiais e tangenciais

Alguns estudos relatam a combustão da madeira, quando utilizadas substâncias retardadoras de chamas. Grexa e Lubke (2001), Terzi *et al.* (2009), Jin *et al.* (2020) investigaram o efeito dessas substâncias com irradiância de 50kW/m², em calorímetro cônico. Terzi *et al.* (2009) acrescentaram no teste o uso do acendedor de faísca elétrica, acima da amostra, até o aparecimento da chama sustentada.

Grexa e Lubke (2001) estudaram o efeito de três diferentes tipos de retardadores de chamas, incorporados ao adesivo de placas de aglomerado de madeira, em corpos de prova de 100mm x 100mm x 17mm: hidróxido de magnésio combinado, calculado em 24% sobre o peso das partículas de madeira seca; fosfato de monoamônio, com teor total de 25% sobre partícula seca; combinação de fosfato de monoamônio, (20% do peso de partícula seca) e ácido bórico (5% do peso de partícula seca). A irradiância aplicada sobre a superfície foi de 50 kW/m², para a medição da taxa de liberação de calor. Como resultado da pesquisa, foi verificado que o aumento da absorção de retardadores de chamas tem uma influência significativa sobre a redução da taxa de liberação de calor, como também no incremento do tempo para o início da ignição. Mesmo que o tempo de queima tenha sido mais longo para os espécimes tratados, a taxa de perda de massa foi sistematicamente diminuindo com o aumento da quantidade de retardante de chamas, como também o total da perda de massa.

Em relação à liberação de gases tóxicos, no caso dos painéis contendo hidróxido de magnésio, o rendimento médio de monóxido de carbono foi menor do que os não tratados, confirmando o fato de que o Mg(OH)₂ não aumenta a formação de monóxido de carbono tóxico, em comparação com os aglomerados não tratados. Grexa e Lubke (2001) concluíram, ao final da pesquisa, que o aumento da quantidade de hidróxido de magnésio melhora o comportamento geral do aglomerado ao fogo e, entre os diferentes produtos químicos retardadores de chama, a combinação mais eficaz foi a de fosfato monoamônico e ácido bórico.

Jin *et al.* (2020) testaram a madeira do cipreste, tratada com retardador de chama — um composto de óxido metálico, silicato metálico e água —, quanto às propriedades de combustão, especialmente quanto às propriedade ligadas ao risco de incêndio e à produção de fumaça. O fluxo de calor externo foi mantido em 50kW/m². Os retardadores de chama e o

composto de silício foram dispersos em uma concentração de 20%, durante 24 horas, usando um agitador magnético. A conclusão é que o índice de desempenho ao fogo — quantidade de área superficial da madeira necessária para absorver uma unidade de energia — da mistura de sílica foi de 0,1021–0,5301m²s/kW, que foi 3 a 16 vezes superior ao da amostra não revestida. A mistura de sílica e os óxidos apresentam menores riscos de incêndios, porque a temperatura de pirólise foi elevada, o tempo para a ignição foi atrasado, e a taxa de liberação de calor diminuída, se comparados às amostras não tratadas, tendo a mistura de sílica apresentado melhor desempenho. As misturas de silício aumentaram a segurança térmica e reduziram a produção de fumaça, sendo a concentração máxima de monóxido de carbono suprimida em 24% e 67%, em comparação com a amostra não revestida. Uma avaliação abrangente do desempenho ao fogo mostrou que os retardadores de chama diminuem os riscos de incêndio, fumaça e toxicidade de CO.

Terzi *et al.* (2009) e Marney *et al.* (2008) comparam a resposta ao fogo de madeiras tratadas com a associação de biocidas e retardante de chamas. Terzi *et al.* (2009) utilizaram compostos de amônia quaternária (DDAC) e tetrafluoroborato de didecil dimetil amônio (DBF), para comparar o desempenho ao fogo de madeira maciça e de madeira compensada tratadas, sem o tratamento fungicida e com amostras protegidas com retardadores de chamas comuns, como o fosfato de monoamônio (MAP), fosfato de diamônio (DAP) e sulfato de amônio (AS), em soluções aquosas de 1% a 4%, aplicados à vácuo. Grexa e Lubke (2001), mencionados acima, utilizaram somente os dois últimos (DAP e AS) em seus estudos. Como esperado, e também confirmando as conclusões dos pesquisadores anteriores, os produtos químicos retardadores de fogo mostraram melhor desempenho do que o preservativo de madeira DDAC e o DBF. As taxas de liberação de calor das amostras tratadas com MAP, DAP e AS foram menores do que as de amostras tratadas com DDAC e DBF, e do que as de amostras não tratadas. As taxas mais altas de liberação de calor foram observadas para os espécimes tratados com os compostos por quaternário de amônia, DDAC e DBF. Os valores do índice de propagação de chamas para DDAC e DBF foram iguais a ou maiores do que para as amostras não tratadas. Quanto mais altos os níveis de concentração de MAP, DAP e AS, menor foi a contribuição inicial na liberação de calor. Por outro lado, DBF e DDAC forneceram proteção contra a degradação de fungos em espécimes sólidos e compensados, porém os produtos químicos retardadores de fogo, usados no estudo, não foram capazes de proteger a madeira de fungos apodrecedores. Quando combinados, os retardadores de chama e os preservativos de madeira

podem ser benéficos, para se obter melhor desempenho tanto em relação ao fogo quanto na eliminação de fungos.

Marney *et al.* (2008), investigaram o comportamento ao fogo do Pinus (*P. radiata*), tratado com retardantes de chamas (compostos à base de boro, fósforo, retardantes clorados e álcool tribromoneopentílico), associados ao biocida óleo de naftenato de cobre co-formulado com permetrina – CuN, a 6%, e, ao invés da uma radiação incidente de 50kW/m², adotou a radiância de 25kW/m². Os autores avaliaram que todas as combinações de tratamento CuN, com retardadores de chamas, reduziram o tempo de ignição, devido à reação dessas combinações de aditivos, com os componentes específicos da madeira (reações de degradação) em temperaturas mais baixas, e a taxa de crescimento do fogo foi reduzida em mais de 15% em alguns casos. Um resultado interessante é que, além da utilização do preservativo associado aos retardadores de chamas ser benéfica, para se obter melhor desempenho tanto em relação ao fogo quanto como biocida, os tratamentos retardadores de fogo, na ausência do preservativo, também proporcionaram algum nível de resistência ao apodrecimento e ao controle de cupins.

Na arquitetura brasileira, seja ela pertencente ao patrimônio cultural ou às edificações contemporâneas, são empregadas madeiras exóticas, mas muitas são procedentes das espécies nativas. Assim, pesquisas que abordam o comportamento ao fogo das madeiras brasileiras são essenciais. Dentre os trabalhos que têm como foco essas madeiras, Castro (2005) realizou uma análise experimental e teórico-numérica das características de combustão das madeiras Pinho (*Pinus elliot*), Ipê-branco (*Tabebuia roseo-alba*), Embaúba (*Cecropia pachystachya*) e Eucalipto (*Eucalyptus citriodora*), em amostras cilíndricas (30mm de diâmetro e 100mm de altura) e em placas (100mm x 100mm x 50mm), em diferentes porcentagens de umidade (secas e a 20%, 40%, 60%, 80 e 110% de umidade). Os calorímetros cônico e cilíndrico foram montados para a realização desses testes, sendo o calorímetro cônico o mesmo utilizado nesta dissertação. No trabalho foram analisados os efeitos da queima nas amostras em relação à orientação das fibras, a evolução da perda de massa, as taxas de consumo total e o percentual instantâneo, o tempo de ignição, os tempos do fim de pirolise e do fim de chama, as emissões de gases, a concentração de O₂ e a temperatura de exaustão. Após as análises dos dados coletados, Castro (2005), chegou às conclusões seguintes.

- (i) Na evolução da perda de massas das amostras, com orientação da incidência de calor paralela às fibras, as curvas apresentaram pequena dispersão, mas as taxas

de perda de massa aumentam com o aumento do teor de umidade. Essa dispersão não foi verificada nas ensaiadas com a orientação da incidência de calor perpendicular às fibras.

- (ii) A presença de umidade influencia todas as fases da queima de amostras de madeira, aquecidas a uma taxa constante. O teor de umidade reduz as taxas de liberação de voláteis, porém não afeta as massas e as taxas de consumo durante a fase de incandescência.
- (iii) A orientação das fibras das amostras influencia as taxas de liberação de voláteis durante o período de pirólise, sendo a taxa maior para as amostras com incidência do fluxo de calor paralela ao sentido das fibras. Tal observação pode estar associada às diferentes condutividades térmicas que a madeira apresenta em função da orientação das fibras.
- (iv) O tempo médio, até o fim de pirólise, também é diferente para as orientações das fibras, sendo que para a orientação perpendicular (3100s) foi 15% maior que para a paralela (2700s). Os perfis de temperaturas medidas dentro das amostras também foram diferentes, devido às diferenças de condutividade e permeabilidade para as diferentes orientações de grãos. A temperatura de incandescência, no entanto, foi praticamente igual, em torno de 750°C.

Landesmann e Rocha (2014) também testaram a Imbuia (*Ocotea porosa*), dentre outras madeiras brasileiras e exóticas, em calorímetro de perda de massa, com o objetivo de investigar as características de combustão. Embora esses resultados não sejam diretamente comparáveis aos encontrados nessa pesquisa, eles são mencionados pela sua extensão. Ao todo, foram testadas 12 espécies distintas, sob um fluxo de calor de 50 kW/m², com orientação das fibras em um plano ortogonal à incidência do fluxo. O artigo explora a possibilidade de vincular as propriedades de combustão, obtidas com a densidade e classes e espécies das madeiras selecionadas³². Como resultado, os valores da taxa de liberação de calor (HRR) variaram entre 84 a 165,9kW/m² e de 62,8 a 158,7kW/m² para madeiras macias e duras, respectivamente, sendo os valores máximos de pico observados na madeira Pimenteira

³² As demais espécies testadas foram: boleira (*Joannesia princeps*), canafístula (*Peltophorum dubium*), cabreúva (*Myrocarpus frondosus*), cera cozida (*Zanthoxylum chiloperone*), cedrilho (*Cedrela lilloi*), cipreste português (*Cupressus lusitânica*), guapuruvú (*Schizolobium parahyba*), guaviróva (*Campomanesia xanthocarp*), pinus caribaea (*Pinus caribaea*), pinus hondurensis (*Pinus caribaea var. hondurensis*), pimenteira (*Capsicodendron dinisii*) (LANDESMANN E ROCHA, 2014).

(*Capsicodendron dinisii*), em 41s de teste, e *Pinus hondurensis* (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*), em 51s de teste.

Segundo esses pesquisadores, a tendência geral é que o pico da taxa de liberação de calor aumente à medida que a densidade da amostra de madeira também aumenta. A taxa de perda de massa independe da classe e densidade da madeira, aproximadamente iguais a 70%. O tempo de queima das madeiras varia entre as madeiras macias e as madeiras duras, assim como não há correlação entre os valores do calor efetivo médio de combustão entre as espécies.

Em relação ao t_{ig} (tempo início de ignição), observaram que há relação entre a densidade e a temperatura da superfície imediatamente antes da ignição. Especificamente para a Imbuia (*Ocotea porosa*) *in natura*, Rocha (2014) encontrou os seguintes resultados: densidade entre 0,58 e 0,62g/cm³; taxa média de liberação de calor, entre 64,11kW/m² e 83,73 11kW/m²; calor total de combustão entre 97,9 e 120,6MJ/m² e o calor efetivo de combustão entre 8,66MJ/kg e 12,95MJ/kg; temperatura de ignição entre 314°C e 375°C, sendo o tempo de ignição entre 33s e 58s; e, por fim, a quantidade total de massa perdida entre 66% e 71%, sendo a taxa de perda de massa de 0,05% .

No II Congresso Nacional Para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural, em 2019, Dias *et al.* (2019), apresentaram o trabalho em que avaliaram o comportamento à combustão da madeira Camboatá (*Cupania vernalis*), madeira antiga também descartada durante a obra de conservação e restauro da Matriz de Nossa Senhora da Conceição, em corpos de prova de 100mm x 10mm x 20mm, tratada com querosene e sem o tratamento. A aplicação da substância foi feita por pincelamento. As amostras foram submetidas a um fluxo de calor de 50kW/m². Como conclusão, Dias *et al.* (2019) verificaram que o tempo de ignição dos espécimes tratados apresentou uma redução de 16,22%. Porém, no tempo necessário para atingir o pico de liberação de calor, o pico de liberação de calor e o calor total liberado em 300 segundos, não foram observadas diferenças significativas entre as amostras, indicando que, para a Camboatá, o querosene não influencia de forma significativa as propriedades relacionadas à liberação de calor.

A pesquisa para a tese de Castanheira (2018) é a que mais se aproxima do objetivo da investigação proposta neste trabalho. Foi avaliada a reação ao fogo de nove espécies de madeiras brasileiras, comercialmente utilizadas na construção civil nos dias de hoje e, por

isto, muitas vezes empregadas na substituição de peças antigas, deterioradas no patrimônio cultural edificado, que não cumprem mais a função original. Foi realizada a comparação da reação à combustão das amostras não tratadas, e as madeiras tratadas com solução do inseticida fipronil em querosene em concentrações em volume de 5% e 10%.

Os testes foram realizados em um calorímetro de perda de massa do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ, onde foram medidas diretamente dos ensaios a temperatura de ignição, o tempo de ignição e a perda de massa. Com esses dados observados, foram calculadas a taxa de liberação de calor, a liberação de calor total, a perda de massa total e taxa de perda de massa, e o calor efetivo de combustão.

Castanheira (2018) chegou à conclusão de que o tempo para a ignição depende linearmente do peso específico para amostras não tratadas; no entanto, o tratamento com solução fipronil em querosene perturbou progressivamente essa dependência linear, sendo verificado que essa linearidade praticamente desaparece para amostras tratadas com soluções à concentração de 10%.

Observou-se ainda que a média das temperaturas de ignição das amostras tratadas é 13% menor em relação às amostras não tratadas, independente da concentração da solução de fipronil, e que a T_{ig} está linearmente relacionada aos tempos de ignição para todos os casos de tratamento.

No que se refere à taxa de liberação de calor, Castanheira (2018) percebeu que, quando amostras de 5% e 10% são comparadas com não tratadas, observa-se que os primeiros valores máximos de HRR crescem das amostras não tratadas para as tratadas com 5% e 10% de concentração do fipronil. Ela indica que este é um comportamento esperado, considerando que o tratamento utilizando a querosene deve aumentar a capacidade de calor das amostras de madeira. Já no segundo pico de HRR médio, as amostras com 10% têm um valor médio 42% maior do que as amostras não tratadas. O calor efetivo médio de combustão aumenta com tratamento de solução de querosene com fipronil na concentração de 10%, mas permanece praticamente inalterado com solução de querosene com fipronil a uma concentração de 5%, quando comparada com amostras não tratadas.

A taxa de perda massa das amostras aumentou com o tratamento de solução de querosene com fipronil na concentração de 10% e não foi conclusivo, quando o tratamento de 5% foi comparado com não tratadas. Segundo Castanheira (2018):

"os resultados indicam que geometria, densidade e dimensões dos poros e fibras devem ser consideradas para melhor explicar o comportamento da madeira, já que a influência do uso do fipronil, utilizado no tratamento contra a ação de insetos, na reação ao fogo, se mostrou bastante variável de acordo com a madeira utilizada" (p.67).

Nesta revisão, pode-se perceber o quanto ainda é escassa a literatura que trata da investigação sobre o desempenho das madeiras brasileiras ao fogo, principalmente as antigas, especialmente quando tratadas com preservativos contra os agentes de degradação, com substâncias protetivas contra esses agentes ou retardantes de chamas.

4 METODOLOGIA

4.1 Amostras: identificação, preparação, tratamento e caracterização

As amostras de madeiras, utilizadas neste trabalho, são peças que foram empregadas como mãos-francesas na estrutura do telhado do Santuário de Nossa Senhora da Conceição na cidade de Ouro Preto, MG. Durante a última obra de conservação e restauro arquitetônico, que aconteceu entre os anos de 2014 e 2016, essas peças foram descartadas, assim como outras peças do telhado, por não mais apresentarem qualidades suficientes para cumprir a função estrutural à qual foram destinadas. Elas foram cedidas pelo IPHAN e pela Diocese de Mariana.

As peças escolhidas como amostras apresentavam melhores condições de conservação, para a obtenção de 21 corpos de prova que fossem os mais íntegros possíveis, e que também pudessem representar condições reais de uma obra de restauro, em que as peças antigas em boa conservação são tratadas e permanecem na posição de origem. A peça nomeada como NCS5 (Figura 4-1, 4-3 e 4-4) tinha seção de 11,5cm x 10cm, e 2,20m de comprimento, e a peça nomeada como NSC8 (Figura 4-2) tinha seção de 10cm x 11cm, aproximadamente, e 2,13m de comprimento.



Figura 4-1: Peça inteira de imbuia (mão-francesa), NSC5, antes de ser cortada. Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 4-2: Peça inteira de imbuia (mão-francesa), NSC8, antes de ser cortada. Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 4-3: Extremidades da mão francesa NSC5. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 4-4: Uma das extremidades da mão-francesa NSC5. Fonte: arquivo pessoal.

As peças foram serradas em espécimes com dimensões aproximadas de 100 mm x 100mm x 30mm (comprimento x largura x espessura) (Figura 4-5). O corte foi realizado no sentido longitudinal das peças, e de modo que a radiação do calorímetro cônico incidisse perpendicularmente às fibras da madeira. Mesmo escolhendo as melhores peças, dentre as descartadas da obra, alguns corpos de prova apresentaram pequenos defeitos, decorrentes das galerias escavadas por insetos xilófagos. Cada espécime foi medido individualmente com um paquímetro, e suas dimensões anotadas em planilha.



Figura 4-5: Corpo de prova, nas dimensões de 100mm x 100mm x 30mm, com a presença de furos e galerias provocadas por insetos xilófagos. Fonte: arquivo pessoal.

Um dos espécimes foi enviado como amostra para o Departamento de Botânica da Universidade Federal de Minas Gerais, para a identificação da espécie. Por meio de análise macroscópica e microscópica, foi identificada como Imbuia ou Canela (nome popular dado a várias espécies do gênero *Ocotea*) espécie *Ocotea porosa*, da família *Lauraceae*, de acordo com o Laudo Técnico (VALE, 2016).

Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa (Figura 4-6), seguindo as normas ASTM D-4442-07 (2207) e NBR 7190 (ABNT,1997), à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. A cada período de 6 horas, todos os espécimes foram pesados em balança de precisão de duas casas decimais (Figura 4-7) e devolvidos novamente à estufa. A madeira foi considerada seca para o teste, e a umidade estabilizada, quando a variação de duas medições consecutivas foi menor ou igual a 0,5%. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em dessecador, até atingir a temperatura ambiente.

Após secas e imediatamente após atingirem a temperatura ambiente, os corpos de prova receberam o tratamento contra insetos xilófagos.



Figura 4-6: Estufa onde as amostras foram secas. Laboratório Pedologia e Análise Ambiental - CODAGEO, IFMG - Campus Ouro Preto. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 4-7: Balança de precisão do Laboratório de Solos - CODAEDI IFMG - Campus Ouro Preto – Fonte: arquivo pessoal.

4.1.1 Tratamento dos Corpos de Prova

A fim de reproduzir a prática comum no tratamento e proteção das madeiras contra os insetos xilófagos nas ações de manutenção e nas obras de conservação e restauro do patrimônio cultural edificado, optou-se por seguir o mesmo método realizado na última obra de conservação da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição, de Ouro Preto, MG.

Foi aplicado em 3 dos 21 corpo de prova o pesticida permetrina (Dagnet 348 CE), diluído em isoparafina, em solução a 1% em volume/volume. As instruções no rótulo do produto recomendam para o controle de cupim 260ml de solução de permetrina a 1% de volume para cada 10l total de calda aquosa (DRAGNET, 2017).

Considerando que a diluição a 10% é comum nos procedimentos de desinfestação de objetos e edificações do patrimônio cultural, como mencionado na seção 3.2.3, também foi utilizada esta dosagem em outras três amostras, com o objetivo de comparação dos efeitos destas quantidades de inseticida na resposta da madeira ao incêndio. Os produtos foram cedidos pela Construtora Ambiental, responsável pela execução da obra.

Além disso, a permetrina foi também diluída em água e em querosene, nas duas dosagens de 1% e 10%, em três amostras para cada solvente e cada dosagem, tendo em vista que o primeiro solvente é o indicado nas instruções de uso do fabricante (DRAGNET, 2017), e o segundo também já foi bastante utilizado nas desinfestações, tendo sido o motivador de incêndios e de consequentes perdas do patrimônio construído (Figura 4-8). Como amostras controle, três dos vinte e um corpos de prova não receberam qualquer tratamento.

A aplicação da mistura inseticida na Matriz foi realizada por pulverização. Porém, sendo as amostras de pequenas dimensões, preferiu-se o emprego de outro tratamento superficial, a técnica de pincelagem, em 3 demãos, como indicado por Grexa e Lubke (2001) e Rodrigues (2004). A cada demão, aguardava-se um tempo para a absorção do produto pela madeira. A manipulação do inseticida foi realizada dentro de uma capela de exaustão, do Laboratório de Pedologia e Análise Ambiental – CODAGEO- IFMG-Campus Ouro Preto (Figura 4-9), com todos os equipamentos de proteção individual (EPIs) exigidos.

O controle da absorção foi feito com a pesagem dos corpos de prova, imediatamente antes do pincelamento e imediatamente após a 3^a demão da mistura inseticida. Logo em seguida, foram envolvidos em plástico filme e acondicionados em caixa plástica, hermeticamente fechada, para evitar a absorção de umidade, até o momento dos testes no calorímetro cônico.

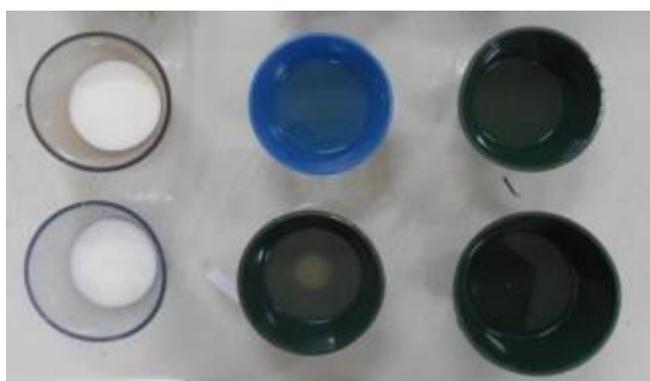


Figura 4-8: Da esquerda para a direita: mistura de permetrina com água, querosene e isoparafina.

Fonte: arquivo pessoal.



Figura 4-9: Madeiras tratadas na capela de exaustão do Laboratório de Pedologia e Análise Ambiental. Fonte: arquivo pessoal.

Os vinte e um corpos de prova foram nomeados da seguinte maneira:

UNT amostras não tratadas

A01 diluição em água a 1%

A10 Diluição em água a 10%

Q01 diluição em querosene a 1%

Q10 diluição em querosene a 10%

I01 diluição em isoparafina a 1%

I10 diluição em isoparafina a 10%

4.1.2 Caracterização das amostras: cálculo de umidade, porosidade e densidade aparente

Na caracterização das amostras, foram utilizados os dados das dimensões dos espécimes e dos pesos, coletados na preparação e tratamento dos corpos de prova, respectivamente, para o cálculo da área superficial, volume e densidade aparente. A densidade aparente de cada amostra foi calculada, dividindo a massa seca pelo volume correspondente. Tabela 4-1 mostra as propriedades geométricas e densidade aparente dos corpos de prova.

Tabela 4-1: Propriedades geométricas e densidade aparente dos corpos de prova.

Tipo do corpo de prova	Espe.	Área superf.	Massa original	Dens. aparente
	(mm)	(cm ²)	(g)	g/cm ³
UNT-1	3,0	91,03	243,63	0,903
UNT-2	3,0	90,80	249,06	0,916
UNT-3	3,0	91,17	243,95	0,901
A01-4	3,1	91,52	249,41	0,890
A01-5	3,0	91,55	248,65	0,891
A01-6	3,1	91,15	251,35	0,900
A10-7	3,0	91,20	252,50	0,935
A10-8	3,0	91,68	259,81	0,935
A10-9	3,0	91,22	253,13	0,941
Q01-10	3,0	91,65	254,90	0,933
Q01-11	3,0	92,45	262,52	0,953
Q0-12	2,9	92,18	249,97	0,938
Q10-13	3,1	92,40	262,66	0,932
Q10-14	3,1	91,68	265,44	0,937
Q10-15	3,0	91,51	263,22	0,949
I01-16	3,0	89,88	257,40	0,948
I01-17	3,1	92,81	268,41	0,944
I01-18	3,0	92,02	254,09	0,936
I10-19	2,9	92,32	246,57	0,935
I10-20	3,1	92,47	265,74	0,942
I10-21	3,2	90,80	275,63	0,949

Pode-se verificar que a densidade das amostras, calculada nesta pesquisa, está acima do que a bibliografia existente apresenta: 0,58g/cm³ a 0,62g/cm³, calculado por Rocha (2014); 0,65g/cm³ pelo IPT (1989); e 0,50g/cm³ por Marchesan (2006). Segundo Mendes (2004), a densidade da madeira pode variar entre as espécies, entre indivíduos, entre procedências diferentes de indivíduos da mesma espécie, e até mesmo dentro da própria árvore, tanto no sentido longitudinal, como no sentido transversal, radial da medula para a casca. Com estímulos de crescimento (irrigação controlada e controle de qualidade do solo), a árvore pode apresentar menor densidade do que as que não atingem maiores alturas. Estas variabilidades de densidade podem ser a justificativa para os valores encontrados acima.

A Tabela 4-2 mostra as propriedades físicas médias dos corpos de prova de cada tipo de tratamento, sendo M_o - a massa média no estado natural do corpo de prova; S_o - o desvio padrão das massas no estado natural; M_s - a massa seca média do corpo de prova; S_s - o desvio padrão das massas secas dos corpos de prova; U - umidade média dos corpos de prova; S_u - desvio-padrão das umidades dos corpos de prova; P - porosidade média dos corpos de prova; S_p - desvio-padrão das porosidades calculadas dos corpos de prova.

A umidade de cada amostra foi calculada pela equação:

$$U = \frac{M_o - M_s}{M_o} \times 100 \quad (4.1)$$

e a porosidade média da amostra foi calculada pela fórmula de McLean (1952):

$$P = [1 - \rho(0.667 + 0,01U)] \times 100 \quad (4.2)$$

Tabela 4-2: Propriedades físicas médias dos corpos de prova

Tipo do corpo de prova	M _o	S _o	M _s	S _s	U	S _u	P	S _p
	g	G	g	g	%	%	%	%
NT	245,55	3,04	217,94	1,78	12,7	0,7	28,0	1,2
A01	249,80	1,39	221,85	1,26	12,6	0,6	28,4	0,6
A10	255,15	4,05	227,06	3,21	12,4	0,2	25,9	0,2
Q01	255,80	6,32	218,20	5,25	17,2	1,4	21,0	2,1
Q10	263,77	1,47	223,48	1,17	18,0	0,7	20,4	1,3
I01	259,97	1,52	231,08	6,78	12,5	0,2	25,3	0,6
I10	262,64	14,77	222,91	12,81	17,8	0,3	20,4	0,6

4.2 Calorímetro Cônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Nesta pesquisa, foi utilizado o calorímetro cônico de consumo de oxigênio construído, testado e certificado no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão –LCP, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, conforme descrito por Castro (2005) e Gemaque (2012). Os testes e a metodologia dos testes em calorímetro cônico são padronizados pela norma ASTM E1354–17. O método é baseado na relação entre o calor de combustão e a quantidade de oxigênio necessária para a queima, sendo, para cada kg de O₂ consumido durante a combustão de hidrocarbonetos, aproximadamente 13,1×103kJ são liberados (GEMAQUE, 2012).

A bancada (Figura 4-10), onde o calorímetro cônico está instalado, é composta de instalações elétricas, coifa para a exaustão dos gases, ventilador centrífugo de indução da vazão dos gases através da coifa, controladores de potência elétrica, microcomputador para aquisição e registro de dados, banho de gelo e filtros para pré-tratamento dos gases de combustão, antes de entrarem no analisador, termopares e mostradores digitais de temperatura (CASTRO, 2012).

A conexão entre a coifa coletora dos gases da combustão e o duto horizontal de exaustão, de acordo com Gemaque (2021), possui uma placa com um orifício restritivo de 57,0mm de diâmetro (valor mandatório), que tem como principal objetivo promover a mistura dos gases provenientes da queima, como previsto na ASTM E1354–17.



Figura 4-10: Bancada com o calorímetro cônico, instalada no laboratório de ensaios de combustão do INPE/LCP.
Fonte: arquivo pessoal.

Como determina a norma, o cone (Figura 4-11) é em aço inoxidável 304, formado por dois trocos de cone concêntricos, recheados com fibra de vidro (GEMAQUE,2012).

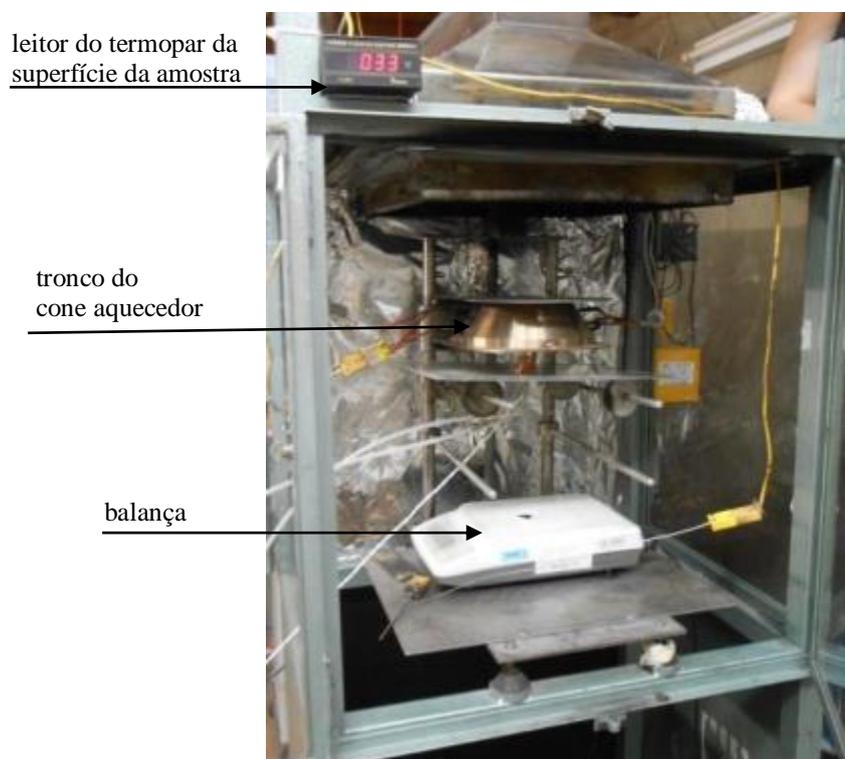


Figura 4-11: Calorímetro cônico montado em sua estrutura de sustentação e balança - INPE/LCP.
Fonte: Arquivo pessoal.

O cone (tronco de cone) possui três resistências ligadas em paralelo, com uma resistência total equivalente de $9,5\Omega$. As resistências são fabricadas com uma liga de Nichrome (80% de níquel e 20% de cromo) e revestimentos de óxido de magnésio e aço 304 (GEMAQUE, 2012). Os fios fornecem a tensão e a corrente de 220V para alimentar a resistência, até a potência de 5.000W (CASTRO,2005). A Figura 4-12 representa o desenho esquemático do cone e suas dimensões.

Para a medida e controle de temperatura, existem quatro termopares: um termopar posicionado no centro da base do cone e os outros três (Figura 4-13), do tipo k, distribuídos simetricamente e tangenciando as resistências elétricas, em volta da parte interna do tronco de cone. O termopar localizado no centro da base do calorímetro possui dimensões de $\varnothing 3\text{mm} \times 120\text{mm}$, e os demais possuem bainha de aço inox 310, com $\varnothing 3\text{mm} \times 75\text{mm}$, temperatura máxima de operação de 1.100°C (GEMAQUE, 2012).

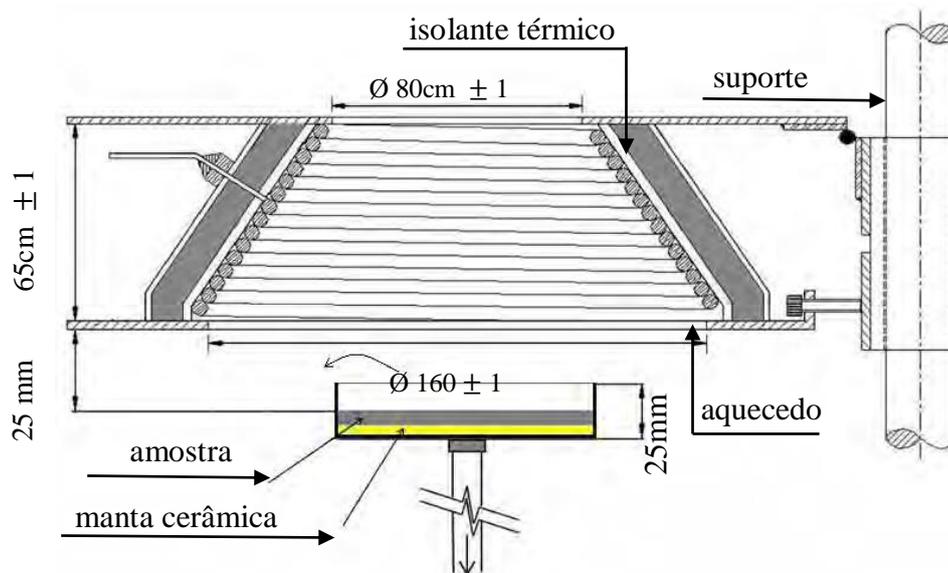


Figura 4-12: Esquema do cone e seus elementos. Fonte: GEMAQUE (2012 p. 55) e CASTRO (2005).

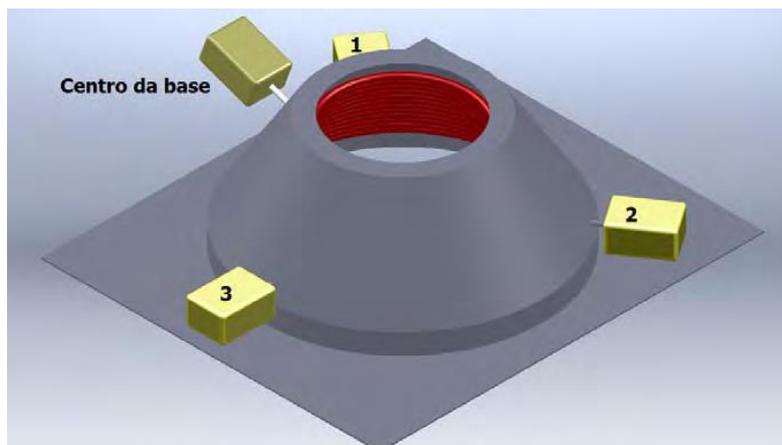


Figura 4-13: Esquema de localização dos termopares.
 Fonte: GEMAQUE, 2012, p.68.

O calor produzido pela resistência elétrica é irradiado por condução, convecção e radiação em todas as direções, ou seja, para a própria superfície do cone aquecedor, para a amostra e para o ar no entorno. Nesta pesquisa, para medir a temperatura que a superfície da amostra atinge devido ao calor emitido pelo cone, quando entra em ignição (temperatura de ignição, T_{ig}), foi colocado um termopar no centro da amostra (Figura 4-14 e 4-15) e um leitor de medida, ao lado de fora da cabine (Figura 4-11).



Figura 4-14: Detalhe do termopar posicionado na superfície da amostra, durante a ignição.
 Fonte: arquivo pessoal.



Figura 4-15: Detalhe do termopar posicionado na superfície da amostra. Fonte: arquivo pessoal.

Para a manutenção das mesmas condições iniciais em todos os testes, o calorímetro cônico possui duas placas refletoras (Figura 4-16). As características das placas seguem a ASTM E1354-11. A placa superior, posicionada entre a base do cone e o porta amostras, fabricada em aço inoxidável 304 e revestida com uma camada de grafite flexível. Essa tem a função de evitar a exposição do corpo de prova à energia irradiada, antes que a temperatura média das

resistências atinja o valor proporcional à potência determinada para o ensaio e, é retirada por meio de roletes, quando essas condições de início do ensaio são atingidas. A placa refletora inferior é polida, com a função de refletir a radiação incidente e, por conseguinte, proteger a balança das altas temperaturas (o limite de operação da balança é de 200°C) (GEMAQUE, 2012).

A balança digital (Figura 4-17), utilizada para a aquisição dos valores da evolução da perda de massa, tem precisão de $\pm 0,005\text{g}$ e tempo de resposta de 1s, da marca Gehaka e modelo BG 4.000. Ela é acoplada a um microcomputador, por meio da plataforma LabView. (CASTRO, 2005).



Figura 4-16: Placas refletoras e balança de medição da perda de massa. Fonte: arquivo pessoal.



Figura 4-17: Balança Gehaka, modelo BG 4000. Fonte: GEMAQUE, 2012, p. 53.

Segundo Gemaque (2012), ao ligar o exaustor para realização dos ensaios, há uma redução de até 1,0g na massa medida pela balança, com a redução da pressão do ar sobre ela, em decorrência do escoamento do ar que entra no calorímetro, quando o exaustor é acionado.

Para a aquisição dos dados, dois programas (LabVIEW) operam de modo independente. Um deles é do próprio calorímetro cônico e está instalado na bancada de operação do cone, o Bunker 5, onde se registram dados de evolução da massa e taxa de consumo de massa (dm/dt). O segundo, o analisador de gases, está localizado na sala de controle de aquisição de dados dos gases, dentro do Laboratório LCP (Figura 4-18), onde se fazem as medições de O₂, CO₂, CO, NO_x e UHC. O acionamento de aquisição de dados de ambos é realizado simultaneamente, por meio de dispositivo de comunicação remota, ou outro disponibilizado pelo Laboratório (GEMAQUE, 2021).



Figura 4-18: Analisador de gases. Fonte: arquivo pessoal.

Sobre o sistema de aquisição de gases, Gemaque (2012) explica o seguinte:

O sistema de aquisição de gases é composto pelo anel de amostragem, banho térmico, filtros e por um conjunto de analisadores de gases. Durante os ensaios, a amostra de gases é retirada do duto de escoamento horizontal, por meio do anel de amostragem. Uma bomba de vácuo do tipo diafragma do analisador de gases é responsável pela sucção de uma parte dos gases de exaustão, que após passar pelo banho térmico e filtros, é distribuída entre os analisadores que realizam o processo de medição independentemente. O anel de amostragem possui 20 furos de 3mm, distribuídos concêntricamente e montados em sentido contrário ao escoamento dos gases e dependendo do material ensaiado ocorre a sua obstrução dificultando a coleta dos gases. Localizado à jusante do anel de amostragem, um termopar tipo K permite avaliar a temperatura dos gases de exaustão (p.83 e84).

Mais informações sobre o calorímetro cônico do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão – LCP, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, podem ser consultadas em Castro (2005) e Gemaque (2012).

4.3 Ensaios no Calorímetro Cônico

Todos os procedimentos do ensaio seguiram as normas ISO 5660-1, “*Reaction to Fire Tests. Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate. Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate*” (Testes de Reação ao Fogo. Liberação de Calor, Produção de Fumaça e Taxa de Perda de Massa. Parte 1: Taxa de liberação de calor [método do calorímetro cônico] e taxa de produção de fumaça).

Antes do início dos testes, é feito o ajuste da potência de aquecimento através do controlador PID, que realiza o controle de forma linear (0 a 100%) da potência liberada pelo circuito de aquecimento, assim como indica Castro (2005). No caso desta pesquisa, a percentagem foi de 50% da potência máxima liberada pelo circuito, o que equivale ao fluxo radiante de 50kW/m^2 . Também é feita a calibração do fluxo de ar do ventilador da coifa que, neste caso, foi de 40% da frequência de rotação do ventilador (Figura 4-19). A calibração do fluxo de calor é realizada uma única vez, a cada dia de teste (neste trabalho foram realizados em média quatro ensaios por dia).



Figura 4-19: Monitor de temperatura, controlador de potência e inversor de frequência da exaustão da bancada do calorímetro cônico. Fonte: arquivo pessoal.

Cada corpo de prova foi desembalado do plástico filme, pesado na balança do calorímetro cônico, já dentro do porta amostra (com o valor do peso descontado), e o valor anotado em planilha de papel. Logo em seguida, a placa refletora inferior é colocada para a proteção da balança.

O porta amostra (cadinho) foi o mesmo utilizado por Gemaque (2012), feito em aço inoxidável 304, com dimensões de 102mm x 102mm x 25mm (comprimento x largura x altura). No fundo, foi utilizada uma manta de fibra cerâmica, que suporta temperaturas de até 1.300°C (marca Retrátíl Refratários, tipo HP), como isolante térmico e, além disso, a superfície não exposta à radiação dos corpos de prova foi envolvida em uma folha de alumínio, para evitar perdas de calor por radiação, através das laterais, durante o ensaio (Figura 4-20).

O cadinho foi colocado, então, a 25mm de distância da base do cone aquecedor, como determinado pela ASTM E1354-17, e o termopar de medição da temperatura de ignição posicionado no centro da superfície da madeira. A placa refletora superior foi colocada em seguida, para proteger a amostra da radiação, enquanto as resistências são aquecidas, até a estabilização da temperatura do cone.

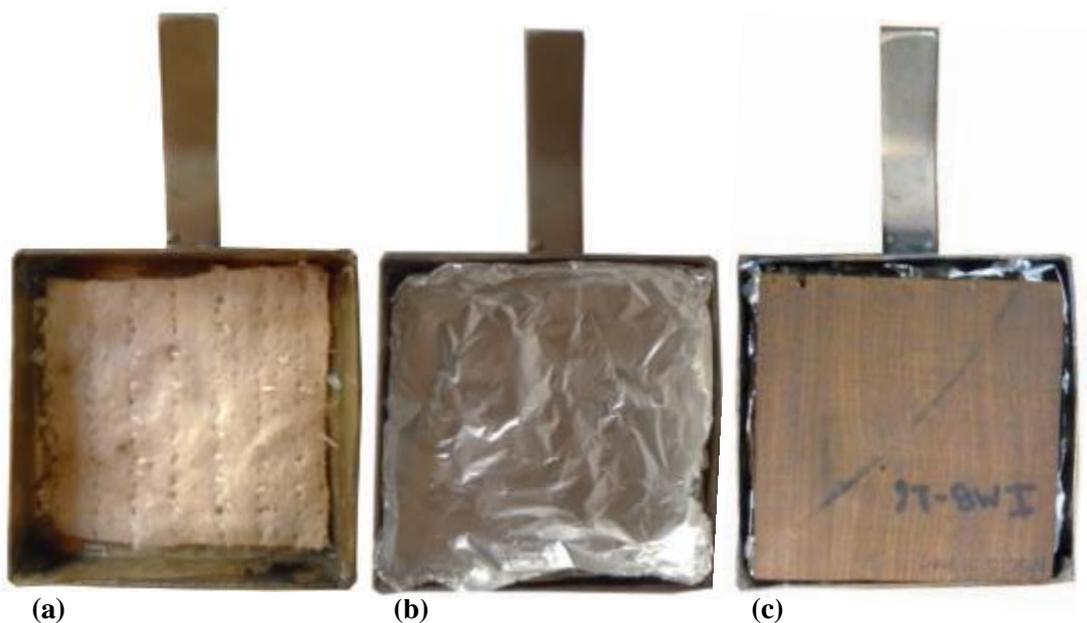


Figura 4-20: Porta-amostras com a manta (a); com a folha de alumínio (b) e com a amostra. Fonte: arquivo pessoal.

Após o ajuste da potência e a colocação do porta amostra na posição para o ensaio, o aquecedor é ligado e espera-se a estabilização da temperatura, o equilíbrio térmico. A temperatura é medida pelos termopares localizados dentro do aquecedor. Neste trabalho, a temperatura de equilíbrio da resistência foi de aproximadamente 525°C. Esse procedimento deve ser realizado em cada ensaio, para cada amostra.

Pouco antes de se iniciar o ensaio, o programa do analisador de gases é alimentado com as informações específicas de cada amostra e, em seguida, é ligado e se espera que entre em operação.

Assim que o analisador começa a operar, a placa refletora superior é retirada, para a liberação do fluxo de calor sobre a amostra e, simultaneamente, o *software* de aquisição de dados (LabView) é acionado por um botão liga e desliga no computador. Este programa gera uma planilha de dados com todos os parâmetros em estudo, como as massas, o tempo de ensaio, a taxa de consumo de massa (dm/dt) e a taxa de consumo percentual instantâneo de massa ($(1/m)(dm/dt)$) CASTRO (2005).

Aqui, a planilha em papel permaneceu todo o tempo do ensaio sobre a bancada, para que fossem anotados todos os dados não adquiridos pelo *software*, como a massa da amostra, o tempo para a ignição, a temperatura de ignição e outros dados adicionais.

Nesta pesquisa, foi definido que a combustão seria espontânea, ou seja, a ignição ocorreria naturalmente, com o aumento da temperatura, sem a utilização da chama-piloto. Pela observação simultânea da amostra em teste e do leitor de temperatura no termopar da superfície da madeira (figura 4-21), imediatamente ao surgimento da chama, a temperatura foi lida e anotada em planilha - ou seja, a temperatura de ignição (T_{ig}), e anotado o tempo necessário para a ignição (t_{ig}).

Gemaque (2012) explica que logo após a ignição ocorre um aumento imediato da temperatura, em razão de a chama cruzar o sensor do termopar do cone, e o fluxo de calor proveniente da chama soma-se à medição da temperatura da região sob o cone aquecedor e dos gases provenientes da pirólise da madeira no início da queima.

leitor do termopar da superfície da amostra

amostra em chamas



Figura 4-21: Detalhe do leitor de temperatura da superfície no momento da ignição, e a mostra em chamas. A temperatura mostrada é após a ignição. Fonte: arquivo pessoal.

O encerramento do ensaio e da aquisição de dados ocorreu 32 minutos após o tempo de ignição, que indicam 30 minutos após a ignição e mais dois minutos adicionais, para que a coleta de dados seja finalizada, sem alteração no tempo do ensaio, de acordo com a ISO 5660-1 (2015), item 11.3.5 a).

5 RESULTADOS

Como mencionado, para investigação das propriedades de combustão de cada um dos corpos de prova, são particularmente importantes a temperatura da superfície do cone no momento de início da ignição, T_{igcon} ; a temperatura na superfície do corpo de prova no início de ignição, T_{igcp} ; e o tempo medido para o início de ignição, t_{ig} . O cálculo da radiação incidente no momento do início de ignição, q'' , é medido a partir das temperaturas T_{igcon} e T_{igcp} , com o emprego da Lei de Stefan-Boltzmann:

$$q'' = \varepsilon \sigma F_{12} A_{con} (T_{igcon}^4 - T_{igcp}^4) \quad (5.1)$$

onde ε é a emissividade da resistência do cone; σ é a constante de Stefan-Boltzmann igual $5,669 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$; F_{12} é o fator de forma do cone para o corpo de prova. Segundo Gemaque (2012), o fator de forma F_{12} entre o cone calorímetro e o corpo de prova retangular no cone do INPE/LCP pode ser tomado como 0,2509. Com esses dados, foi calculada a radiação incidente em cada um dos corpos de prova no instante do início de ignição, como consta na Tabela 5-1.

Além das características geométricas, físicas e densidade aparente das amostras, apresentadas no Capítulo anterior, e dos dados apresentados abaixo, foram registrados, em cada ensaio, os dados de perda de massa, as temperaturas da superfície dos corpos de prova e da resistência do cone, as concentrações de O_2 , CO_2 , CO e NO_x da combustão de cada um dos corpos de prova. Os resultados desses ensaios foram apresentados pela média de cada classe de três corpos de prova e definem séries de grandezas, que podem ser referidas como um "ensaio-médio". Isto é, os dados observados de uma série de três corpos de prova identificados pelo tipo de tratamento são tratados como resultados de um corpo de prova fictício, que corresponde a um ensaio médio.

Como a duração dos ensaios variou entre os corpos de prova, a taxas de perda de massa e a quantidade de calor liberada para cada série de resultados de "ensaio médio" foram calculadas nos intervalos de tempo de 180s e 300s, a contar do início das chamas. Esses intervalos são adotados em diversos trabalhos científicos. Aqui foram adotados também 1.200s e o tempo da extinção das chamas, sendo que 1.200s é o tempo estimado, não ultrapassado pelo início de combate de incêndio pelo Corpo de Bombeiros.

Tabela 5-1: Radiação incidente sobre os corpos de prova.

Tipo do corpo de prova	T_{igcp} (°C)	T_{igcon} (°C)	t_{ig} (s)	q'' (kW/m ²)
UNT-1	568	591	37	51,2
UNT-2	424	463	29	49,8
UNT-3	476	509	34	50,0
A01-4	482	515	34	49,7
A01-5	475	508	33	51,3
A01-6	447	483	32	50,2
A10-7	588	610	41	48,6
A10-8	454	489	35	48,9
A10-9	514	543	34	49,0
Q01-10	544	569	39	49,9
Q01-11	524	552	37	50,2
Q01-12	450	486	37	51,7
Q10-13	502	532	37	48,8
Q10-14	436	475	31	50,7
Q10-15	479	512	33	51,4
I01-16	470	503	31	50,9
I01-17	408	449	29	50,0
I01-18	464	499	33	49,9
I10-19	512	540	36	50,4
I10-20	449	485	33	50,5
I10-21	458	492	34	49,5

5.1 Corpos de prova não tratados – ensaio médio

O histórico de massa dos corpos de prova não tratados é mostrado na Figura 5-1, cuja legenda S é o desvio padrão. A duração do ensaio foi de 1.955s. A perda total de massa observada foi de 155,23g.

A Figura 5-2 mostra o histórico da taxa de perda de massa (g/s) observada neste ensaio. A taxa de perda de massa média nos 180s após o início do ensaio é 0,14g/s, e nos 300s após o início do ensaio é 0,13g/s, sendo de 0,12g/s nos 1.200s da combustão.

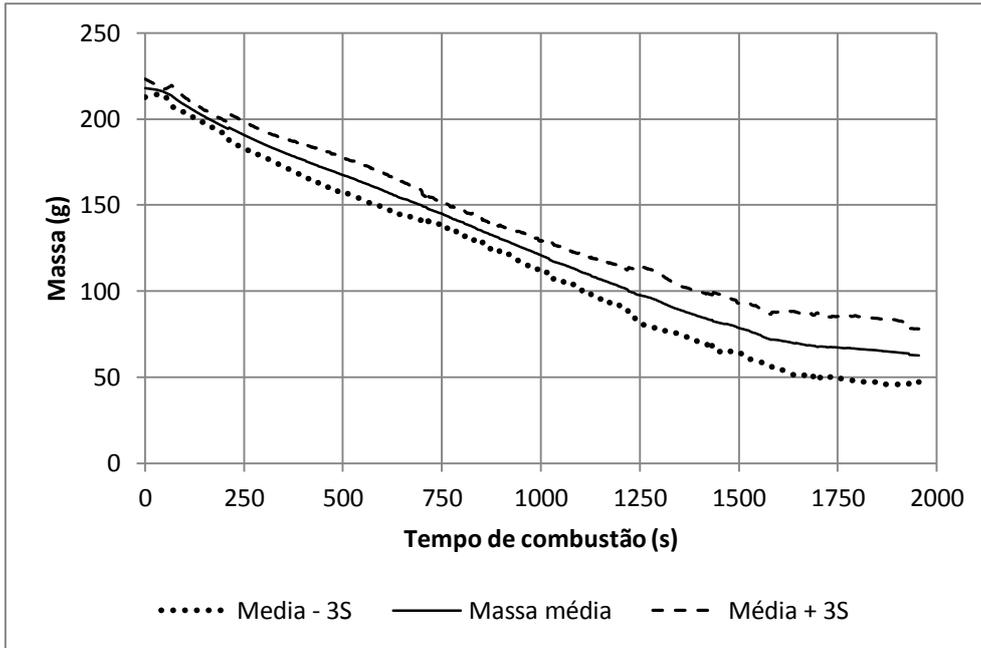


Figura 5-1: Histórico de massa no ensaio médio correspondente aos corpos de prova não tratados.

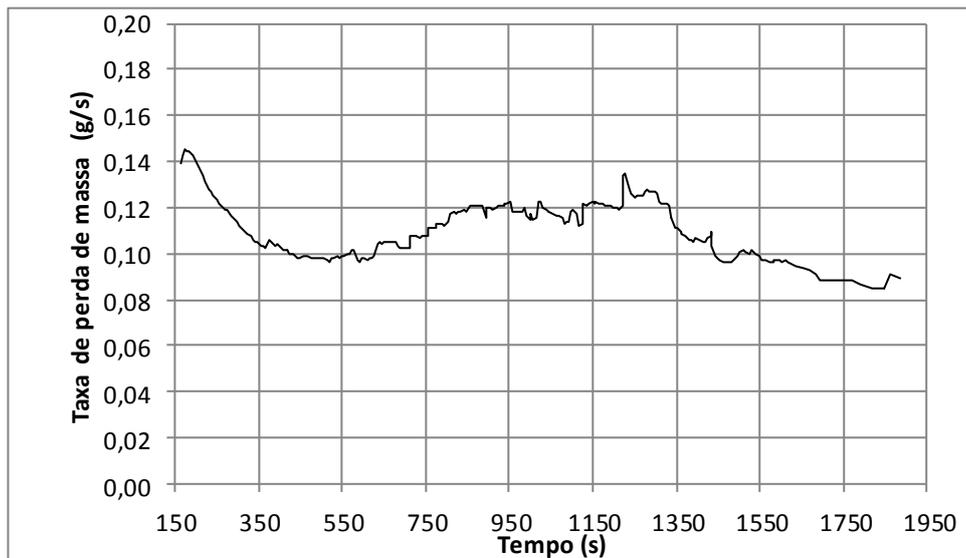


Figura 5-2: Histórico da taxa de perda da massa observada no ensaio médio correspondente aos corpos de prova não tratados.

Na Figura 5-3, a coleta e a análise dos dados dos gases de combustão mostram o histórico da concentração de O_2 no ambiente do ensaio e, na Figura 5-4, da concentração do CO_2 produzido.

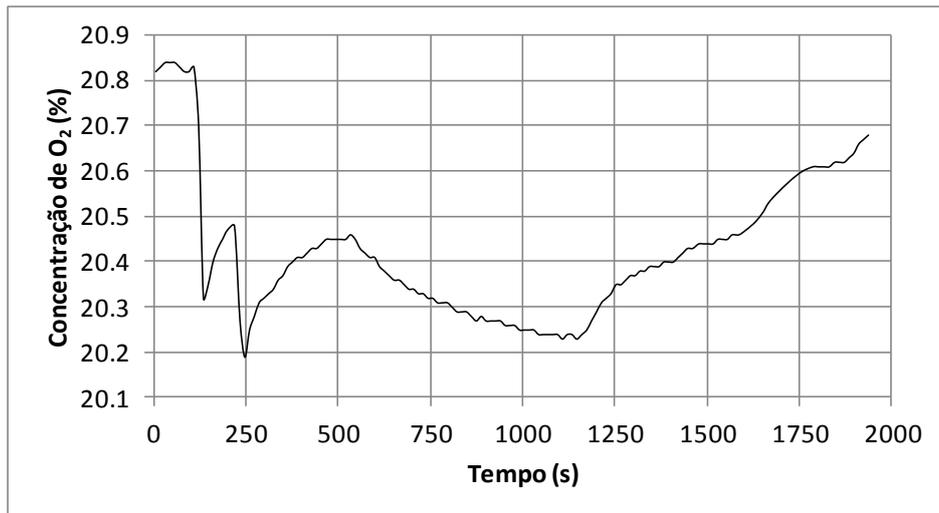


Figura 5-3: Histórico da concentração do O₂ ambiente durante a combustão no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.

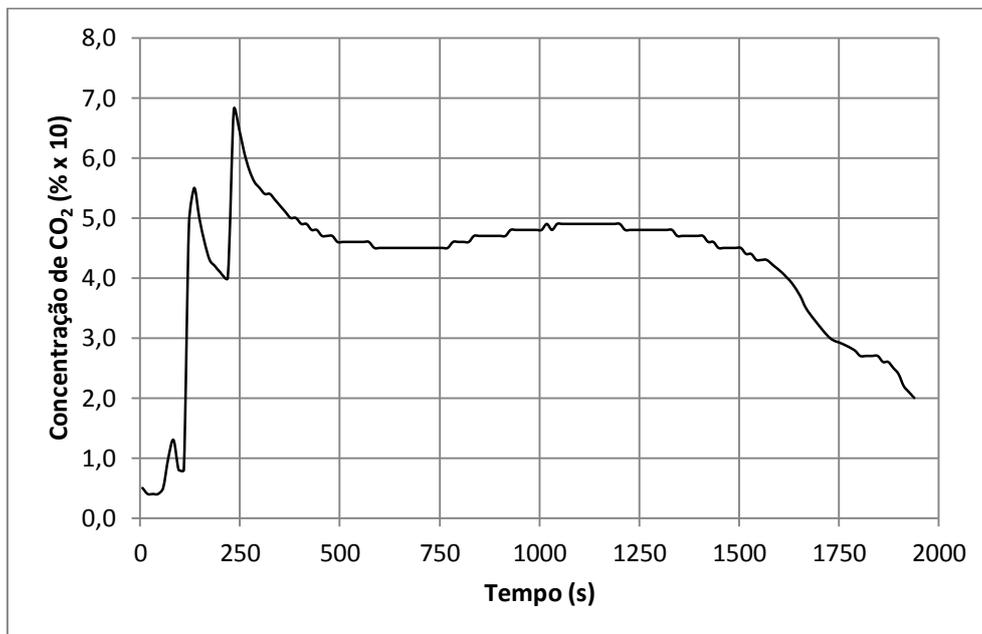


Figura 5-4: Histórico da concentração do CO₂ produzido na combustão no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.

O histórico da quantidade do calor liberado nos corpos de prova não tratados (ensaio médio) por unidade de área é mostrado na Figura 5-5. Observa-se uma taxa máxima da ordem de 270kJ/m². A soma dos produtos da quantidade de calor em cada intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a 17,94MJ/kg, coerentes com os valores encontrados para a madeira seca na literatura técnica, variantes entre 13 e 19MJ/kg.

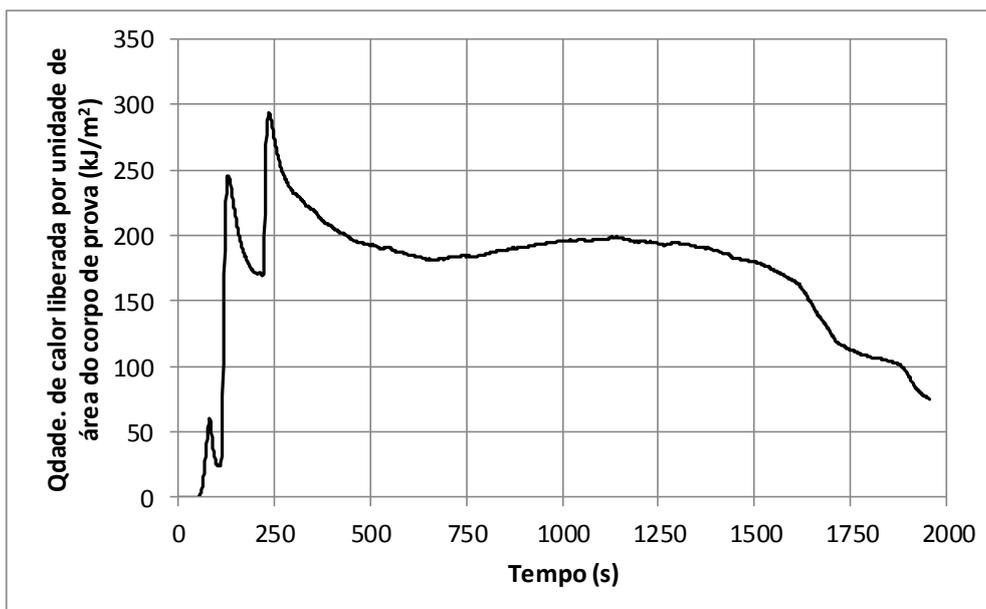


Figura 5-5: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova não tratados.

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 10,14MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão (resultante da divisão da quantidade de calor liberada pelo período de tempo correspondente) nesse intervalo de tempo de 56,33kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 13,84MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo 46,13kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s a quantidade de calor liberada foi de 16,69MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 13,91kW/kg. Do início do ensaio até a extinção das chamas, a quantidade de calor liberada foi de 17,94MJ/kg, que equivalem a uma potência de combustão de 9,18kW/kg.

A Figura 5-6 mostra o histórico de temperaturas (°C) registradas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova não tratados. A diferença observada entre as duas curvas ilustra a elevação de temperatura devido ao calor recebido no corpo de prova pela radiação da própria chama. Como se observa, até cerca de 150s após o início de ignição, a radiação incidente no corpo de prova, oriunda da própria chama, acelera o crescimento da temperatura da sua superfície; após, até a extinção da chama, a 1.955s do início do ensaio, a temperatura da superfície do corpo de prova se mantém mais elevada que a temperatura do cone.

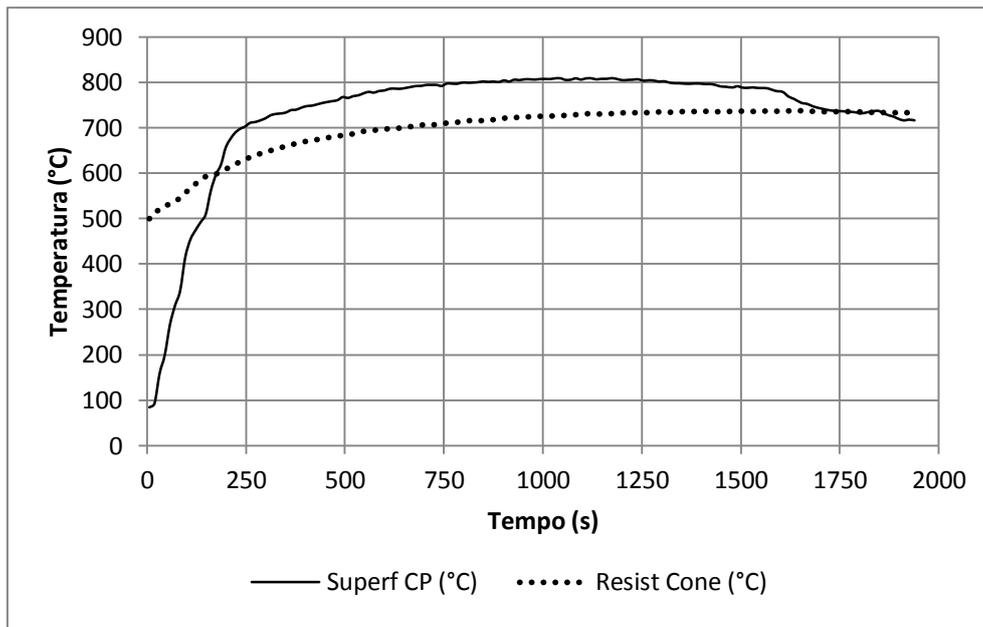


Figura 5-6: Histórico de temperaturas (°C) da superfície do corpo de prova não tratado e da resistência do cone.

A figura 5.7 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras sem tratamento. Como se observa, há evidentes semelhanças no aspecto pós combustão dos corpos de prova desse ensaio médio.



Figura 5-7: Aspecto das madeiras não tratadas, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.2 Corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1% - ensaio médio

Os corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a uma concentração de 1% apresentaram no ensaio médio o histórico da massa durante a combustão, mostrado na Figura 5-8, sendo S o desvio padrão médio. Observa-se maior dispersão das medidas de massa nesse ensaio comparativamente aos corpos de prova não tratados comparativamente aos corpos de prova não tratados.

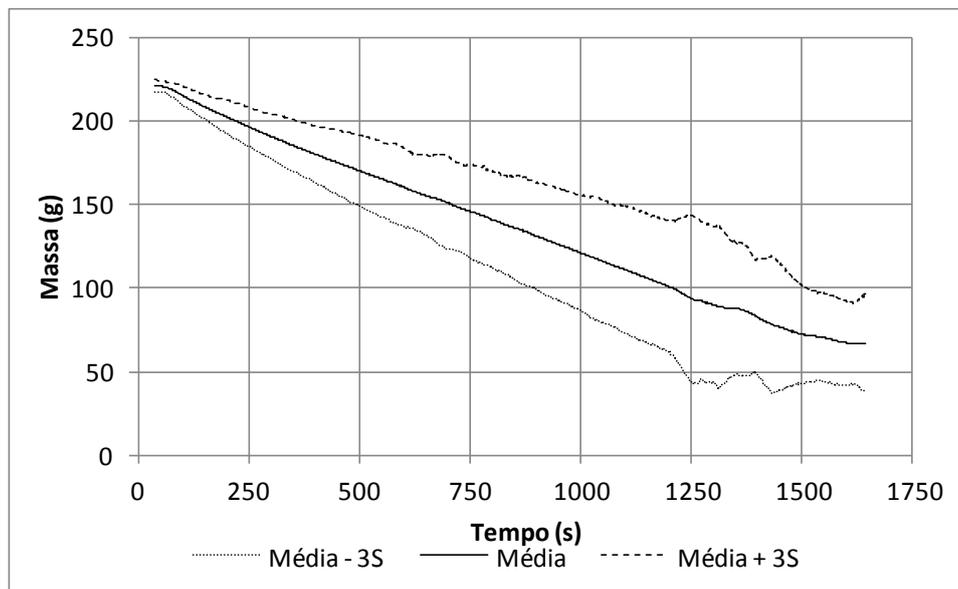


Figura 5-8: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1%.

A Figura 5-9 mostra o histórico da taxa de perda de massa nesse ensaio médio. A massa consumida durante a combustão foi de 153,46g. A taxa de perda de massa nos 180s e nos 300s após o início do ensaio é 0,11g/s, sendo de 0,10g/s nos 1.200s da combustão.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área é mostrado na figura 5-10, com o ajuste da curva pela média móvel de 12 períodos. Observa-se um máximo da ordem de 450kJ/m². A soma dos produtos da quantidade de calor liberada por unidade de área no intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que foi calculado igual a 19,67MJ/kg.

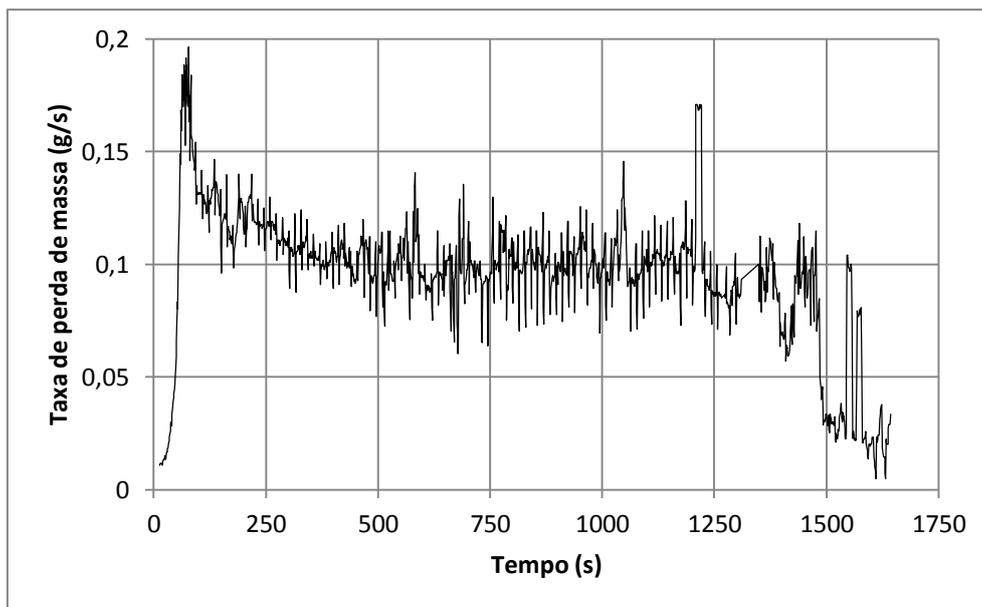


Figura 5-9: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 1%.

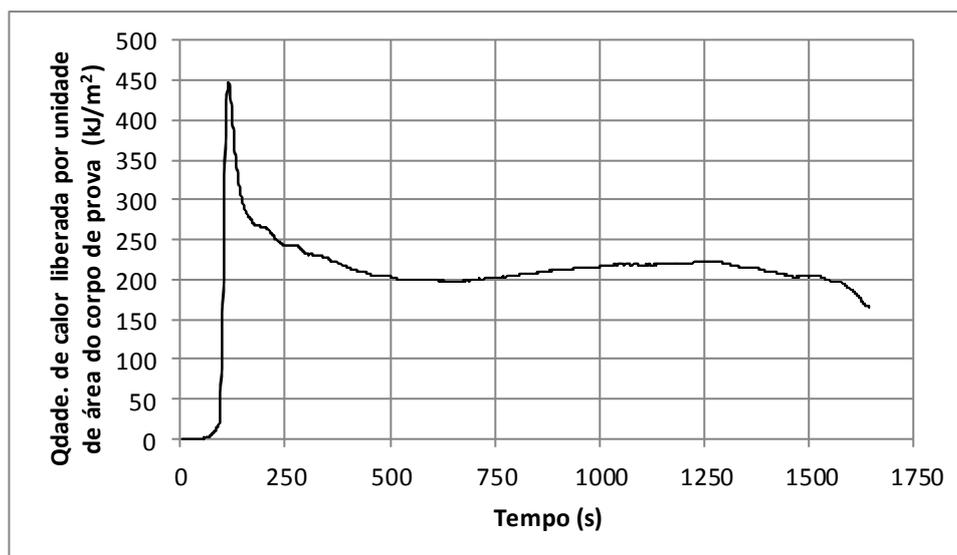


Figura 5-10: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 15,21MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 84,5kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 16,81MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo 54,03kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s a quantidade de calor liberada foi de 18,49MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 15,41kW/kg. Como do início do ensaio até a extinção das chamas decorreram 1645s, a quantidade total de calor liberada foi de 19,67MJ/kg, e a potência da combustão no ensaio foi de 11,96kW/kg.

Os históricos das concentrações médias de O₂ e de CO₂ durante o ensaio, bem como das temperaturas médias do cone e da superfície do corpo de prova, são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio.

A figura 5-11 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução aquosa de permetrina a 1%.



Figura 5-11 : Aspecto das madeiras tratadas com solução aquosa de permetrina a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.3 Corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10% - ensaio médio

Os corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina, à concentração de 10%, apresentaram o histórico da massa durante a combustão, mostrado na Figura 5-12, sendo S o desvio padrão médio. Observa-se menor dispersão das medidas de massa nesse ensaio.

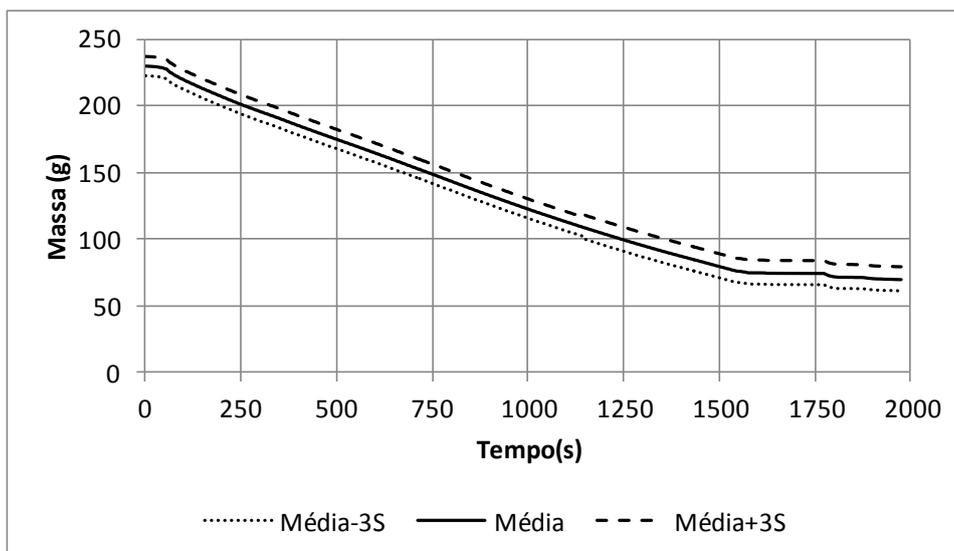


Figura 5-12: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.

A Figura 5-13 mostra o histórico da taxa de perda de massa nesse ensaio médio, após ajuste da curva para a média móvel de 12 períodos. A massa consumida durante a combustão é de 160,7g. A taxa de perda de massa nos 180s e nos 300s após o início do ensaio é 0,12g/s, sendo de 0,11g/s nos 1.200s da combustão.

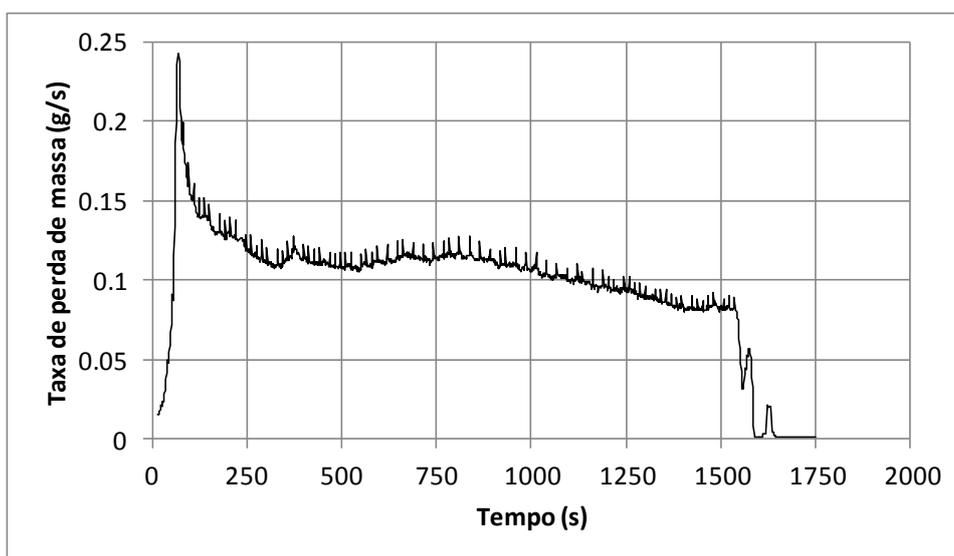


Figura 5-13: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área é mostrado na Figura 5-14. Observa-se o registro máximo da ordem de 478kJ/m^2 . A soma dos produtos da quantidade de

calor liberada, em um intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a 20,41MJ/kg.

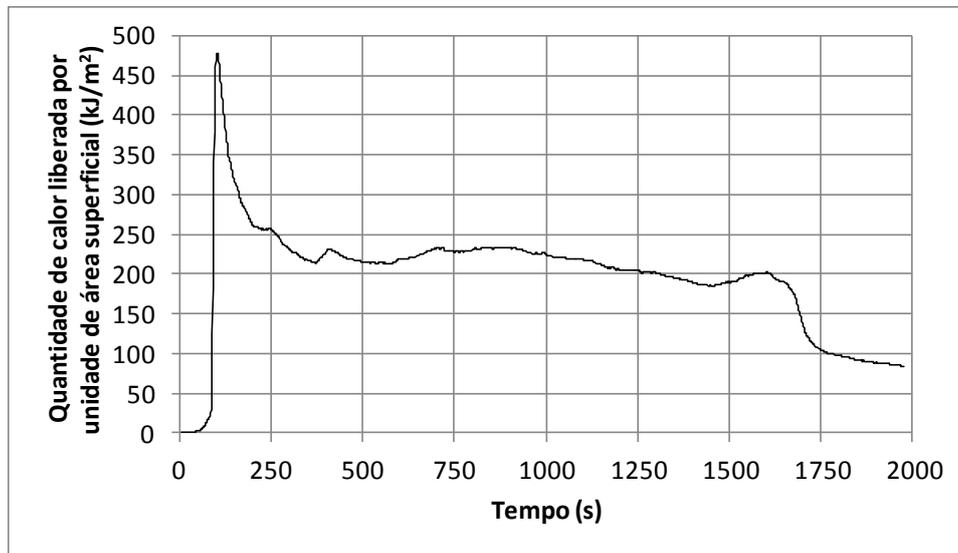


Figura 5-14: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução aquosa de permetrina a 10%.

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 17,09MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 94,94kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 16,81MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 58,36kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s, a quantidade de calor liberada foi de 18,49MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 15,22kW/kg. Como do início do ensaio, até a extinção das chamas, decorreram 2830s, a quantidade de calor liberada foi de 20,41MJ/kg, e a potência da combustão no ensaio foi de 10,33kW/kg.

Os históricos das concentrações médias de O₂ e de CO₂ durante o ensaio, bem como das temperaturas médias do cone e da superfície do corpo de prova, são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio e só serão mostrados caso alguma diferença significativa de comportamento dos corpos tratados deva ser explicada.

A figura 5-15 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução aquosa de permetrina a 10%.



Figura 5-15: Aspecto das madeiras tratadas com solução aquosa de permetrina a 10%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.4 Corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%

O ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em querosene à concentração de 1%, apresentaram o histórico de massa durante a combustão, mostrado na figura 5-16, sendo S o desvio padrão médio. A massa total consumida foi de 157,42g, e a duração do ensaio foi de 1.753s.

A figura 5-17 mostra o histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova após ajuste da curva para a média móvel de 12 períodos. A taxa de perda de massa nos 180s e nos 300s após o início do ensaio é 0,12g/s, sendo de 0,10g/s nos 1.200s da combustão.

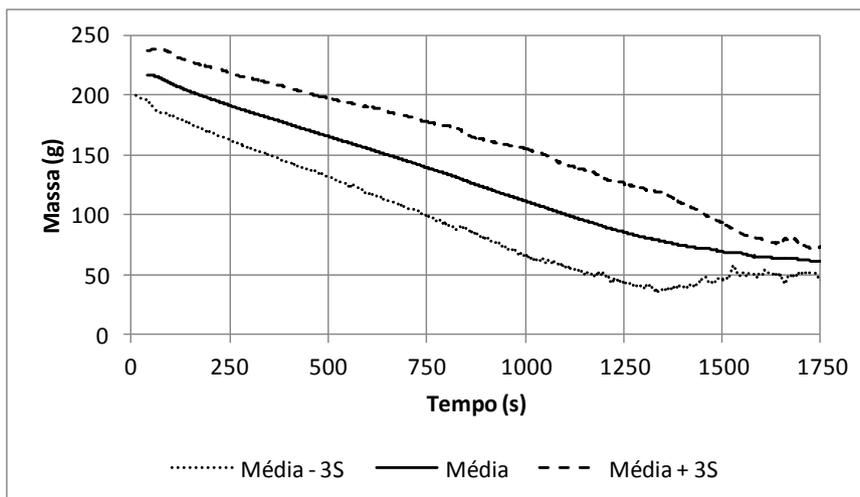


Figura 5-16: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.

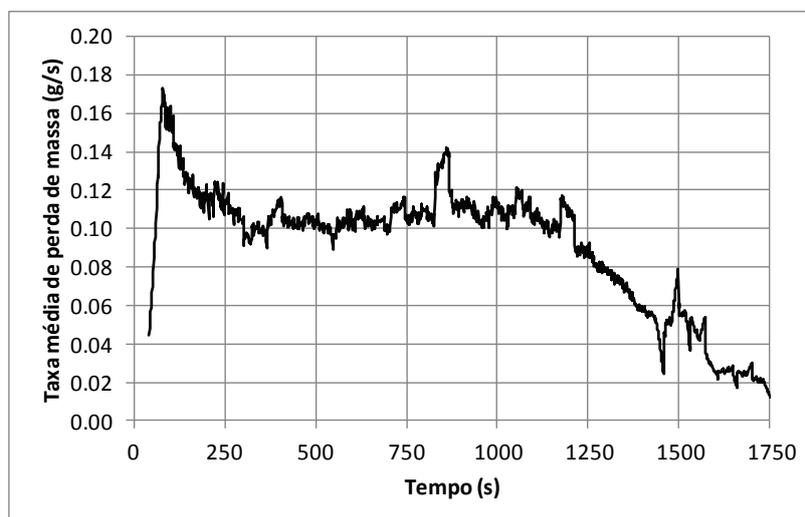


Figura 5-17: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área é mostrado na Figura 5-18. Observa-se o registro máximo da ordem de 339kJ/m^2 . A soma dos produtos da quantidade de calor liberada em um intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a $21,06\text{MJ/kg}$.

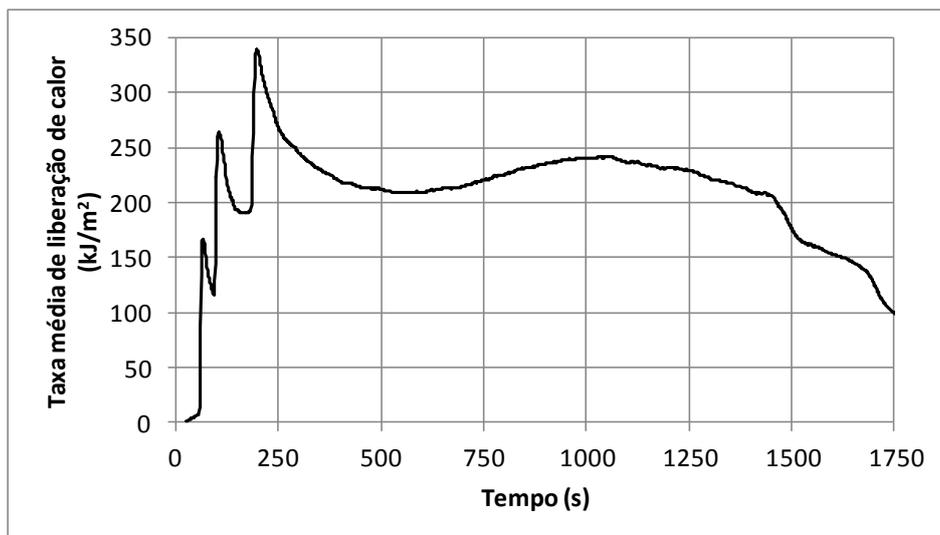


Figura 5-18: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em querosene a 1%

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 13,68MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 76kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 16,95MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo 56,50kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s, a quantidade de calor liberada foi de 18,76MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 15,63kW/kg. Como do início do ensaio até a extinção das chamas decorreram 1.753s, a quantidade de calor liberada foi de 21,06MJ/kg, e a potência média da combustão no ensaio foi de 12,01kW/kg.

Os históricos das concentrações médias de O₂ e de CO₂ são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio e só serão mostrados caso alguma diferença significativa de comportamento dos corpos tratados deva ser explicada. A figura 5-19 mostra a evolução de temperaturas dos corpos de prova e da resistência do cone. Observa-se pouca influência da incidência da radiação da própria chama no aquecimento do corpo de prova entre 500s e 1.500s.

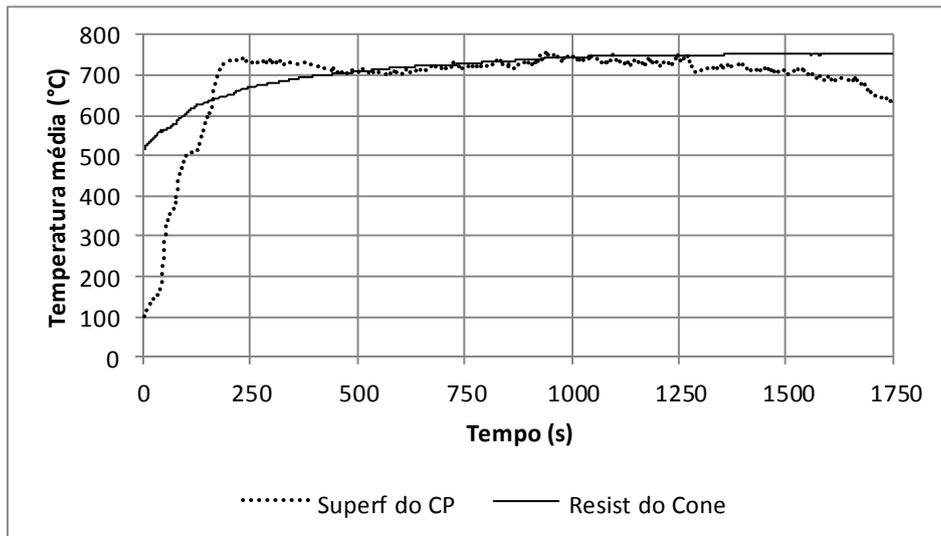


Figura 5-19: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 1%.

A figura 5-20 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução de permetrina e querosene a 1%.



Figura 5-20: Aspecto das madeiras, tratadas com solução de permetrina com querosene a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.5 Corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10% - ensaio médio

Os corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene, a uma concentração de 10%, apresentaram o histórico da massa durante a combustão mostrado na figura 5-21, sendo S o desvio padrão médio. A massa total consumida foi de 163,33g, e a duração do ensaio foi de 1.985s.

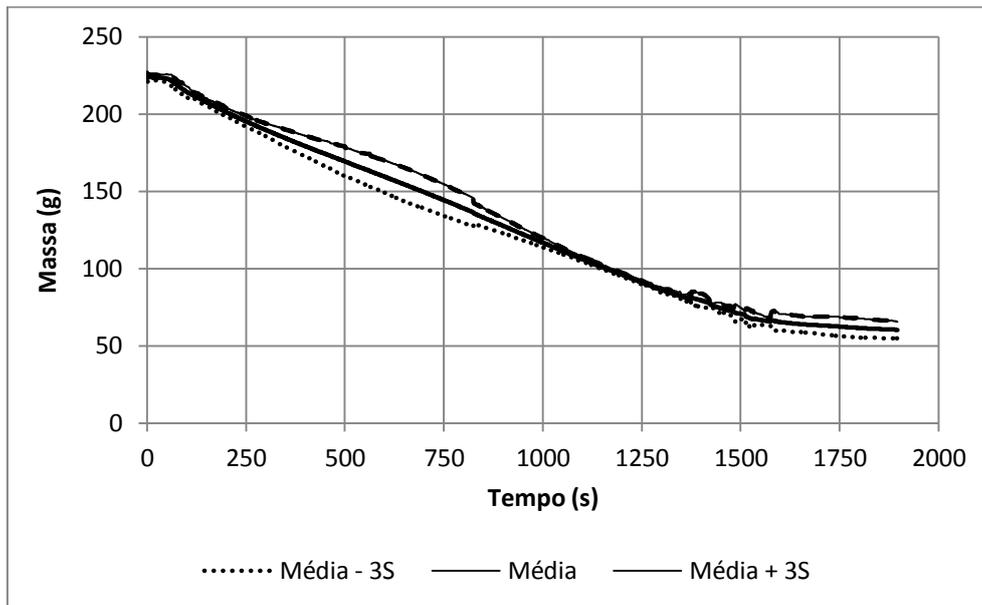


Figura 5-21: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.

A figura 5-22 mostra o histórico da taxa de perda de massa desses corpos de prova, após ajuste da curva para a média móvel de 12 períodos. A taxa de perda de massa nos 180s e nos 300s após o início do ensaio é 0,12g/s, sendo de 0,11g/s nos 1.200s do início da combustão.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área é mostrado na figura 5-23. Observa-se um máximo da ordem de 417,5kJ/m². A soma dos produtos da quantidade de calor liberada em um intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a 20,43MJ/kg.

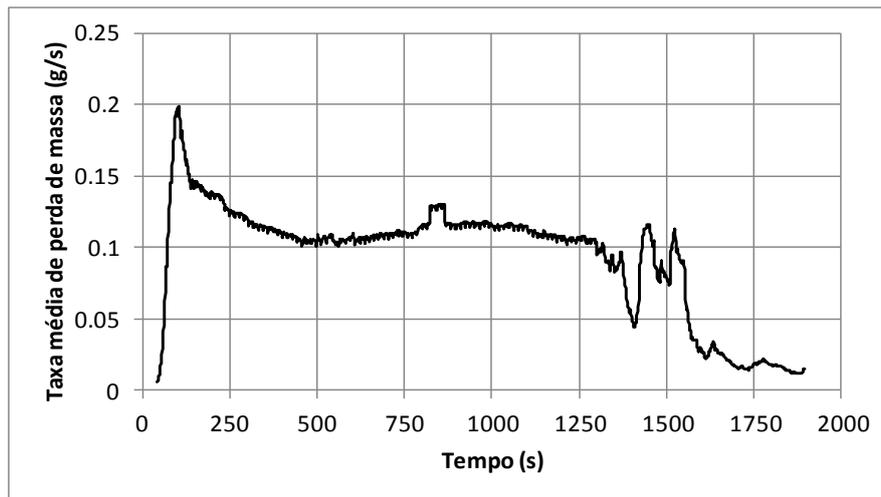


Figura 5-22: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.

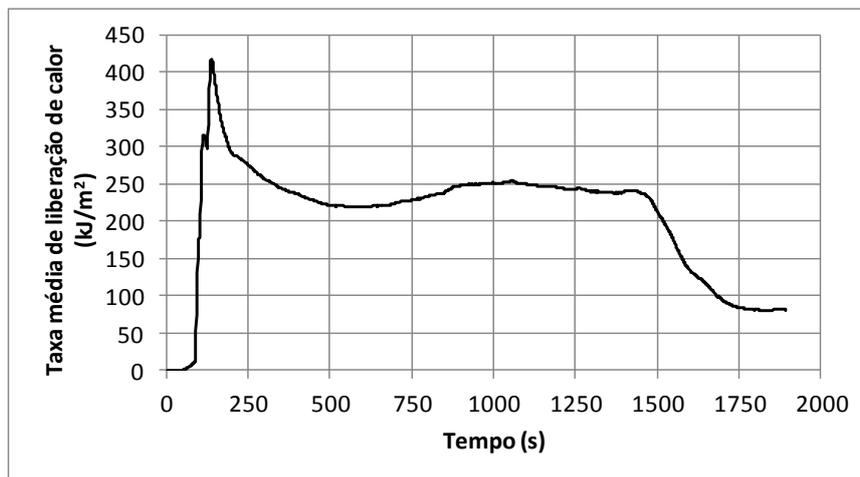


Figura 5-23: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 15,08MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 83,8kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 17MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo 56,7kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s, a quantidade de calor liberada foi de 18,84MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 15,7kW/kg. Como do início do ensaio até a extinção das chamas decorreram-se 1.895s, a quantidade de calor liberada foi de 20,43MJ/kg, e a potência média da combustão no ensaio foi de 17,03kW/kg.

Os históricos das concentrações médias de O_2 e de CO_2 são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio e só serão mostrados caso alguma diferença significativa de comportamento dos corpos tratados deva ser explicada. A figura 5-24 mostra a evolução de temperaturas dos corpos de prova e da resistência do cone. Observa-se a influência da incidência da radiação da própria chama no aquecimento do corpo de prova entre 500s e 1.500s.

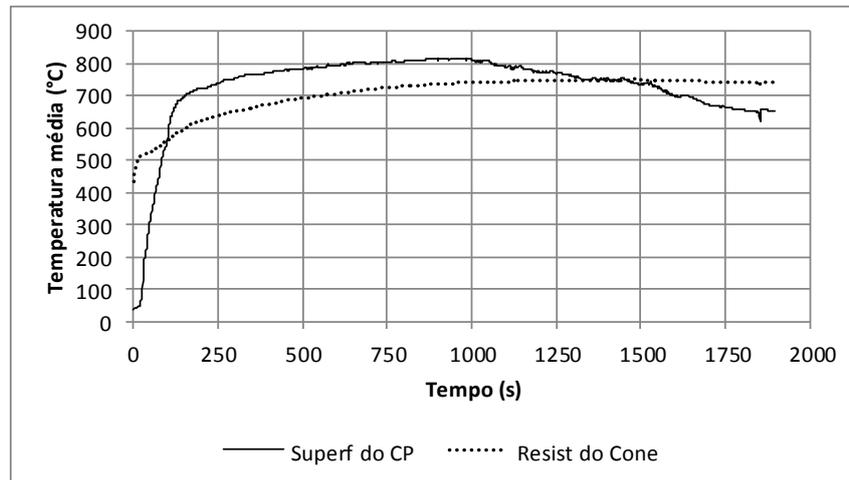


Figura 5-24: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em querosene a 10%.

A figura 5-25 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução de permetrina e querosene a 10%.

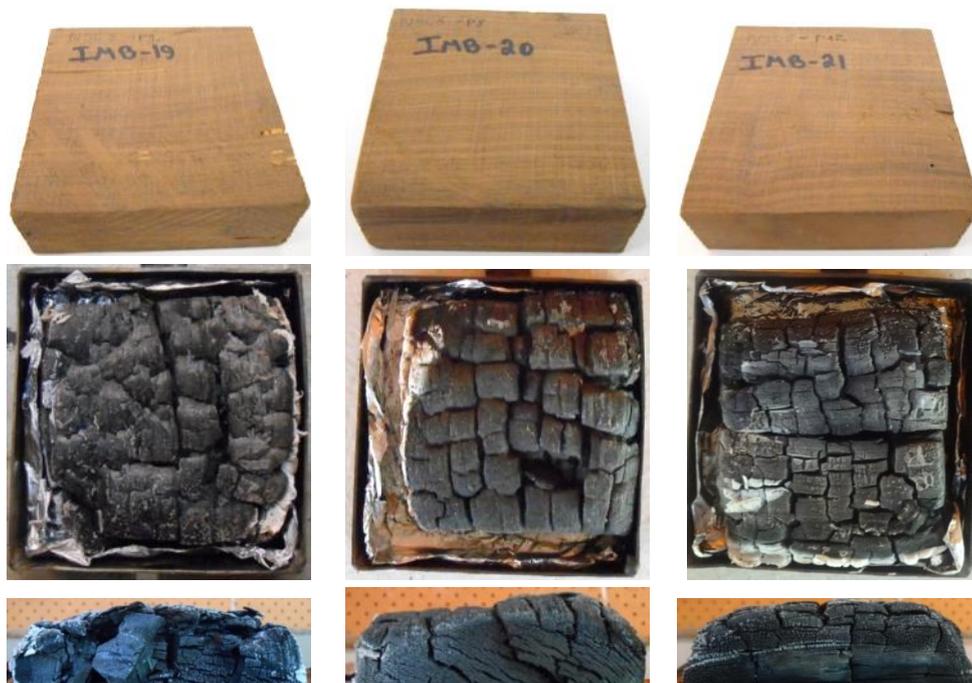


Figura 5-25: Aspecto das madeiras tratadas com solução de permetrina com querosene a 10%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.6 Corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1% - ensaio médio

O ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em isoparafina a uma concentração de 1%, apresentou o histórico da massa durante a combustão mostrado na Figura 5-26, sendo S o desvio padrão médio. A massa total consumida foi de 165,35g, e a duração do ensaio foi de 1.864s. A figura 5-27 mostra o histórico da taxa de perda de massa desses corpos de prova após ajuste da curva para a média móvel de 12 períodos. A taxa de perda de massa nos 180s e nos 300s após o início do ensaio é 0,12g/s, sendo de 0,11g/s nos 1.200s da combustão.

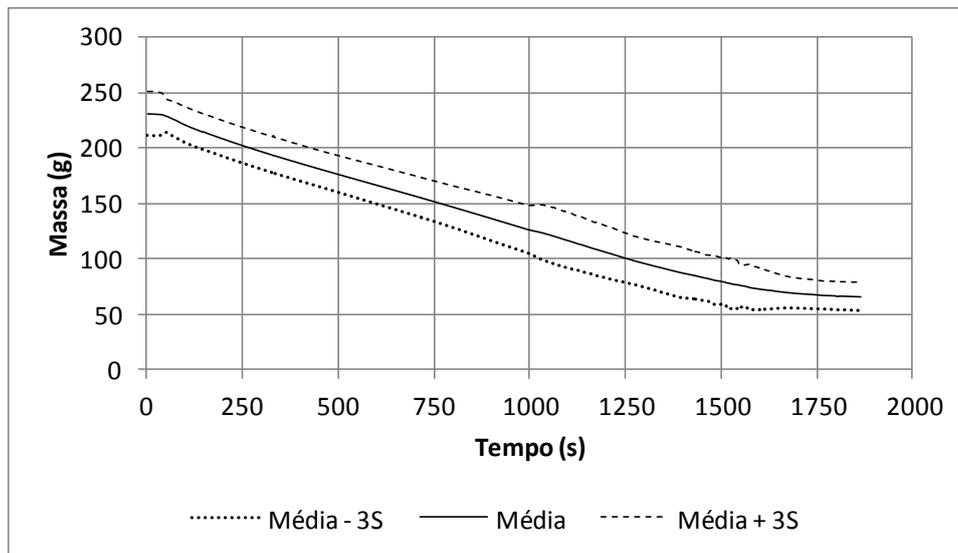


Figura 5-26: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a uma concentração de 1%.

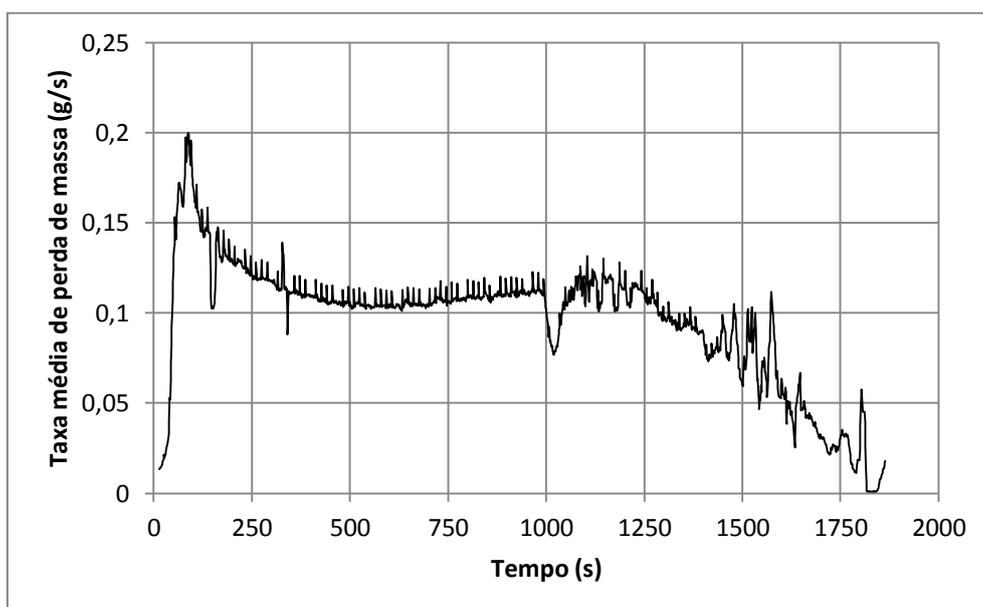


Figura 5-27: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de com solução de permetrina em isoparafina a uma concentração de 1%.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área é mostrado na Figura 5-28. Observa-se o registro máximo de ordem de $362,5\text{kJ/m}^2$. A soma dos produtos da quantidade de calor liberada em um intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a $19,86\text{MJ/kg}$.

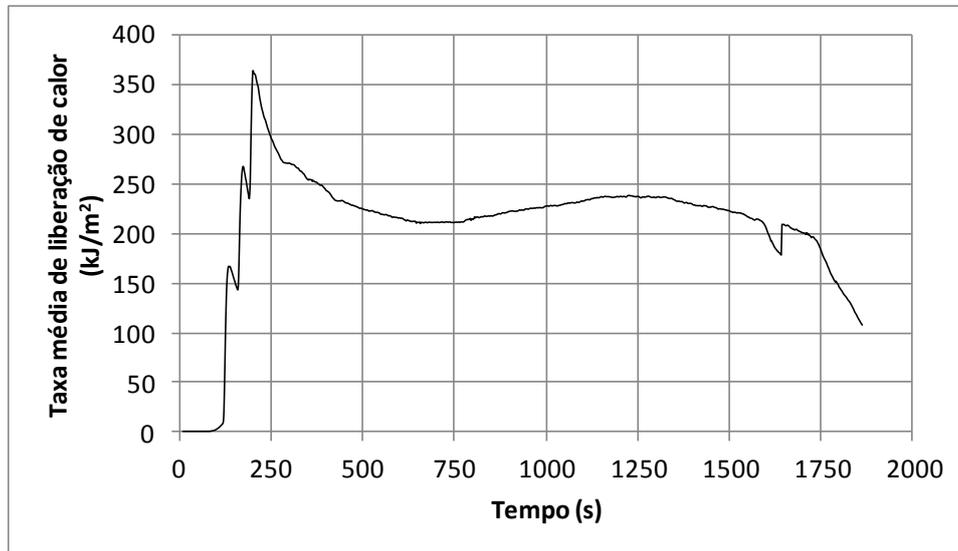


Figura 5-28: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova, tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1%.

A quantidade de calor liberada em 180s foi de $14,81\text{MJ/kg}$, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de $82,28\text{kW/kg}$ de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de $16,67\text{MJ/kg}$, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo $55,57\text{kW/kg}$ de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s a quantidade de calor liberada foi de $18,32\text{MJ/kg}$, equivalente a uma potência média da combustão de $15,27\text{kW/kg}$. Como do início do ensaio, até a extinção das chamas, decorreram-se 1.865s, a quantidade de calor liberada foi de $19,86\text{MJ/kg}$, e a potência média da combustão no ensaio foi de $10,65\text{kW/kg}$.

Os históricos das concentrações médias de O_2 e de CO_2 são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio e só serão mostrados, caso alguma diferença significativa de comportamento dos corpos tratados deva ser explicada. A figura 5-29 mostra a evolução de temperaturas dos corpos de prova e da resistência do cone. Observa-se a influência da incidência da radiação da própria chama no aquecimento do corpo de prova, entre 500s e 1.500s.

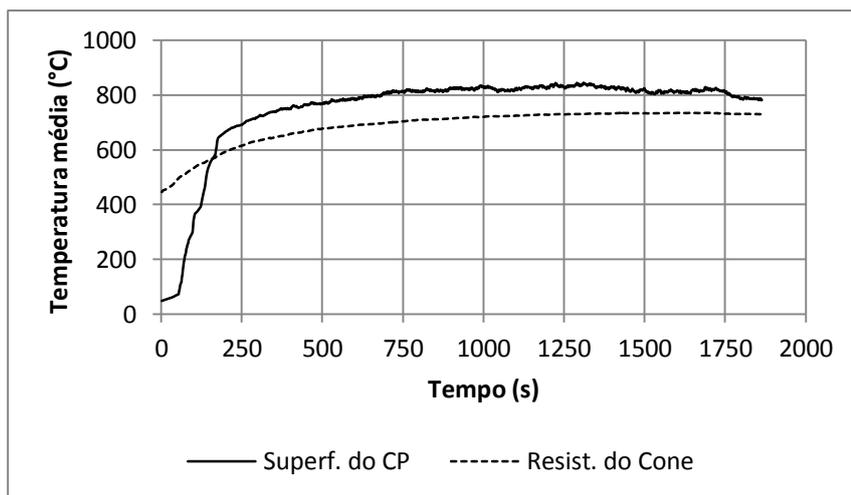


Figura 5-29: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio de corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 1%.

A figura 5-30 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução de permetrina em isoparafina a 1%.

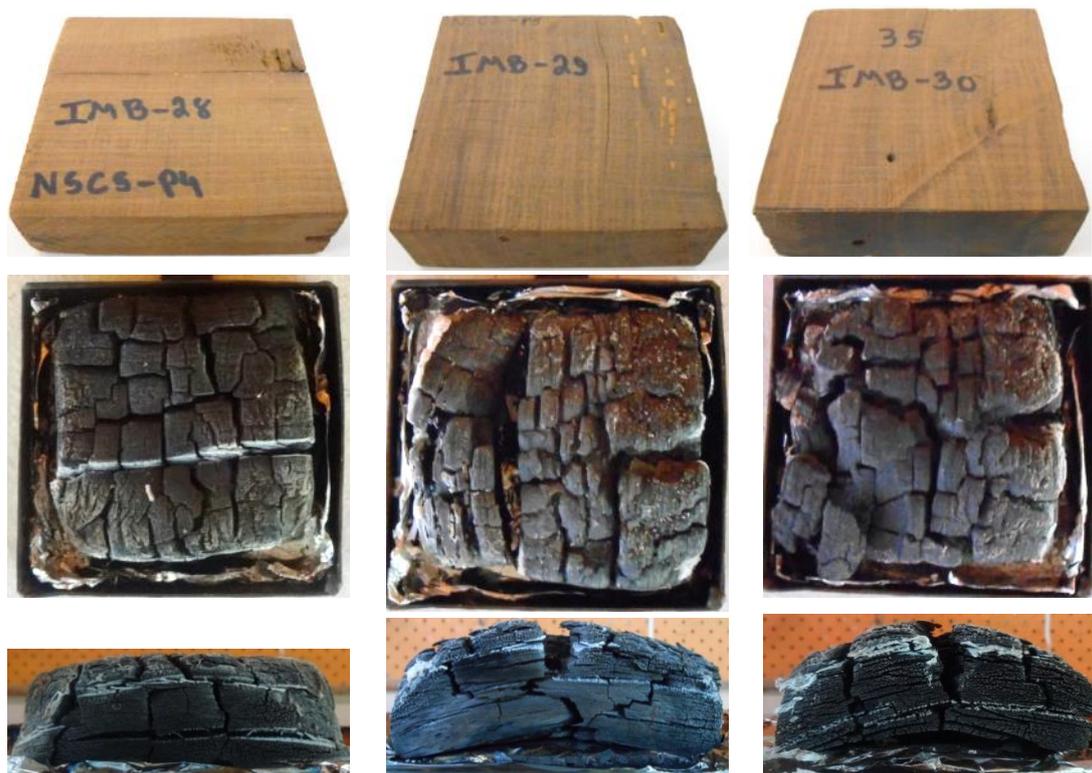


Figura 5-30: Aspecto das madeiras tratadas com solução de permetrina em isoparafina a 1%, antes e depois do ensaio. Fonte: arquivo pessoal.

5.7 Corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10% - ensaio médio

Os corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina, a uma concentração de 10%, apresentaram no ensaio médio o histórico da massa durante a combustão mostrado na figura 5-31, sendo S o desvio padrão médio. A massa total consumida foi de 157,24g, e a duração do ensaio foi de 1.768s. A figura 5-32 mostra o histórico da taxa de perda de massa desses corpos de prova após ajuste da curva para a média móvel de 15 períodos. A taxa de perda de massa nos 180s é 0,10g/s e, nos 300s após o início do ensaio, é 0,12g/s, sendo de 0,11g/s nos 1.200s da combustão.

O histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio é mostrado na figura 5-33. Observa-se o registro máximo da ordem de $362,5\text{kJ/m}^2$. A soma dos produtos da quantidade de calor liberada em um intervalo de 1s pela área do corpo de prova, seguido da divisão pela sua massa, gera a quantidade total do calor liberado, que é igual a $15,19\text{MJ/kg}$.

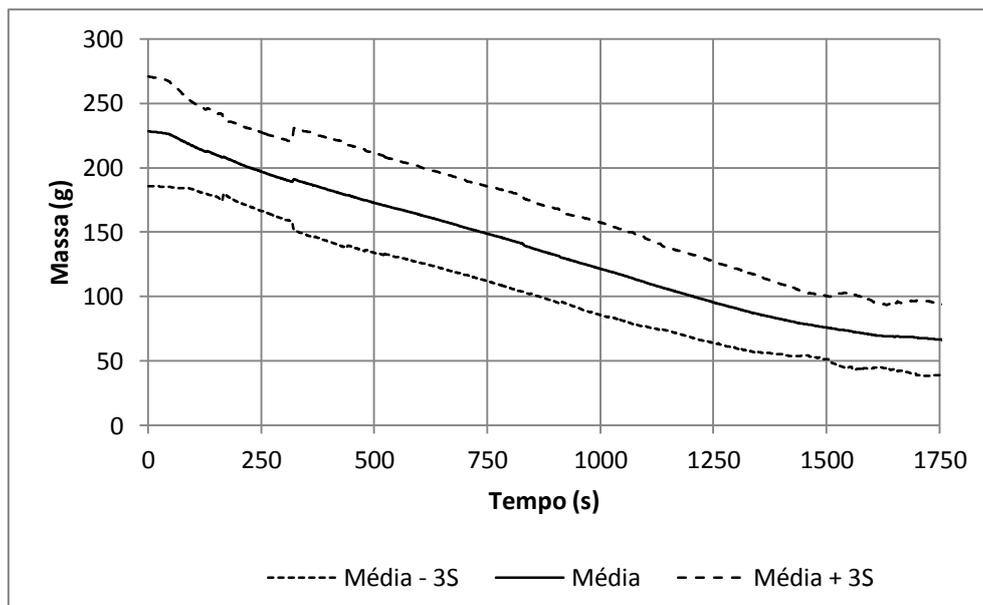


Figura 5-31: Histórico de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.

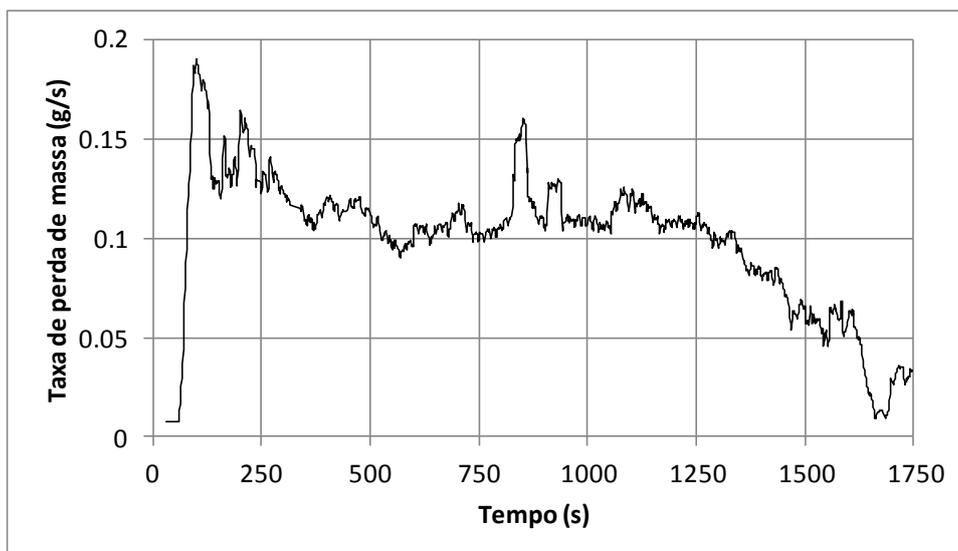


Figura 5-32: Histórico da taxa de perda de massa no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.

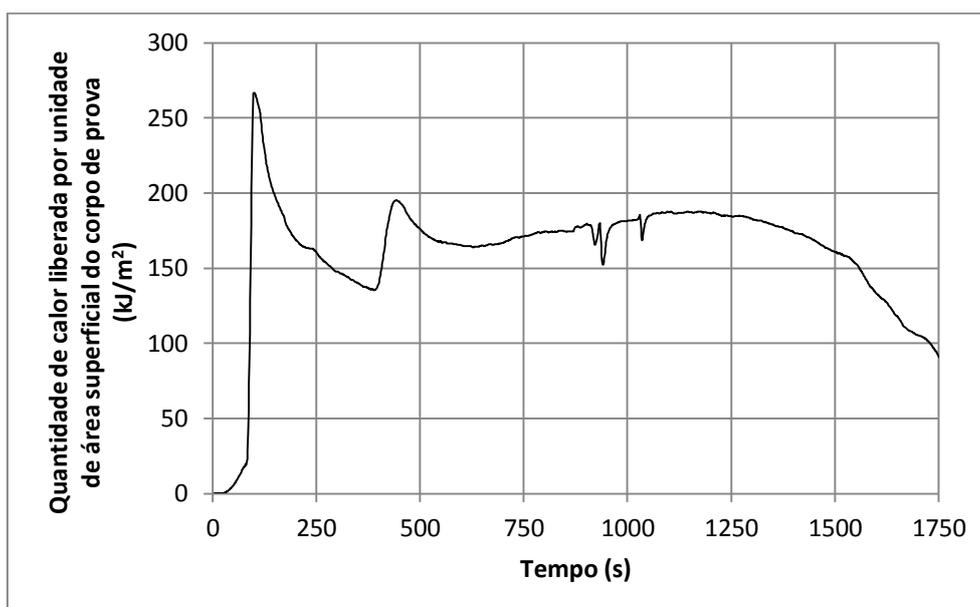


Figura 5-33: Histórico da quantidade de calor liberada por unidade de área no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.

A quantidade de calor liberada em 180s foi de 11,20MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo de 62,22kW/kg de madeira consumida. Em 300s, a quantidade de calor liberada foi de 11,18MJ/kg, correspondente a uma potência média da combustão nesse intervalo de tempo 37,27kW/kg de madeira consumida. Analogamente, em 1.200s a quantidade de calor liberada foi de 13,83MJ/kg, equivalente a uma potência média da combustão de 11,53kW/kg. Como do início do ensaio, até a extinção das chamas,

decorreram-se 1.768s, a quantidade de calor liberada foi de 15,19MJ/kg, e potência média da combustão no ensaio foi de 8,59kW/kg.

Os históricos das concentrações médias de O₂ e de CO₂ são todos coerentes com um bom desenvolvimento do ensaio e só serão mostrados, caso alguma diferença significativa de comportamento dos corpos tratados deva ser explicada. A figura 5-34 mostra a evolução de temperaturas dos corpos de prova e da resistência do cone. Observa-se a influência da incidência da radiação da própria chama no aquecimento do corpo de prova entre 500s e 1.500s.

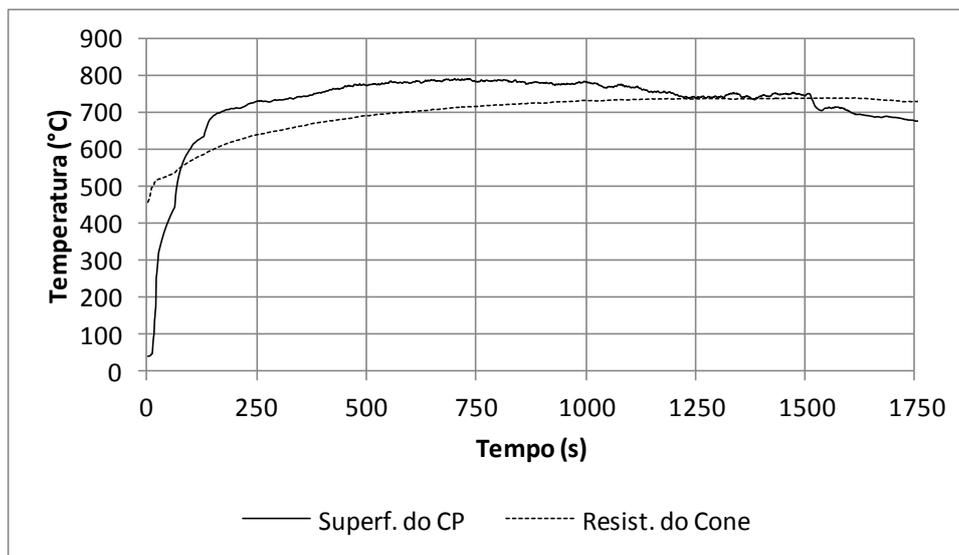


Figura 5-34: Históricos de temperaturas na superfície do corpo de prova e na resistência do cone no ensaio médio dos corpos de prova tratados com solução de permetrina em isoparafina a 10%.

A figura 5-35 a seguir ilustra o aspecto geral antes e depois da queima das três amostras tratadas com solução de permetrina em isoparafina, a 10%.

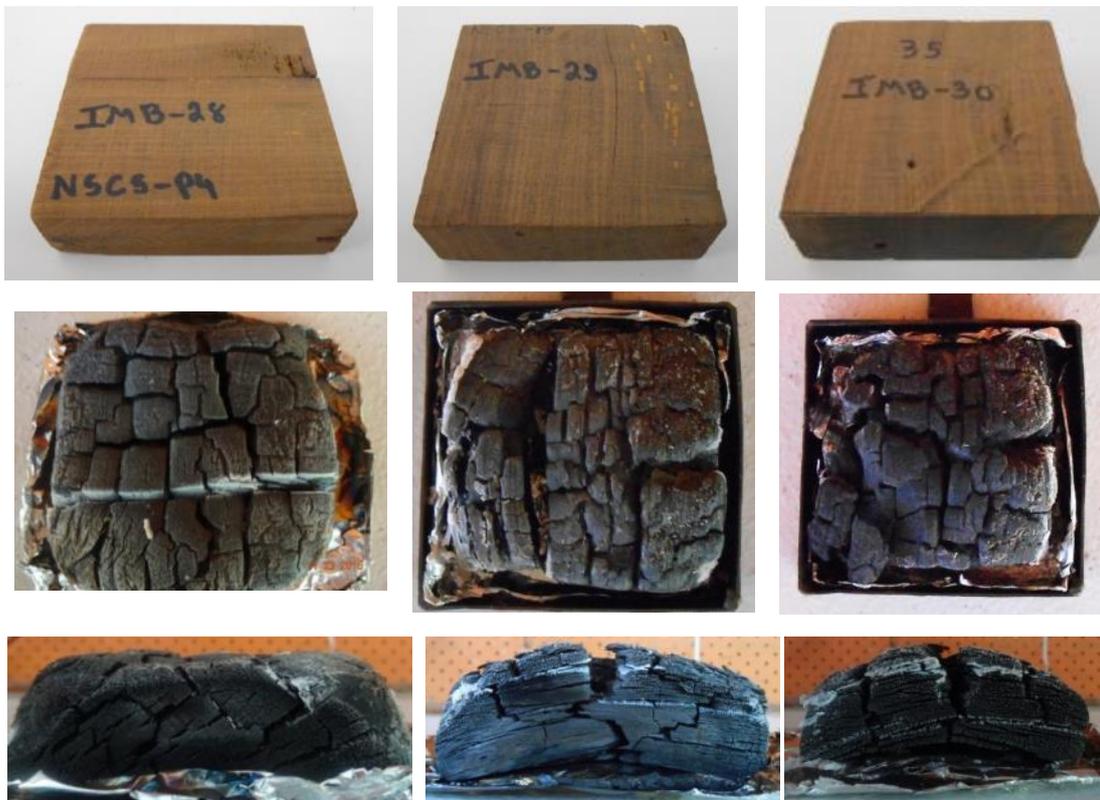


Figura 5-35: Aspecto das madeiras tratadas com permetrina diluída em isoparafina, a 10%.
Fonte: arquivo pessoal

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Radiação crítica e tempo de ignição

O gráfico do tempo de ignição, t_{ig} , em função da densidade aparente, ρ , radiação incidente, q'' , e da temperatura de ignição da superfície da amostra, T_{igs} , é mostrado na figura 6-1. Nesse caso, as amostras são todas termicamente espessas. Observa-se uma relação linear entre t_{ig} e o fator $\rho T_{igs}/q''$ com um coeficiente de correlação $R^2 = 0.6659$. Existem poucos dados nesta pesquisa para investigar uma relação polinomial ou exponencial entre t_{ig} , ρ , T_{igs} e q'' , mas a relação linear com o coeficiente de correlação moderado encontrado é suficiente para o propósito deste estudo. Assim, considerando ρ dado em g/cm³, T_{igs} em °C e em T_{igs} kW/m², pode ser estimado pela equação:

$$t_{ig} = 3.1 \frac{\rho T_{igs}}{q''} + 9.85.$$

(6.1)

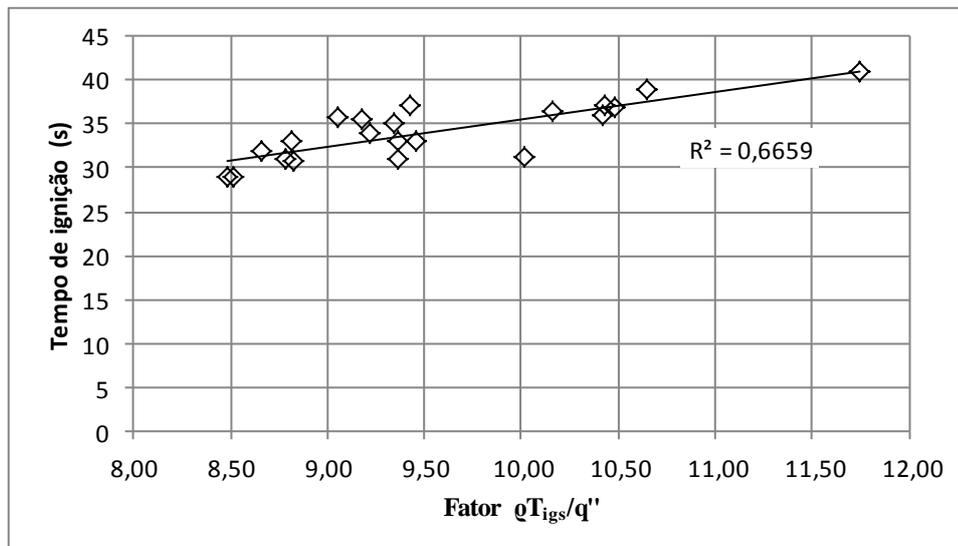


Figura 6-1: Tempo de ignição em função do fator $\rho T_{igs}/q''$.

Vários autores encontraram outras relações envolvendo ρ^a , q''^b , onde a e b são expoentes específicos dependentes das espécies de madeira e da espessura das amostras. Chew (2013) analisou os resultados de vários autores e propôs a seguinte equação para o cálculo do tempo de ignição:

$$t_{ig\ Chew} = \frac{144\rho^{0.73}}{(q'' - 28)^{1.82}} \quad (6.2)$$

Pode-se perceber nesta equação que, quando $q'' \rightarrow 28\text{ kW/m}^2$, $t_{ig} \rightarrow \infty$ isto é, 28 kW/m^2 é a radiação crítica. Comparando $t_{ig\ Chew}$ da equação (6.1) com os valores medidos, foram encontrados grandes erros como é mostrado na figura 6-2. Assim, foi feita a hipótese de que a idade da madeira e o tratamento das amostras podem ser responsáveis pela redução do t_{ig} . Ensaio sucessivos controlados pelo valor absoluto dos erros medidos e calculados de t_{ig} sugerem o valor da irradiância crítica de 16 kW/m^2 . Para verificar essa conclusão, optou-se por fazer um teste estatístico de hipótese comparando as médias do t_{ig} medido (primeira série), e t_{ig} calculado com irradiância crítica de 16 kW/m^2 (segunda série), sendo a hipótese nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$, e a hipótese alternativa $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, sendo μ_1 e μ_2 as médias da primeira e segunda distribuições Gaussianas, respectivamente:

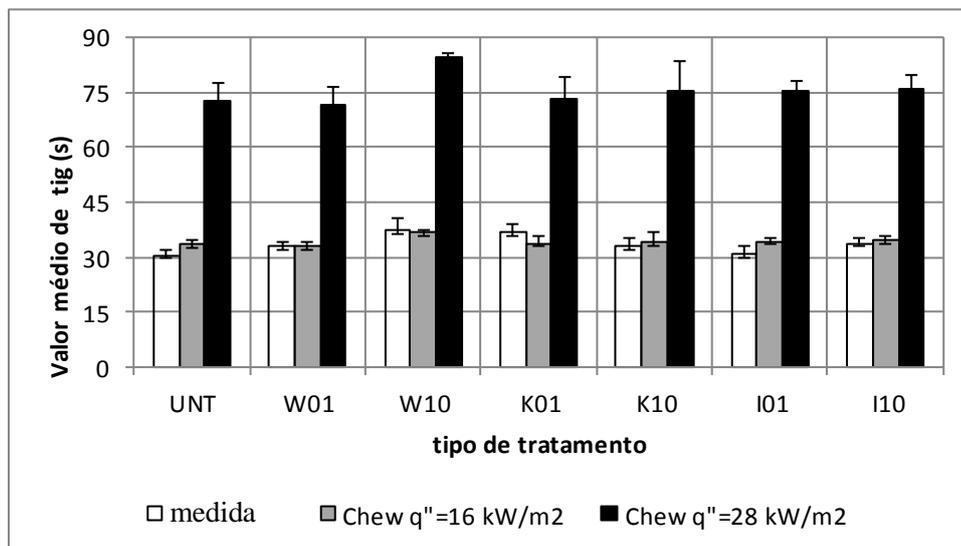


Figura 6-2 Comparação de erros entre t_{ig} (s) medidos e os calculados por Shi-Chew.

Tomando a média dos valores medidos e calculados de t_{ig} , $\bar{x}_1 = 33.7\text{ s}$ e $\bar{x}_2 = 34.3\text{ s}$, respectivamente, como boas aproximações da média das distribuições Gaussianas, sendo os desvios-padrão $\bar{s}_1 = 2\text{ s}$ e $\bar{s}_2 = 1.3\text{ s}$, o desvio padrão da distribuição $\mu_1 - \mu_2$ é estimado por:

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

(6.3)

onde $n_1 = n_2 = 21$ que dá $s = 1.687$ s.. O valor da variável padrão é:

$$t_{calc} = \frac{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) - 0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 1,63$$

(6.4)

Assim, com uma probabilidade de 5% de cometer um erro do tipo I, rejeitando uma hipótese verdadeira, o valor crítico da distribuição de Student é $t_{crit} = 2,080 > 1,63$ e a hipótese H_0 é aceita para concluir que a carga de irradiância de 16kW/m^2 está suficientemente próximo da irradiância crítica das amostras de madeira de Imbuia investigadas (figura 6.3). Esse achado é importante, considerando que sugere que a estrutura de madeira dos telhados, tratada ou não, pode iniciar uma ignição com irradiância relativamente baixa.

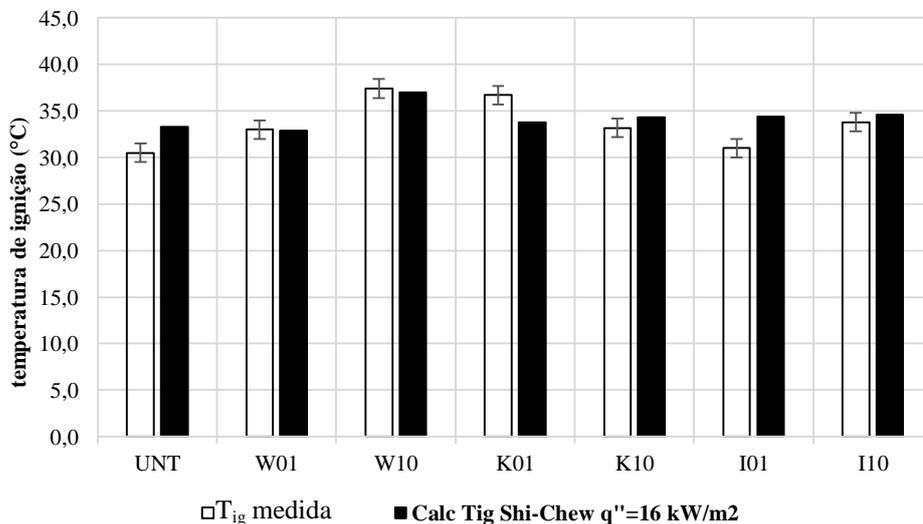


Figura 6-3: Comparação de T_{ig} medido e Shi-Chew calculado com irradiância crítica $q'' = 16 \text{ kW/m}^2$.

6.2 Temperatura da superfície da amostra tratada

Traçando a temperatura média da superfície da amostra no início da ignição para as amostras tratadas, em função do fator $q'' t_{ig}^2 / \rho$, uma forte relação linear com o coeficiente de correlação $R^2 = 0.9609$ é observada, como é mostrado em figura 6.4. Assim, conclui-se que as amostras tratadas T_{igs} (°C) podem ser estimadas por:

$$T_{igs} = 2.47 \frac{q'' t_{ig}^2}{\rho} + 303 \quad (6.5)$$

onde q'' é dado em kW/m^2 , t_{ig} é medido em s e ρ em kg/m^3 .

Para as conclusões das equações (6.1) e (6.5) deve-se levar em consideração que foram ensaiadas apenas dezoito amostras de madeira de Imbuia tratadas na pesquisa, em um total de vinte e uma amostras, conforme descrito anteriormente, com uma densidade aparente média $\bar{\rho} = (0.929 \pm 0.02) g/cm^3$, espessura média $L = (3,01 \pm 0,07) mm$ e submetidas a uma irradiância média $q'' = (50.12 \pm 0.88) kW/m^2$. A faixa de temperatura de ignição medida foi de cerca de 424 - 588°C. Mehaffey (2002) *apud* Shi e Chew (2003), verificaram que a temperatura de ignição da madeira varia de 264 a 558°C. Analogamente, Babrauskas (2001) encontrou uma faixa de 200 - 510°C. Embora não ignore a influência da espessura da amostra e da densidade aparente em diferentes experimentos, a equação (6.5) sugere que o tratamento da madeira, conforme descrito neste trabalho, contribui para aumentar a temperatura de ignição em cerca de 30°C - 78°C.

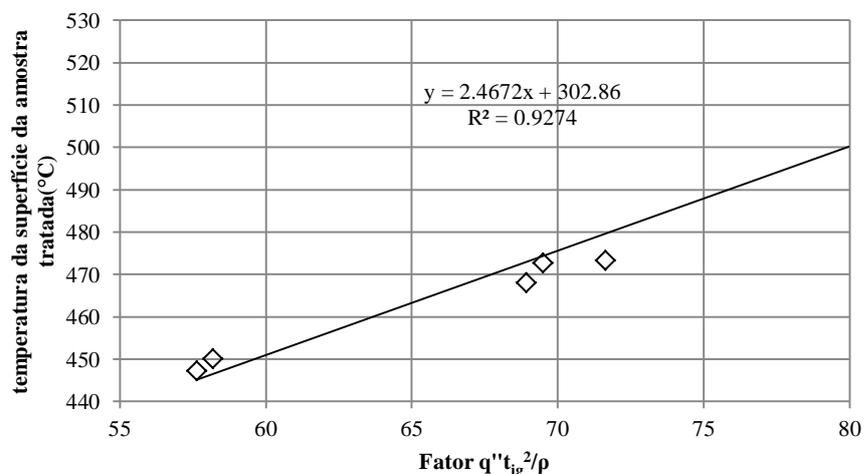


Figura 6-4: Temperatura da superfície da amostra tratada em função do fator $q'' t_{ig}^2 / \rho$.

6.3 Taxa de perda de massa

Foi observado que a duração dos experimentos, desde o aparecimento de uma chama visível até o seu apagamento e massa final queimada, variam. Assim, a comparação da taxa de perda de massa das amostras tratadas e não tratadas apresenta um problema difícil. Nesta pesquisa, decidiu-se medir a taxa de perda de massa específica média (SMLR, em g/m^2s) em 1.200s a partir do instante em que a chama visível aparece, e que pode ser definida como:

$$SMLR_{ave1200} = \frac{m_o - m_{1200}}{1200A_{ave}} \quad (6.6)$$

onde m_o é a massa inicial da amostra, m_{1200} é a massa queimada em 1200 s, A_{ave} é a área superficial média da amostra. O tempo de 1.200s (20 minutos) foi considerado entendendo que seja suficiente para a primeira intervenção de combate dos bombeiros oficiais em um incêndio. Assim, a modelagem de fogo em um edifício histórico com estrutura de madeira deve considerar a limitação da massa queimada nesse período. A tabela 6.1 mostra essas quantidades importantes e t_{50} , o tempo para queimar metade da massa original m_{50} .

Tabela 6-1: Características de combustão de amostras tratadas e não tratadas.

Tipo de tratamento	Massa total queimada (g)	Massa total queimada (% of m_o)	m_{1200} (g)	m_{1200} (% of m_o)	$SMLR_{ave1200}$ ($g/m^2 s$)	t_{50} (s)
UNT	155.22	71.22	123.23	56.54	11.28	1046
W01	157.05	70.79	123.57	55.70	11.27	1076
W10	161.29	71.03	132.07	58.17	12.07	1014
K01	157.42	72.14	130.48	59.80	11.81	1000
K10	163.02	72.95	136.62	61.13	12.39	972
I01	165.36	71.56	134.64	58.27	12.25	1030
I10	161.90	72.63	136.74	61.34	12.52	995

Considerando apenas as amostras tratadas, verifica-se que a massa total queimada ($M_{b\ total}$) em função da massa total original é dada em g por:

$$M_{b\ total} = [0.6(1 + C/10)]M_o + 25 \quad (6.7)$$

sendo C (%) a concentração de permetrina. A figura 6.5 mostra a relação entre as massas calculadas pela equação (6.7) e a massa queimada medida das amostras tratadas. A correlação $R^2 = 0.7405$ pode ser considerada aceitável para fins de segurança contra incêndio.

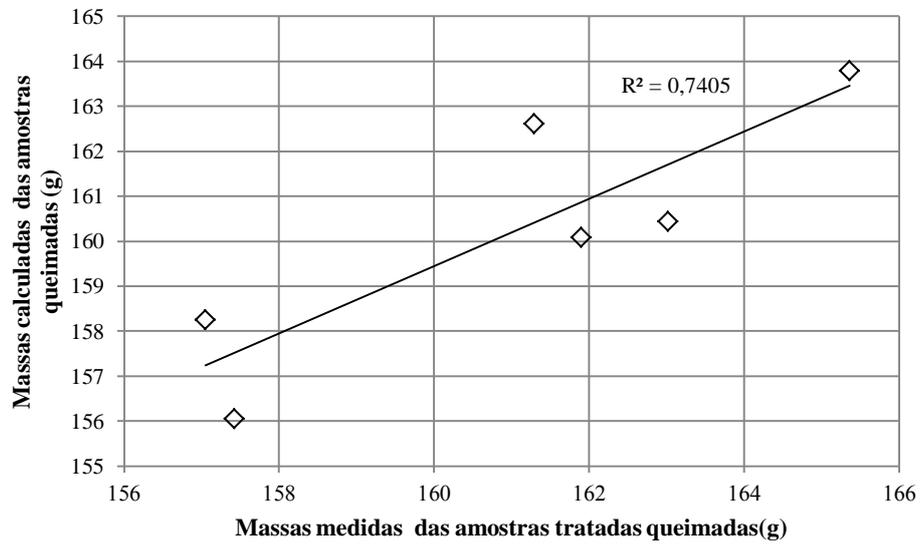


Figura 6-5: Correlação entre a massa queimada calculada e medida das amostras tratadas.

7 CONCLUSÕES

As amostras de madeira de Imbuia foram investigadas experimentalmente em calorímetro cônico, sob fluxo de calor de intensidade média de 50,12kW/m². Os resultados deste estudo são os descritos a seguir.

(1) As amostras tratadas têm uma irradiância crítica, definida como o fluxo mínimo de calor incidente para causar autoignição, de 16kW/m², 43% a menos do que o valor dado na literatura citada para amostras não tratadas. Ou seja, a madeira tratada com a permetrina, independente do solvente, tem maior probabilidade de incendiar em menores níveis de irradiância, do que as madeiras não tratadas contra insetos xilófagos.

(2) O tempo de ignição para amostras tratadas e não tratadas pode ser expresso por uma dependência de relação linear direta ($R^2 = 0,6659$) da densidade aparente e da intensidade do fluxo de calor, e inversa da temperatura de ignição. Como esperado, quanto maior a densidade da madeira, maior será o tempo necessário para a sua ignição, e maior deverá ser o fluxo de calor incidente.

(3) A temperatura de ignição para amostras tratadas pode ser expressa por uma dependência quadrática do tempo de ignição.

(4) A taxa de perda de massa específica aumenta com a concentração de permetrina e varia com a natureza do solvente (ver equação (6.7)); e o solvente que causa os maiores valores dessa perda é a isoparafina.

Conclui-se que a utilização da permetrina como pesticida pode acrescentar carga de incêndio e conseqüentemente aumento risco de incêndio nas edificações históricas. Esse risco deve ser somado à análise do risco de incêndio para definição de medidas de segurança, principalmente durante as obras de conservação e restauro, quando é mais comum a utilização do pesticida na desinfestação das estruturas e elementos em madeira.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como apontado no início deste trabalho, são escassos os dados fundamentais para a projeção de ações de prevenção e combate a incêndios, dados sobre o comportamento ao fogo dos materiais e sistemas construtivos, que fazem parte do patrimônio cultural edificado. Assim, com o intuito de evoluir a metodologia apresentada aqui e ampliar os dados sobre esses materiais, sugere-se como pesquisas futuras:

- (i) investigar a influência do tratamento em profundidade, em comparação com o método superficial, utilizado neste trabalho, em madeiras da mesma espécie e outras madeiras antigas;
- (ii) comparar o comportamento ao fogo de madeiras novas, provenientes de plantio, ao de antigas de mesma espécie;
- (iii) comparar a resposta ao fogo e a eficiência de ação inseticida de madeiras tratadas com a associação de biocidas e retardante de chamas, como investigado por Terzi *et al.* (2009) e Marney *et al.* (2008), porém considerando o contexto brasileiro: espécies de madeiras brasileiras e tratamentos utilizados no país como, a diluição de inseticida em aguarrás, tão comum nas desinfestações de elementos artísticos e integrados;
- (iv) investigar outros produtos protetivos, tradicionalmente utilizados nas madeiras do patrimônio cultural edificado, como as tintas esmalte ou tintas a óleo. Não somente comumente utilizados, esses acabamentos são exigidos pelos órgãos de proteção, para as madeiras nas fachadas das edificações dos centros históricos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, André Felipe de Figueiredo. **Relação entre a anatomia da madeira e a resistência mecânica de um híbrido de Eucalyptus (Lyptus®) submetido ao aquecimento**. 2013. 24 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - UFMG, Belo Horizonte, 2013.

ALMEIDA, Frederico Faria Neves. **Manual de Conservação de Madeiras**. Brasília: IPHAN/Programa Monumenta, 2005. 243 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1354-11: Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter**. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2011. 23 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4442 – 07: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood Base Materials**. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2007. 6 p.

ANJOS, Norivaldo dos; SILVA, Carolina Rocha da; MORAIS, Wagner Calixto de Castro. **Projeto de Desinfestação e de Imunização da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias - Ouro Preto, MG**. Projeto técnico. Departamento de Biologia Animal, UFV, Viçosa, 2009.

ARAÚJO, S. M. S. de; SOUZA, V. C. M. de; GOUVEIA, A. M. C. de. **Análise de risco de incêndio em cidades históricas brasileiras: a metodologia aplicada à cidade de Ouro Preto**. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, v. 5, n. 1, p. 55-67, maio 2005. Disponível em: <<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/91/91>>. Acesso em: 06 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais. Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p. Disponível em: <<http://pergamum.ifmg.edu.br/pergamum/biblioteca/index.php>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636: Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814: Adobe – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 26 p.

BABRAUSKAS, Vytenis. **Heat Release Rates. Handbook of Fire Protection Engineering.** Chapter 1. Section Three. 3. ed. Society of Fire Protection Engineers. SFPE. National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts, USA, 2002. 1605 p.

BABRAUSKAS Vytenis. **Ignition of wood: a review of the state of the art.** In: The ninth Interflam, 2001. Edinburgh, Scotland: Interscience Communications, 2001.

BABRAUSKAS, Vytenis. **The Cone Calorimeter of Fire Protection Engineering.** Chapter 3. Section Three. 3. ed. Society of Fire Protection Engineers. SFPE. National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts, 2002, USA, 1605 p.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 7. ed. USA: John Wiley & Sons, 2011. 1072 p.

BERNI, C. A.; BOLZA, E.; CHRISTENSEN, F.J. **South American Timbers - The Characteristics, Properties and Uses of 190 Species.** CSIRO, 1979. Disponível em: http://www.synthmind.com/South_American_Timber.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.

BOTOSSO, Paulo Cesar. **Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento.** ISSN 1517-52X. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 65 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Portaria nº 443**, 17 dez. 2014. Flora Ameaçada. Brasília: DOU, 18 dez. 2014, seção 01. p. 110 a 121.

CARRASCO, Edgar Vladimir Mantilla; OLIVEIRA, Ana Lúcia Crespo; MANTILLA, Judy Norka Rodo. **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, abr.-jun., 2016.

CASTANHEIRA, Luciana. **Caracterização por meio do Conecalorímetro de Perda de Massa da Reação ao Fogo de Madeira Tratada com Fipronil.** 2018. 87 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. UFOP, Ouro Preto, 2018.

CASTRO, André. **Investigação teórico-experimental da combustão de madeira.** 2005. 212 folhas. (INPE-15657-TDI/1434). Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, Cachoeira Paulista, 2005.

CLARET-GOUVEIA, Antônio Maria. **Análise de Riscos de Incêndio em Sítios Históricos.** [Cadernos Técnicos 5]. Brasília, DF: IPHAN/ Programa Monumenta, 2006. 104 p.

CLARET-GOUVEIA, Antônio Maria. **Introdução à Engenharia de Incêndio – para estudantes, arquitetos, engenheiros, administradores de bombeiros.** Belo Horizonte: 3i Editora, 2017. 230 p.

CLARET-GOUVEIA, Antônio Maria; ARAÚJO, Sílvia Maria Soares de; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. **Análise de Risco de Incêndio em Cidades Históricas Brasileiras – A Metodologia Aplicada à Cidade de Ouro Preto.** Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Universidad de Puerto Rico. v. 5, p. 55-68, 2005.

CNCFlora. **Ocotea porosa.** In: Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2. Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Ocotea%20porosa>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

COMISSÃO DESIGNADA PARA FAZER AVALIAÇÃO DAS FAMÍLIAS ATINGIDAS. [Memorando]. Destinatário: Prefeito Municipal de Ouro Preto, Dr. Alberto Caram. Ouro Preto, 19 dez. 1977. Pasta Incêndios do Arquivo Público Municipal de Ouro Preto; Fundo: Preservação Histórica; Série: Governo; Subsérie: Incêndio; Incêndio Rua São José, ano 1977.

CONSTRUTORA AMBIENTAL. **Diário de Obra de Restauração da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição - Ouro Preto, MG.** [Relatório]. Instituto do Patrimônio

Histórico e Artístico Nacional. Ouro Preto, 2016. 426 p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica n. 04. Acesso de viaturas nas edificações e áreas de risco.** 2. ed. Aprovada pela portaria n. 18 de 27 jul. 2014. Belo Horizonte: Secretaria de Segurança Pública de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/images/stories/dat/it/it_04_acesso_de_viaturas_nas_edificacoes_e_areas_de_risco_2a_edicao.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica n. 05. Isolamento entre Edificações (Isolamento de Risco).** 1. ed. Aprovada pela portaria n. 05 de 25 de outubro de 2005. Belo Horizonte: Secretaria de Segurança Pública de Minas Gerais, 2005. Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/images/stories/dat/it/it_05_separacao_entre_edificacoes.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica n. 35. Segurança contra incêndio em edificações que compõem o patrimônio cultural.** 2. ed. Aprovada pela portaria n. 30 de 17 jul. 2017; alterada pela portaria n. 32 de 04 jan. 2018. Belo Horizonte: Secretaria de Segurança Pública de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/images/stories/dat/it/it_35_seguranca_contra_incendio_em_edificacoes_historicas_%20a_edio.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

COSMO, N. L.; LIRA, P. K.; MORESCO, G. C.; SOFFIATTI, P.; SOUSA, T. R. de; VASCONCELLOS, T. J. de; LISI, C. S.; BOTOSSO, P. C. **Dendroecologia da espécie *Ocotea porosa* (Imbuia), Lauraceae, em áreas de Floresta Ombrófila Mista na região de Faxinal do Céu, Paraná.** In: South American Dendrochronological Fieldweek, 5., 2009, Faxinal do Céu. Anais e resumos expandidos. Colombo: Embrapa Florestas; Curitiba: Copel, 2011. 8 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/busca-de-publicacoes/-/publicacao/913653/dendroecologia-da-especie-ocotea-porosa-Imbuia-lauraceae-em-areas-de-floresta-ombrofila-mista-na-regiao-de-faxinal-do-ceu-parana>>. Acesso em: 05 mar. 2018.

DIAS, Bruno; RIBEIRO, Simone; NASCIMENTO, Monique; LANDESMANN, Alexandre. **Avaliação da reação ao fogo em madeiras de edificações mineiras do período colonial brasileiro.** In: Anais do II Congresso Nacional para Salvaguarda do Patrimônio Cultural; 11-14 nov.2019. v. 1: Intervenção no Patrimônio Cultural. Cachoeira do Sul, RS, 2019. p.104-119. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/221/2020/03/II_CNSPC_2019__

Anais_Volume-1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2020.

DIETENBERGER, M.A.; HASBURGH, L.E. **Wood Products: Thermal Degradation and Fire**. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture-USDA, Madison, WI, USA, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.03338-5, 2016.

DOS S. MELO, Raquel M. P.; FERNANDES, Julio Israel; DA CRUZ VIEIRA, Vanessa P.; DE ASSIS RIBEIRO, Francisco; DA S. N. BOTELHO, Maria Clara; VEROCAI, Guilherme G., SCOTT; Fabio b. **Eficácia do Piretroide Permetrina no controle de Psoroptes ovis (HERING, 1838) (ACARI: PSOROPTIDAE) em Coelhos (Oryctolagus cuniculus) Naturalmente Infestados**. Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária. Jaboticabal, v. 17, n. 1, p. 55-58, ISSN: 0103-846X, 2008. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=397841469011>>. Acesso em: 30 set. 2020.

DRAGNET® SFR TERMITICIDE/INSECTICIDE. **Material Safety Data Sheet**. Philadelphia, PA, USA. FMC Corporation, 2017. [Revision]. n. 11. Disponível em: <https://labelsds.com/images/user_uploads/Dragnet%20SFR%20SDS%2011-14-17.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2020.

FERRAZ, Eugênio. **A Casa dos Contos de Ouro Preto: ensaio histórico e memória da restauração do seu bicentenário**. Belo Horizonte: Multicor Artes Gráficas, 1985. 170 p.

FIGUEIREDO, André *et al.* **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; 07-09 jun. 2011, Coimbra, Portugal.

FONSECA, M. A. da; SOBREIRA, F. G. **Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil**. Geotecnia, Lisboa, v. 92, p. 5-28, 2001. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/4105>>. Acesso em: 10 set. 2019.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO. Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração de Imagens Sacras: Capela São Sebastião – Acaiaca, MG.** Ouro Preto, out. 2012. 31 p.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO. Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração de Imagens Sacras: Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Cachoeira do Brumado - Mariana, Minas Gerais.** Ouro Preto, ago. 2012. 200 p.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração de Imagens Sacras: Igreja de Nossa Senhora da Glória Barro Branco - Mariana, MG.** Ouro Preto, ago. 2012. 48 p.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO. Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração de Imagens Sacras: Igreja de Nossa Senhora das Mercês e Perdões - Ouro Preto, Minas Gerais.** Ouro Preto, ago. 2012. 137 p.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO. Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração de Imagens Sacras: Museu Arquidiocesano de Arte Sacra - Mariana, Minas Gerais.** Ouro Preto, jun./2012. 133 p.

FUNDAÇÃO DE ARTE DE OURO PRETO. Núcleo de Conservação e Restauração. **Relatório de Restauração dos Elementos Artísticos da Igreja de Nossa Senhora da Soledade – Distrito de Lobo Leite, Congonhas, MG.** [Relatório]. Ouro Preto, maio 2009. 105 p.

GEMAQUE, M. J. A. **Flammability characteristics of Polymers with Application to Aero spatial Sector.** 2012. 445 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Combustão e Propulsão). National Institute of Spatial Research, Sao Jose dos Campos, SP, 2012.

GONZAGA, Armando Luiz. **Madeira: Uso e Conservação** [Cadernos Técnicos 6]. Brasília, DF: IPHAN / Programa Monumenta, 2006. 246 p.

GREXA, Ondrej; LUBKE, Henrich. **Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter.** Polymer Degradation and Stability, v. 74, p. 427-432, 2001.

GUERRA, Rafael Angel Torquemada (org.). **Anatomia Vegetal**. [Cadernos CB Virtual 4] João Pessoa: Editora Universitária, 2011. 50 p. Disponível em: <http://portal.virtual.ufpb.br/biologia/novo_site/Biblioteca/Livro_4/7-Anatomia_Vegetal.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2020.

HARADA, Toshiro. **Time to ignition, Heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test**. Fire and Materials, n. 25, DOI: 10.1002/fam.766, p. 161-167, 2001.

HARUE SOFAL ARQUITETURA LTDA. **Projeto Executivo de Intervenção Arquitetônica e Paisagística Fazenda Samambaia, Zona Rural de Pedro Leopoldo – MG**. v. XXI. [Projeto técnico para o Instituto Yara Tupynambá]. Belo Horizonte, 17 jan. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 09 ago. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Fichas de Características das Madeiras Brasileiras**. Publicação IPT n. 1791. 2. ed. São Paulo: IPT, 1989. 418 p. Disponível em: <<http://www.ipt.br>>. Acesso em: 28 out. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras – Imbuia**. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/37-Imbuia.htm>. Acesso em: 14 nov. 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. Departamento de Identificação e Documentação. **Arquivo Noronha Santos**. Tem como atribuição a guarda e a preservação da documentação de valor permanente produzida no âmbito do IPHAN. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/ans.net/tema_consulta.asp?Linha=tc_belas.gif&Cod=1381>. Acesso em: 25 set. 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Gestão de Riscos de Desastres para o Patrimônio Mundial**. Brasília: UNESCO, IPHAN, 2015. 80 p.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **História de Ouro Preto (MG)**. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1493>>. Acesso em: 02 jul. 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Inventário Nacional dos Bens Imóveis dos Sítios Urbanos tombados dos Municípios de Ouro Preto e Mariana**. Rio de Janeiro, 2002.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Portaria nº 366**, 4 de set. 2018. Dispõe sobre diretrizes a serem observadas para projetos de prevenção e combate a incêndios e bens edificados tombados. Processo nº 01450.000258/2017-27. SEI nº 06991704. Brasília: IPHAN, 2018. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/portaria_n_3662018__incendios.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Restauração da Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias**. [Caderno de Restauração]. Belo Horizonte, 1982.76 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2015) ISO 5660-1 **Reaction to Fire Tests. Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate**. Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate. Dynamic Measurement. Geneva: ISO, 2015. 42 p.

JANSSENS, Marc. **CALORIMETRY**. Chapter 2. Section Three. 3. ed. Society of Fire Protection Engineers. SFPE. National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts, 2002, 1605 p.

JIN, Eui, CHUNG, Yeong-Jin. **Fire risk assessment of cypress wood coated with metal oxide and metal silicate flame retardant using cone calorimeter**. Journal of Fire Sciences v. 38, 6, 28 ago. 2020. p. 504-521. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734904120948215>>. Acesso em: 20 set. 2020.

KICKANTE. **Hotel Pilão após o incêndio**. Ouro Preto, MG. Eduardo Trópia. 2017. [Fotografia]. Disponível em: <<https://www.kickante.com.br/campanhas/desfile-de-moda-incendio-hotel-pilao-mg>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

KUHL, Beatriz Mugayar. **Arquitetura do ferro e arquitetura ferroviária em São Paulo: reflexões sobre a sua preservação**. São Paulo: Editora FAPESP, 1998. 435 p.

LAGE, Mario Cantizani Gomes. **Eficiência de Inseticidas para Preservar Madeira Contra Danos de Cupim Subterrâneo**. 2004. 70 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, UFRJ, Seropédica, 2004.

LANDESMANN, Alexandre; ROCHA, Monique. A. F. **Combustion properties of Brazilian natural wood species**. Fire and Materials, Wiley Online Library, DOI: 10.1002/fam.2281, 2014.

LORENZI, Herri. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**, v. 1. 5. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.

MARNEY, D. C. O; RUSSELL, L. J.; MANN, R. **Fire performance of wood (Pinus radiata) treated with fire retardants and a wood preservative**. Fire and Materials. Fire Mate, 2008 p. 357-370. Disponível em: <www.interscience.wiley.com>. Acesso em: 20 mar. 2020.

MASCARENHAS, Alexandre; MIGUEL, Sebastião (Org.). **Casa Bernardo Guimarães**. [Cadernos Ofícios; 1] ISBN 978-85-98721-08-8. Ouro Preto: FAOP, 2008. 79 p.

MEHAFFEY J. **Fire dynamics I: ignition and burning of solids**. [Notas de aula]. Ottawa, Canada: Carleton University, 2002.

MENDES, Alfredo de Souza; ALVES, Marcus Vinicius da Silva. **A degradação da madeira e sua preservação**. Brasília; IBDF/DPq-LPF, 1988.

MENDES, Francisco (Chico) Roberval; VERÍSSIMO, Francisco (Chio); BITTAR, William. **Arquitetura no Brasil: de Cabral a D. João VI**. 2. ed. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2010.

MORRO DA QUEIMADA. **Histórico**. Apresenta a memória e a história do Morro da Queimada, Ouro Preto, MG. Disponível em: <<http://morrodaqueimada.fiocruz.br/historico-2.php>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MUSEU DO ALEIJADINHO. Criado em 1968 com a finalidade de conservar, preservar e difundir o acervo da Paróquia Nossa Senhora da Conceição em Ouro Preto. Disponível em: <<http://paroquiaconceicaoop.com.br/museu>>. Acesso em: 02 jul. 2019.

NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY. Dept. of Entomology. **Cupim de madeira seca**. [Fotografia]. Disponível em: <<http://imdap.entomol.ntu.edu.tw>>. Acesso em: 25 de jul. 2019.

NEVES, André Emanuel Paulos Santiago das - **Avaliação, tratamento e consolidação de madeira em edifícios antigos**. 2013. 157 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

OLENDER, Mônica Cristina Henriques Leite. **A técnica do pau a pique: subsídios para a sua preservação**. 2006. 146 folhas. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFBA, Salvador, 2006.

PINTO, Edna Moura. **Proteção Contra Incêndio pra Edificações em Madeira**. 2001. 157 folhas. Dissertação (Mestrado em Arquitetura na Área de Tecnologia do Ambiente Construído) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2001.

PINTO, Edna Moura; JUNIOR, Carlito Calil. **Comportamento da madeira exposta ao fogo**. Revista da Madeira. 128 ed., ago. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1546&subject=Combust%E3o&title=Comportamento%20da%20madeira%20exposta%20ao%20fogo>. Acesso em: 30 nov. 2019.

PORTOCARRERO, José Afonso Botura. **Bái a casa Bóe: Bái, a casa Bororo: uma história de moradia dos índios Bororó**. 2018. 141 folhas. Dissertação (Mestrado em História) - Instituto de Ciências Humanas e Sociais, UFMT, Cuiabá, 2018.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Dossiê de Tombamento do Conjunto Arquitetônico Sylvio de Vasconcellos**. Belo Horizonte, 2006. 64 p. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/noticia/sylvio_de_vasconcellos.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019

PREFEITURA MUNICIPAL DE OURO PRETO. **Fórum de Ouro Preto incendiado em 1949**. Acervo do fotógrafo Luiz Fontana. Disponível em: <<https://ouropreto.mg.gov.br/luizfontana>>. Acesso em: 01 fev. 2020.

PRÓXIMA TRIP. **Vista aérea de Ouro Preto, da região da Praça Tiradentes**. [Fotografia]. Disponível em: <www.proximatrip.com.br>. Acesso em: 04 nov. 2020.

QUINTIERE, J. G. **A semi-quantitative model for the burning rate of solid materials**. National Institute of Standard Technology (NIST). Gaithersburg, MD, USA, NISTIR 4840, 1992.

RIBEIRO, Cláudio Rezende; SIMÃO, Maria Cristrina Rocha. **Memória e direito à cidade: Políticas urbanas contemporâneas de Ouro Preto**. Revista Thésis, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 180-195, jul./dez. 2016.

ROCHA, Monique. A. F. **Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras**. 2014. 147 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

RODRIGUES, José Wash. **A Casa de Moradia no Brasil Antigo (1945)**. In: Arquitetura Civil I. São Paulo: MEC-IPHAN e USP-FAU, 1975. P. 285-318.

RODRIGUES, Romana Margarida Silva Costa de Oliveira, **Construções Antigas de Madeira: Experiência de Obra e Reforço Estrutural**. 2004. 287 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Minho, Portugal, 2004.

SALUS ENGENHARIA LTDA. **Diagnóstico Estrutural / Anteprojeto: Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição – Ouro Preto, MG**. [Relatório]. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2009. 42 p.

SEITO, Alexandre Itiu (coordenador) *et al.* **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: L Projeto Editora, 2008. 496 p.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF**. Sistema de identificação, registro e análise de informações associadas às florestas naturais e plantadas do Brasil. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/especies-florestais>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

SHI, Long; CHEW, M. Y. L. **Experimental study of woods under external heat flux by auto ignition**. Journal of Therm Analysis and Calorimetry. jan. 2012. p. 1399–1407.

SILVA, José de Castro. **Madeira preservada e seus conceitos**. Revista da Madeira. Viçosa, 103 ed., mar. 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira>. Acesso em: 30 nov. 2019.

SIMÃO, Maria Cristina R.; CAVALAZZI, Rosângela L. **Preservação do Patrimônio Urbano e Direito à Cidade; intervenções e desvios.** In: The Overarching Issues of the European Space: Society, Economy and Heritage in a Scenario. Porto: FLUP, 2017, p. 289-300.

SMITH, Robert C. **Arquitetura civil no período colonial.** In: Arquitetura Civil I. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU, USP e Ministério da Educação e Cultura - MEC, IPHAN, 1975, p. 95-190.

SOLVEN. **Uso da isoparafina na dedetização.** 25 maio 2019. Disponível em: <<https://solven.com.br/solvente-ecologico/uso-da-isoparafina-na-dedetizacao>>. Acesso em: 13 dez. 2020.

SPEARPOINT, M.J. **Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model.** 1999. 430 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Proteção contra Incêndios) - National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 1999.

TERZI, E.; KARTAL, S.N.; WHITE, R. H.; SHINODA, K.; IMAMURA, Y. **Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants.** European Journal of Wood and Wood Products. 2009. v. 69. p. 41-51.

TRAVESSA CONSERVAÇÃO E RESTAURO LTDA. **Projeto de Conservação e Restauração de Elementos Integrados: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Ouro Preto, MG.** [Projeto]. IPHAN, 2009. 177 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC. Pró-reitoria de Extensão e Cultura. **Cupim de solo (*Heterotermes tenuis*).** [Fotografia]. Disponível em: <<https://proec.ufabc.edu.br/cupim/heterotermes-tenuis/>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

VALE, Fernando Henrique Aguiar. **Identificação de Madeiras.** [Laudo técnico]. Solicitante: Paola M. G. Dias Villas Boas – IFMG – Campus Ouro Preto. Belo Horizonte: Departamento de Botânica – ICB – Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 2 p.

VASCONCELLOS, Sylvio de. **Arquitetura no Brasil: Sistemas Construtivos**. 5 ed. Revisão e notas [de] Suzy P. de Mello. Ilustrações [de] Marina E. Wasner Machado. Belo Horizonte: UFMG, 1979, 186 p.

VASCONCELLOS, Sylvio de. **Vila Rica: formação e desenvolvimento – residências (1956)**. 2 ed. [Debates; 100]. São Paulo: Perspectiva, 2011.

VAUTHIER, L.L. **Casas de Residência no Brasil**. In: *Arquitetura Civil I*. Introdução de Gilberto Freire (1943). São Paulo: FAU-USP e MEC-IPHAN, 1975, p. 47-94.

VIEIRA, Liliane de Castro. **As transformações de Ouro Preto no século XX: estudo comparativo entre os inventários de 1949 e 2002**. 2006. 157 folhas. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFBA, Salvador, 2006.

VITRÚVIO. **Tratado de Architectura** (título original: *De Architectura*; tradução do latim, introdução e notas por M. Justino Maciel). Lisboa: IST Press, 2006. 454 p.

WE DEDETIZAÇÃO. **Relatório de Serviços de dedetização da Fazenda Samambaia**. Pedro Leopoldo, MG. 2016. 1 p.

WEIMER, Gunter. **Arquitetura popular brasileira**. 1. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2005. 334 p.