



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Tese de Doutorado

**" CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DO CONECALORÍMETRO
DE PERDA DE MASSA DA REAÇÃO AO FOGO DE
MADEIRA TRATADA COM FIPRONIL "**



Autora: Luciana Gomes Castanheira



Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret Gouveia

Fevereiro de 2018



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Luciana Gomes Castanheira

" CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DO CONECALORÍMETRO DE PERDA DE MASSA DA REAÇÃO AO FOGO DE MADEIRAS TRATADAS COM FIPRONIL "

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret Gouveia

Ouro Preto, fevereiro de 2018

C346c

Castanheira, Luciana Gomes.

Caracterização por meio do conecalorímetro de perda de massa da reação ao fogo de madeira tratada com FiPRONIL [manuscrito] / Luciana Gomes Castanheira. - 2018.

87f.: il.: color; grafs; tabs.

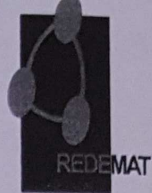
Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Claret Gouvea.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Combustão - Medição. 2. Inseticidas - Fipronil. 3. Madeira - Proteção contra o fogo. 4. Madeira - Densidade. I. Gouvea, Antonio Maria Claret. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 620



**“Caracterização por Meio do Conecalorímetro de Perda de Massa da Reação
ao Fogo de Madeira Tratada com Fipronil”**

Autora: Luciana Gomes Castanheira

Tese defendida e aprovada, em 06 de fevereiro de 2018, pela banca
examinadora constituída pelos professores:

Antônio Maria Claret de Gouveia

Prof. Antônio Maria Claret de Gouveia (Doutor) – Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto

Ana Maura F. Rocha

Profª Ana Maura Rocha (Doutora)
INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Elisângela Martins Leal

Profª Elisângela Martins Leal (Doutora)
Universidade Federal de Ouro Preto

Hisashi Inoue

Prof. Hisashi Inoue (Doutor)
Universidade Federal de São João del rei
Campus Alto Paraopeba

Ricardo Pinheiro Domingues

Prof. Ricardo Pinheiro Domingues (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto (Inativo)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouvêia, principalmente pela confiança em minha capacidade. Obrigada pela oportunidade, paciência e aprendizado.

Ao Prof. Dr. Alexandre Landesmann, pela ajuda, pelo laboratório da COPPE/UFRJ.

A todos os membros do Programa de Pós-Graduação, e à sempre prestativa Ana.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Em especial à minha família, a quem devo minha vida, formação pessoal e intelectual. Em especial aos meus pais Paulo e Auxiliadora. Ao meu esposo David Hebert Vieira, que por várias vezes me substituiu em alguns afazeres para que eu concluísse esta etapa. E aos meus filhos Renan Castanheira Vieira e Caio Castanheira Vieira, que mesmo sem saber, eram incentivos para não desistir da caminhada. Obrigada pela confiança e amor em mim depositados.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCPM – Cone calorímetro de perda de massa
HRR – taxa de liberação de calor
PHRR – pico da taxa de liberação de calor
PHRR₁₈₀ – taxa liberação de calor 180 segundos após a ignição
PHR₃₀₀ – taxa liberação de calor 300 segundos após a ignição
THR – calor total liberado
MHRR – média do calor liberado
TML – massa total perdida
MLR – taxa de perda de massa
EHC – calor efetivo de combustão
TTI – tempo decorrido até ignição
TIG – temperatura de ignição
TOP – tempo de pirólise
FSI – *flame spread index* - índice de espalhamento de chama
IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas
CE – Concentrado emulsionável
MAP – fosfato de monoamônio
DAP – fosfato de diamônio
AS – sulfato de amônio
 β – parâmetro de aceleração
OSB – painéis de feixe orientados
BX/BA – ácido bórico
PV – água de cal
FR1 a FR4 – retardadores de chama tipo 1 a 4
CuN – nitrato de cobre

FPI – índice de desempenho ao fogo
CCA – casca de arroz
ID – identificação do grupo
CPs – corpos de prova
NT – não tratada
EU – eucalipto
PI – pinus
IP – ipê
CU – curupixa
SU – sucupira
PA – paraju
AN – angelim
K –condutividade térmica
I – intensidade de radiação
 ρ – densidade aparente
c – calor específico
CSC – combustão sem chamas
 t_{CSC} – tempo de combustão sem chamas
 \bar{t}_{CSC} – tempo de combustão sem chamas médio
JA – jatobá
MU – muiracatiara
 $\Delta\dot{m}(t)$ – taxa de massa consumida
 $\Delta\bar{m}$ – média de massa consumida
 Δm_i – perda de massa inicial
 t_s – espessura da amostra

RESUMO

É notável que os antigos edifícios da arquitetura colonial no Brasil, a maioria deles igrejas impressionantes, são feitos de paredes de pedra grossas acabadas por peças de madeira esculpidas, douradas por folhas de ouro. Esses edifícios não são apenas símbolos importantes da história brasileira, mas seus conteúdos são de imenso valor histórico. Como a madeira é um material orgânico e heterogêneo, é muito susceptível a danos causados por um conjunto variado de agentes biológicos. Esta infestação que consome a madeira e o seu controle sem sucesso é uma causa importante de danos nesses edifícios e a primeira causa de restaurações emergenciais, com o tratamento da madeira contra a ação de cupins sendo uma fase essencial destes serviços. Porém, isto aumenta a carga de incêndio e muitas vezes tem um impacto indesejável na sua inflamabilidade. O objetivo da tese é investigar o efeito do fipronil no comportamento de incêndio de 9 espécies brasileiras de madeira comercial, contribuindo para o conhecimento teórico-experimental das características de combustão destas madeiras. Foram testadas 27 amostras sem tratamento, comparando com 54 amostras tratadas contra ataques de insetos com soluções de fipronil dissolvido em querosene, em concentrações de 5% e 10% em volume. As amostras utilizadas para este estudo foram preparadas de acordo com a norma ISO 17554 (2014) e ISO 13927 (2015), foram secas no forno, irradiadas com um fluxo de calor constante de 50kW/m² ortogonal à orientação das fibras, utilizando o equipamento cone calorímetro de perda de massa (CCPM), de acordo com as especificações da norma ISO 5660-1 e ASTM-E1354-11b. A definição das características de combustão de um material é uma etapa fundamental no modelamento de incêndios que, por sua vez, é necessário ao desenvolvimento de projetos de segurança para edificações que utilizam a madeira tratada. É, portanto, imprescindível estudar o comportamento do fogo em madeiras tratadas. Foram obtidos resultados para taxa de liberação de calor (HRR), pico da taxa de liberação de calor (PHRR) e liberação de calor total (THR), perda de massa total (TML) e taxa de perda de massa (MLR), calor efetivo de combustão (EHC), bem como tempo de ignição (TTI) e temperatura de ignição (TIG). Algumas conclusões do trabalho são: (i) a influência do uso do fipronil é bastante variável de acordo com a madeira utilizada; (ii) as taxas de liberação de calor são importantes para a classificação dos materiais, bem como muito sensíveis, exigindo uma melhoria na medição para compensar perdas de calor radiante; (iii) analisando o EHC, é possível classificar a madeira Paraju como a que desenvolveu as melhores características de

reação ao fogo com o tratamento e sua taxa de liberação de calor ao longo do tempo, apresentando também o menor β ; (iv) o eucalipto também mostrou um bom desempenho, no entanto, quando tratado com 10% de concentração de fipronil, o calor efetivo de combustão aumentou consideravelmente.

Palavras chave: combustão, fipronil, calorímetro de perda de massa, tratamento de madeiras.

ABSTRACT

It is notable that the old buildings of colonial architecture in Brazil, most of them impressive churches, are made of thick stone walls finished by carved pieces of wood, gilded with golden leaves. These buildings are not only important symbols of Brazilian history, but their contents are of immense historical value. As wood is an organic and heterogeneous material, it is very susceptible to damage caused by a varied set of biological agents. This infestation that consumes timber and its unsuccessful control is a major cause of damage to these buildings and the first cause of emergency restorations with timber treatment against termite action being an essential phase of these services. However, this increases the fire load and often has an undesirable impact on its flammability. The aim of the thesis is to investigate the effect of fipronil on the fire behavior of 9 Brazilian commercial wood species, contributing to the theoretical and experimental knowledge of the combustion characteristics of these woods. Twenty-seven untreated samples were tested, comparing with 54 samples treated against insect attacks with solutions of fipronil dissolved in kerosene in concentrations of 5% and 10% by volume. The samples used for this study were prepared according to ISO 17554 (2014) and ISO 13927 (2015), were dried in the oven, irradiated with a constant heat flux of 50 kW / 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. The definition of the combustion characteristics of a material is a fundamental step in fire modeling which, in turn, is necessary for the development of safety designs for buildings that use the treated wood. It is, therefore, essential to study the behavior of fire in treated wood. The results were obtained for the heat release rate (HRR), the peak of the heat release rate (PHRR) and total heat release (THR), total mass loss (TML) and mass loss rate (MLR). (ECH) as well as ignition timing (TI) and ignition temperature (IGT). Some conclusions of the study are: (i) the influence of the use of fipronil, is quite variable according to the wood used; (ii) heat release rates are important for classification of materials as well as very sensitive, requiring an improvement in measurement to compensate for losses of radiant heat; (iii) by analyzing the EHC, it is possible to classify Paraju as the wood that developed the best characteristics of fire reaction with the treatment and its rate of heat release over time, also presenting the lowest β ; (iv) eucalyptus also showed good performance, however, when treated with 10% concentration, the effective heat of combustion increased considerably.

Keywords: combustion, fipronil, mass loss calorimeter, wood treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Incêndio em edificações históricas.....	2
Figura 1.2: Incêndio no antigo Fórum de Ouro Preto.....	3
Figura 2.1: Modo Horizontal.....	14
Figura 2.2: Modo Vertical.....	15
Figura 2.3: (a) Relação entre a temperatura da superfície e a velocidade da chama, entre as amostras vertical e horizontal. (b) Relação entre a irradiação externa e o tempo para ignição, entre as amostras vertical e horizontal.....	16
Figura 2.4: Média do HRR durante um minuto para os seis tipos de madeira.....	17
Figura 2.5: EHC em corpo de prova de madeira com fluxo de calor incidente de 50kw/m^2 ... 18	
Figura 2.6: (a) HRR em função do tempo para madeira não tratada e tratadas com retardantes de chama. (b) Média do HRR para as mesmas amostras.....	20
Figura 2.7: Curva para classificação da madeira através de a) β x PHRR b) β x FSI.....	23
Figura 2.8: Curva HRR para duas espécies lime water (LW) (Testes 9 e 10) e para uma amostra de controle (Teste 2).....	24
Figura 2.9: Propensão de crescimento do fogo com base em um modelo discutido em Dietenberger e White (2004).....	25
Figura 2.10: Comparação do HRR médio fornecido pelo cone e pelo CCPM.....	30
Figura 2.11: THRR médio para cada material, com erro padrão de ± 1	31
Figura 2.12: Métodos usados para determinar porosidade e distribuição dos poros (PSD)....	32
Figura 3.1: Imagem do Cone Calorímetro utilizado nos ensaios, (a) conjunto do cone e (b) unidade de controle.....	33
Figura 3.2: Suporte para uso no CCPM com a perfuração para o termopar.....	36
Figura 3.3: Preparação dos corpos de prova para ensaio no CCPM.....	38
Figura 4.1: Média do TTI entre os grupos de madeira.....	42
Figura 4.2: TTI (s) médio como função de k_{pc}/I_3 para amostras NT.....	43
Figura 4.3: Média do TTI (s) em função de k_{pc}/I_3 para amostras com 5%.....	45

Figura 4.4: Média do TTI (s) em função de k_{pc}/I_3 para amostras com 10%.....	45
Figura 4.5: Temperatura de ignição média entre os grupos de madeiras.....	46
Figura 4.6: Relação linear da média da TIG em função do TTI das amostras NT.....	47
Figure 4.7: Relação entre TIG de amostras tratadas em função de amostras NT.....	48
Figura 4.8: Curva HRR para a amostra 1 da <i>Micropholis venulosa</i>	49
Figura 4.9: Valores do primeiro e do Segundo picos de HRR para amostras não tratadas....	50
Figura 4.10: Curva HRR médio para <i>Micropholis venulosa</i> (GA).....	51
Figura 4.11: Curva HRR médio para <i>Eucalyptus saligna</i> (EU).....	52
Figura 4.12: Curva HRR médio para <i>Pinus elliottii</i> (PI).....	52
Figura 4.13: Curva HRR médio para <i>Bowdichia nítida</i> (SU).....	53
Figura 4.14: Curva HRR médio para <i>Hymenolobium flavum</i> (AN).....	53
Figura 4.15: Curva HRR médio para <i>Handroanthus impetigosus</i> (IP).....	54
Figura 4.16: Curva HRR média para <i>Manilkara longifolia</i> (PA).....	54
Figura 4.17: Média do calor efetivo de combustão (EHC) para amostras que sofreram ignição espontânea.....	56
Figura 4.18: Taxa média de perda de massa durante os ensaios.....	59
Figura 4.19: Parâmetro β dos grupos de madeiras.....	61
Figura 4.20: Tempo de combustão da chama livre para as amostras analisadas.....	62
Figura 4.21: Perda de massa (a): Jatobá, (b) Muírocoatiara.....	64
Figura 4.22: Taxa de perda de massa (a): Jatobá, (b) Muírocoatiara.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da madeira.....	8
Tabela 2.2 – Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte.....	9
Tabela 2.3 – Parâmetros do fogo da <i>P. radiata</i> tratada determinados usando um CCPM com fluxo de calor de 25kw/m ²	28
Tabela 3.1 – Amostras de madeira usadas no teste do Conecalorímetro.....	37
Tabela 4.1 – Espécies de madeira que sofreram ignição com chama aparente.....	40
Tabela 4.2a – Grupo de amostras com $\rho \geq 900$	41
Tabela 4.2b – Grupo de amostras com $\rho < 900$	41
Tabela 4.3 – Curvas características de HRR para amostras NT.....	49
Tabela 4.4 - Média de THR, EHC, MLR and HRR dos grupos de madeiras.....	57
Tabela 4.5 – Efeito do tratamento na MEHC (MJ/kg)	58
Tabela 4.6a – Grupo de amostras com $\rho \geq 900$	59
Tabela 4.6b – Grupo de amostras com $\rho < 900$	60
Tabela 4.7 – Tempo combustão da chama livre.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo Geral.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificativa.....	5
1.4 Estrutura da Tese.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Madeira.....	7
2.2 Fases da queima da madeira.....	8
2.3 Inseticidas e as construções históricas.....	10
2.4 Revisão Bibliográfica.....	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Métodos.....	32
3.2 Materiais.....	36
3.3 Tratamentos.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 Tempo para Ignição (TTI).....	42
4.2 Temperatura de Ignição (TIG).....	45
4.3 Taxa de Liberação de Calor (HRR).....	47
4.4 Calor efetivo de combustão (EHC) e calor total liberado (THR).....	55
4.5 Taxa de perda de massa (MLR) e massa total perdida (TML).....	58

4.6 Parâmetros FSI e β.....	59
4.7 Smoldering.....	61
5 CONCLUSÕES.....	67
5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros	68
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A madeira, por ter grande versatilidade, ser de fácil obtenção e manuseio, tratar-se de material renovável e ainda suportar ação mecânica, assumir formas variáveis depois de manufaturada e, principalmente, ser utilizada para a construção de moradias (Lopez *et al.*, 1982; Edwards e Mill, 1986), tem seu uso em posição de destaque em comparação a outros materiais.

O uso da madeira para estruturas de edifícios modernos no Brasil é quase insignificante quando comparado com o concreto e o aço (Landesmann e Rocha, 2014) e ainda assim a madeira é um material muito usado nas construções. A madeira é a principal matéria-prima para produtos de acabamento, isolamento térmico e acústico e mobiliário nestes casos. No entanto, em edifícios antigos, a madeira é muito comum principalmente em telhados, tetos e pisos. É notável que os antigos edifícios da arquitetura colonial no Brasil, a maioria deles igrejas impressionantes, são feitos de paredes de pedra grossas e taipas de pilão acabadas por peças de madeira esculpidas, douradas por folhas de ouro. Esses edifícios não são apenas símbolos importantes da história brasileira, mas seus conteúdos são de imenso valor histórico. Além disso, hoje em dia, a indústria do turismo é uma importante fonte de renda para as cidades que hospedam esse patrimônio histórico.

As madeiras são constituídas basicamente de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos que podem se apresentar em concentrações e organizações diferentes, proporcionando a diversidade das características morfológicas e mecânicas do material. Sendo um material orgânico e heterogêneo, a madeira é muito susceptível a danos causados por um conjunto variado de agentes biológicos, tais como bactérias, fungos, insetos e xilófagos marinhos (Moreschi, 2013).

Edifícios históricos de madeira são protegidos contra insetos por produtos químicos dissolvidos em líquidos combustíveis como querosene, benzeno e etanol. A infestação de insetos que consome a madeira e o seu controle sem sucesso é uma causa importante de danos nestes edifícios e a primeira causa de restaurações emergenciais. Assim, a manutenção periódica e eventualmente a restauração são necessárias. O tratamento da madeira contra a ação dos insetos é uma fase essencial desses serviços. Por outro lado, o tratamento da madeira, obviamente, aumenta a carga de incêndio e muitas vezes tem um impacto indesejável na sua inflamabilidade.

O tratamento da madeira é comumente feito *in loco* simultaneamente com outros trabalhos que podem gerar calor, como serrar e soldar. Por esta razão, o início dos incêndios durante a restauração e conservação de edifícios históricos de madeira é muito comum. É justo mencionar o incêndio em um casarão do século XVIII que ocorreu em 2003 em Ouro Preto, MG (Figura 1.1a). Outro incêndio foi na Igreja Nossa Senhora do Monte Carmelo (Fonseca, 2012) que ocorreu em 20 de janeiro de 1999 na cidade de Mariana, Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1.1b). Este fogo destruiu o teto pintado e grande parte do conteúdo desta igreja cuja construção começou em 1784.

Buscando dados mais antigos, cita-se o incêndio ocorrido no antigo Fórum de Ouro Preto (Figura 1.2a), em março de 1949, que destruiu quase que completamente o Fórum, transformando sua bela estrutura em uma grande ruína (Figura 1.2b).



Figura 1.1: Incêndio em edificações históricas. (a) Pilão, praça Tiradentes – Ouro Preto, MG (2003). (b) Igreja Nossa Senhora do Monte Carmelo, Mariana – MG (1999).

Fonte: site vértices inconfidentes, acessado em 11 de setembro de 2017.



Figura 1.2: Incêndio no antigo Fórum de Ouro Preto. (a) Fórum de Ouro Preto em chamas, praça Tiradentes, Ouro Preto – MG (1949). (b) Como o prédio ficou após o incêndio.

Fonte: Inventário de Proteção do Acervo Cultural, IPAC, acervo urbano, página 719-743, out, 2012.

O risco de incêndio geralmente atinge níveis inaceitáveis nesses prédios. Para projetar a proteção contra incêndio, é necessário investigar o comportamento ao fogo nas diferentes espécies de madeira considerando seu uso real. Como as condições de uso da madeira são extremamente variadas, uma forma de investigar suas propriedades de combustão é em um cone calorímetro usando uma incidência de radiação de intensidade constante em sua superfície, geralmente na faixa de 5kW/m^2 a 100kW/m^2 .

O fipronil (fórmula molecular $\text{C}_{12}\text{H}_4\text{Cl}_2\text{F}_6\text{N}_4\text{OS}$) é um inseticida de amplo espectro que danifica o sistema nervoso central do inseto e gera diferentes produtos comerciais, dependendo da aplicação específica, sendo indicado para o controle de cupins, tanto em pré-construção quanto em pós-construção de edificações comerciais, industriais e residenciais. Para ser aplicado em telhados, pisos e tetos, o fipronil é dissolvido em querosene, benzeno ou etanol em diferentes concentrações em volume. Essa utilização crescente, associado ao fato de ser um material que contribui para o alastramento do fogo em condições de incêndio, torna sua decomposição térmica alvo de muitos estudos.

A temperatura exata para a decomposição térmica depende de fatores como espécie vegetal, composição química, tipo de corte e tratamento químico ao qual foi submetida a madeira. Avaliar a temperatura superficial da madeira, simulando condições de incêndio, através da incidência controlada da irradiação de calor sobre a sua superfície, é outra etapa necessária na investigação das condições de propagação do fogo e generalização de incêndios.

As madeiras brasileiras com tratamento químico têm as características de combustão, em geral, desconhecidas. O objetivo da tese é contribuir para o conhecimento teórico-experimental das características de combustão de algumas madeiras selecionadas - pinus (*Pinus elliottii*), ipê (*Handroanthus impetiginosus*), jatobá (*Hymenae sp*), angelim (*Hymenolobium flavum*), paraju (*Manilkara longifolia*), sucupira (*Bowdichia nitida*), eucalipto (*E. saligna*), curupixá (*Micropholis venulosa*) e muiracatiara (*Astronium sp*) – sendo submetidas a situações de incêndio através do equipamento cone calorímetro de perda de massa (CCPM). Um inquérito preliminar indica que estas espécies de madeira são preferidas para manutenção de telhados, pisos e tetos de edifícios históricos do Brasil e são comumente usadas na produção de móveis e em estruturas de telhado de edifícios modernos. O trabalho é realizado com o emprego do cone calorímetro de perda de massa (CCPM) de acordo com as especificações da norma ISO 5660-1 e ASTM-E1354-11b. O CCPM permite a obtenção de dados para avaliação das variáveis: taxa de liberação de calor (HRR), pico da taxa de liberação de calor (PHRR), a taxa de liberação de calor a 180 e 300 segundos após a ignição (PHRR₁₈₀ e PHRR₃₀₀), o calor total liberado no ensaio (THR), a média do calor liberado no ensaio (MHRR), a massa total perdida (TML) e a taxa da perda de massa (MLR), o calor efetivo de combustão (EHC), o tempo decorrido até a ignição (TTI) e o tempo de pirólise (TOP).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar o efeito do fipronil no comportamento de incêndio de 9 espécies brasileiras de madeira comercial.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os dados gerados serão usados para comparar a influência esperada de risco de fogo do tratamento com fipronil usando duas diluições diferentes sobre querosene, para agregar conhecimento e melhorar a segurança contra incêndio de edificações com madeira no Brasil.

Os estudos fornecerão dados para:

- estudar a reação potencial de propriedades em relação ao fogo;

- calcular o índice FSI, para propensão de materiais ao fogo;

1.3 JUSTIFICATIVA

Os incêndios são uma das grandes preocupações da sociedade, já que as perdas materiais e humanas causadas por eles podem ser significativas. Por isso, existe uma grande demanda e aprimoramento das técnicas de elaboração de projetos de segurança que sejam capazes de garantir em níveis mínimos aceitáveis a segurança de pessoas e de bens móveis e imóveis.

A concepção de um sistema de segurança contra incêndio se inicia com a identificação de objetivos de segurança e de níveis aceitáveis de segurança. De acordo com Wittbecker (2004), cenários de incêndio devem ser determinados para os quais os projetos de segurança devem ser elaborados. Ensaio e métodos de cálculo são usados para determinar se os objetivos de segurança são atingidos em cada um dos cenários utilizados no projeto de segurança. Para que um projeto de segurança seja aprovado, é necessário que cálculos e ensaios produzam estimativas válidas de seu sucesso.

O controle químico de cupins no ambiente urbano constitui hoje, uma boa fonte para estudos científicos e de investimentos para as empresas desinsetizadoras, estabelecidas nas grandes cidades do sudeste brasileiro. Na prática, essas empresas utilizam uma grande variedade de produtos químicos nos serviços de tratamentos preventivo e curativo da madeira contra desgastes causados pelos cupins. Muitos desses produtos são comercializados sem nenhum teste específico que comprove a eficiência dessas substâncias para o tratamento químico em madeiramento contra espécies de cupins, pragas da região tropical, e menos ainda no que isso pode acarretar (Lage, 2004).

No Brasil, o tratamento industrial de preservação da madeira com o uso de inseticidas é pouco utilizado, o que resulta na rara participação de profissionais nessa linha de pesquisa e na escassa produção de literatura pertinente ao assunto.

A definição das características de combustão de um material é uma etapa fundamental no modelamento de incêndios que, por sua vez, é necessário ao desenvolvimento de projetos de segurança para edificações que utilizam a madeira tratada. É, portanto, imprescindível estudar o comportamento do fogo em madeiras tratadas. Em uma situação típica de propagação de fogo, diferentes partes de um material combustível, seja uma parede, piso, forro de madeira ou uma

peça estrutural, recebem radiações que emanam do objeto que origina o incêndio e caracteriza um determinado cenário. Estas radiações podem ou não desenvolver um incêndio, dependendo de sua intensidade, tempo de atuação e das características do material que as recebem.

Além disto, a falta de dados experimentais com madeiras no Brasil, sobretudo madeiras tratadas, é um entrave para a maior utilização do recurso florestal, tão presente em nosso país. É urgente um banco de dados com informações para se utilizar em normas reguladoras que exijam obediência à (i) taxa de liberação de fumaça, (ii) tempo para ignição, (iii) temperatura em que essa ignição se dá e, (iv) taxa de propagação de chamas, sendo estes parâmetros fundamentais para avaliação de possíveis incêndios decorrente da combustão da madeira.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em cinco capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, com uma breve teoria das fases de queima da madeira e do uso de inseticidas. Seguindo tem-se um resumo de publicações e pesquisas que tratam do comportamento de diversos tipos de madeiras em altas temperaturas, utilizando ou não o equipamento CCPM nos ensaios e sendo ou não a madeira tratada.

No capítulo 3 segue-se com a metodologia experimental empregada no tratamento das madeiras e nos ensaios, apresentando o equipamento utilizado para os testes (CCPM). As variáveis utilizadas para definição dos corpos de prova empregados nos ensaios, como dimensões, massa, umidade relativa, nomes científicos das espécies escolhidas e dados do armazenamento também estão descritas neste capítulo.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais e possíveis ligações/comparações relacionados com: (i) HRR, PHRR, THR, e MHRR (ii) TML e MLR, (iii) EHC e (iv) TTI, TOP e TIG, em relação as diferentes madeiras e suas concentrações de tratamento.

As conclusões finais do trabalho, juntamente com as recomendações para trabalhos futuros estão no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MADEIRA

A madeira é composta por polímeros (entre eles a celulose, hemicelulose e lignina), sendo um material heterogêneo e natural com células dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal. A hemicelulose inflama na temperatura mais baixa, a celulose em uma temperatura um pouco mais elevada, e a lignina em uma temperatura ainda maior. Em comparação com as folhosas, as resinosas têm uma fração menor de hemicelulose e uma maior fração de lignina, representando, assim, a sua maior temperatura de ignição. Nos trabalhos de Castro (2009) e Vito (2013) encontra-se mais detalhes sobre seus componentes.

De acordo com Bodig; Jayne, (1993), as variações físicas e anatômicas da madeira são grandes até dentro da mesma espécie, principalmente em função da idade e de fatores ambientais. Conforme tabela 2.1, até 10% da constituição da madeira é de extrativos em geral, que apesar de ainda não terem sua atuação bem determinada são responsáveis por inúmeras características da madeira. Nas coníferas, predominam, em diferentes composições, as terebintinas, que são voláteis, e o breu, não volátil. Nas folhosas, a variedade de extrativos é bem maior, englobando compostos fenólicos, aromáticos, taninos, compostos nitrogenados e inúmeros carboidratos (Fengel; Wegener, 1984; Wikberg; Maunu, 2004; Winandy; Rowell, 2005).

Tabela 2.1: Composição química da madeira

Componentes	Presença
Celulose	40 – 45%
Hemicelulose	±20%
Lignina	15 – 35%
Outros constituintes	Até 10%

Fonte: Winandy e Rowell (2005)

A madeira como material estrutural, quando exposta a ação térmica está sujeita a alterações nas propriedades de rigidez e resistência, além da redução da seção devido a despolimerização e carbonização. Com isso suas propriedades mecânicas e sua estabilidade estrutural ficam comprometidas, podendo inclusive levar ao colapso e condenação da construção (Remade, 2011).

Schaffer (1973) sintetizou, conforme tabela 2.2, as variações físico-químicas que a madeira fica sujeita quando submetida à ação do calor. O que pode-se perceber é que as primeiras mudanças físico-químicas surgem a partir de 50°C; as reações exotérmicas iniciam-se entre 150°C e 160°C e aumentam com a elevação da temperatura. Acima de 200°C, esses fenômenos se refletem na perda acelerada de massa, a qual coincide com a redução da resistência mecânica da madeira decorrente do aumento da temperatura (Poncsák *et al.*, 2006).

2.2 FASES DA QUEIMA DA MADEIRA

O processo de combustão é uma reação química de um combustível em presença de oxigênio com a liberação de calor. No caso da madeira, quando esta transformação não tem o aporte suficiente de oxigênio, ou o aporte é controlado, ocorre a carbonização, cujo resíduo sólido é o carvão.

Na literatura vários autores já estudaram a degradação térmica da madeira (Bodírlâu; Spiridon; Teacã, 2007; Poncsák *et al.*, 2006) mostram que o processo de decomposição e a temperatura na qual ela ocorre são dependentes, principalmente de três fatores: da espécie da madeira, dos anéis de crescimento e do teor de umidade do material. Outros fatores que podem afetar as características de queima dos materiais celulósicos em suas várias fases, de acordo com Rocha (2004) são as diferenças de constituição física (grau de porosidade, densidade, alinhamento das fibras, inclusões, etc.) e química (teores de umidade, resinas, aditivos, sais minerais, celulose, hemicelulose, lignina, etc.)

Tabela 2.2: Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte.

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

Fonte: Schaffer (1973)

Como já colocado por Schaffer (1973), as reações químicas no interior do material são complexas, com reações endotérmicas e exotérmicas ocorrendo simultaneamente tanto no tempo como no espaço, usualmente dividindo-se a combustão da madeira em 5 fases: pré-aquecimento, secagem, pirólise, ignição, queima com chama, extinção da chama e incandescência, também chamado de “*smoldering*”, que é um processo de queima sem chama

aparente. Este último se dá por um processo físico-químico complexo envolvendo reações químicas e transferência de calor por condução, convecção e radiação em um meio poroso.

Quando uma peça de madeira é submetida a uma fonte de calor, fica sujeita ao pré-aquecimento até a sua superfície atingir a temperatura de vaporização da água. Nesta temperatura uma frente de vaporização é formada e se propaga em direção ao centro da madeira. Se a fonte de calor não é extinta, a superfície da peça atinge uma temperatura acima da qual se gera uma frente de reação de decomposição térmica, denominada fase de pirólise. Nesta fase que ocorre a liberação de voláteis (mistura de hidrocarbonetos leves) e alcatrão (hidrocarbonetos pesados). Se taxa de liberação de voláteis for grande o suficiente para formar uma mistura combustível acima do limite de flamabilidade coexistirá uma fase de queima com chama, caso contrário, ao fim da pirólise ocorrerá a incandescência. Após a saída dos voláteis, a madeira transforma-se em carvão cuja composição depende da espécie e do fluxo de calor incidente.

2.3 INSETICIDAS E AS CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

O primeiro indício de preservação de madeiras que se tem conhecimento foi durante a instalação da malha ferroviária na cidade do Rio de Janeiro, possivelmente em 1854 (Remade, 2011).

A primeira pesquisa brasileira efetiva em preservação de madeira foi feita pelo então Gabinete de Resistência de Materiais em 1931, hoje o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que objetivava a utilização de um preservante hidrossolúvel aplicado em estacas de madeira pelo método de imersão simples (Lopez *et al.*, 1982).

A madeira, por ser composta principalmente por matéria orgânica, é facilmente atacada por insetos e fungos que, direta ou indiretamente, utilizam-se dessas substâncias como fonte de energia. Este ataque pode ocorrer desde o processamento da madeira até o produto acabado. Para proteção das madeiras consideradas de baixa resistência pode-se usar produtos químicos efetivamente letais ou repelentes dos cupins, aplicados por diferentes métodos, como os citados por Becker (1963): pincelamento, aspersão, imersão, impregnação por pressão ou difusão.

Em cidades históricas como Ouro Preto e Mariana, grande parte das construções de valor histórico é de madeira. As igrejas centenárias possuem grande parte de toda sua estrutura em madeira.

Um dos inseticidas usados para cupins nas igrejas em Ouro Preto é o Termidor, ou Fipronil, que é um agrotóxico, inseticida, concentrado emulsionável (CE) (BASF SA) com ponto de fulgor de 45°C.

Devido ao baixo ponto de fulgor este inseticida pode ser potencialmente perigoso em caso de incêndios. Lembrando que a aplicação do mesmo é feito in loco, normalmente em algum momento de restauração, onde coexistem no ambiente fontes de calor de outros instrumentos de trabalho (Lage, 2004).

Estudos deste uso associado ao aumento da taxa de incêndio são inexistentes na literatura.

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram selecionados alguns trabalhos de relevância nas áreas de madeiras tratadas ou não, submetidas ao calor.

O trabalho de Rocha (2014) apresenta um levantamento de estudos sobre propriedades das madeiras, citando trabalhos como Keylwerth (1952), Sulzberger (1953), Comben (1955), Ladell (1956), Kollman *et al.* (1968) e mais recentemente de Figueroa e Moraes (2005). De forma geral, altas temperaturas reduzem a resistência da madeira como consequência da dilatação e da movimentação térmica das moléculas de seus constituintes. Acima de aproximadamente 100°C, mesmo que de forma inicial, já existe a degradação térmica da madeira.

No trabalho de Gerhards (1980), encontra-se estudos relevantes da literatura sobre os efeitos imediatos do teor de umidade e temperatura em propriedades mecânicas da madeira como módulo de elasticidade e rigidez. No trabalho ele conclui que a temperatura provoca efeitos imediatos (ocorrem somente quando a temperatura elevada é mantida) e efeitos permanentes (irreversíveis), que causam degradação térmica dos constituintes da madeira. Nos dois casos, a resistência da madeira é inversamente proporcional à temperatura.

Simms e Law (1967) realizaram um estudo do efeito da variação do teor de umidade nos tempos de ignição tanto com chama piloto como para ignição espontânea de diferentes espécies de madeira, que foram medidas em uma ampla gama de intensidades de radiação. No trabalho eles mostram que aumentar o teor de umidade aumenta o tempo para ignição com chama piloto e espontânea, para qualquer intensidade de radiação. O aumento foi contabilizado de forma

satisfatória usando os valores das propriedades térmicas apropriados aos diferentes teores de umidade e permitindo o efeito do calor latente de vaporização para cada valor de calor específico. Este resultado confirma os experimentos e cálculos de Williams (1953) que mostrou que foi possível negligenciar o efeito de migração de umidade no aumento de temperatura. O tempo de ignição com chama piloto pode ser definido assumindo um critério de temperatura de superfície fixa de 380°C para madeira e 330°C para placa isolante de fibras. A mesma correlação de temperatura para ignição com chama piloto foi encontrada para amostras menores, sugerindo que o efeito da área no tempo de ignição com chama piloto é pequeno.

Ainda segundo Sims e Law (1967) a energia necessária para a ignição aumenta perceptivelmente para todos os teores de umidade. Os resultados experimentais sugerem que existe uma margem segura na escolha de 0,3cal/cm²s como nível máximo aceitável de radiação utilizado no Regulamento de Construção. O tempo para ignição espontânea também pode ser calculado da mesma forma, assumindo um critério de temperatura de superfície fixa de 545°C. Este padrão de temperatura para amostras maiores (7,6 e 15cm²) é aproximadamente o mesmo que o relatado anteriormente na literatura para amostras menores e o intervalo para o tempo de ignição aumentou em no mínimo 130s. No entanto, para resultados das amostras menores (5cm²), analisado no trabalho deles, há um efeito residual devido a uma densidade semelhante à encontrada para ignição com chama piloto para o mesmo tamanho de amostra, que sugere que o fator de correção por área esteja associado com a densidade tanto para o tempo de ignição como para a intensidade mínima de ignição. O conceito de um critério de temperatura fixa para a ignição de madeiras secas é válida para madeiras com até 60% de umidade. Foram encontrados tempos de ignição de 0,25 a 16 minutos com intensidades de 1,0 até 12,0cal/cm²s para ignição espontânea e tempos de 60 minutos e intensidades de 0,2cal/cm²s para ignição com chama piloto.

A umidade aumenta a energia necessária para a ignição; também aumenta a intensidade mínima para a ignição, embora com a chama piloto seu efeito seja perceptível para teores de umidade acima de 40%.

Resumindo, a presença de umidade aumenta o tempo de ignição, mudando a transferência de calor e, portanto, a elevação da temperatura de pelo menos três formas:

- (i) A umidade aumenta os valores das propriedades térmicas, isto é, a condutividade térmica e o calor específico volumétrico;
- (ii) O calor é transferido diretamente por difusão molecular;

(iii) A evaporação arrefece as regiões mais quentes e a condensação aquece as regiões mais frias.

Babrauskas (1982) realizou um trabalho com os dados práticos e experimentais disponíveis para a ignição de madeira sólida. A madeira pode inflamar pela chama diretamente, ou pode entrar em combustão num modo de incandescência, o qual pode ou não ser seguido por chama. Os estudos iniciais sobre esta questão são do século 19 e continuam até 2018, com dados variando de 210-497°C para a ignição com chama piloto e 200-510°C para auto-ignição. No trabalho ele faz um apanhado de resultados de trabalhos anteriores, citando resultados de Smith (que vão até 714°C) e os considera implausíveis, podendo referir-se a uma temperatura média opticamente medida em que alguns pontos já estão incandescentes; assim, eles foram excluídos. Ainda segundo o autor, vários outros pesquisadores relatam cálculo do valor, em vez de medida; estes presumem menos confiança. Como conclusão do seu trabalho fornece uma temperatura de ignição de cerca de 250°C para a madeira exposta ao fluxo de calor mínimo possível para a ignição (4,3kW/m²), e que invariavelmente inflama, pelo menos inicialmente, num modo de incandescência sob estas condições. A temperatura de inflamabilidade aumenta rapidamente à medida que o fluxo de calor é aumentado. A chama piloto tem fluxos de calor suficiente para causar uma ignição quando atingem temperaturas de superfície de 300 - 365°C aproximadamente. Temperaturas de auto-ignição em fluxos superiores ao mínimo são essencialmente desconhecidos. Conclui ainda que para ignição com chama piloto, valores TIG não devem ser mais altos do que os de auto-ignição. Os resultados disponíveis são tipicamente para amostras de 12-25 mm de espessura e expostos por apenas 10-60 minutos.

Com o desenvolvimento do Cone Calorímetro em 1982 pelo próprio Babrauskas (1982), trabalhos relacionados com taxa de liberação de calor foram iniciados.

No trabalho de Atreya *et al.* (1986), foi realizado um estudo do efeito da orientação da amostra em relação à ignição com chama piloto e a propagação da chama. Um trabalho experimental foi feito em dois tipos de madeira e duas orientações (horizontal e vertical).

No modo horizontal (Figura 2.1), os testes de propagação da chama foram realizados em amostras de 60cm de diâmetro e 1,9 cm de espessura. O fogo foi iniciado no centro da amostra e propagou-se até a borda sob condições de radiação externa. As temperaturas da superfície foram medidas por termopares instalados perpendiculares à direção de propagação radial e a taxa de propagação foi determinada por fotografias tiradas durante os testes.

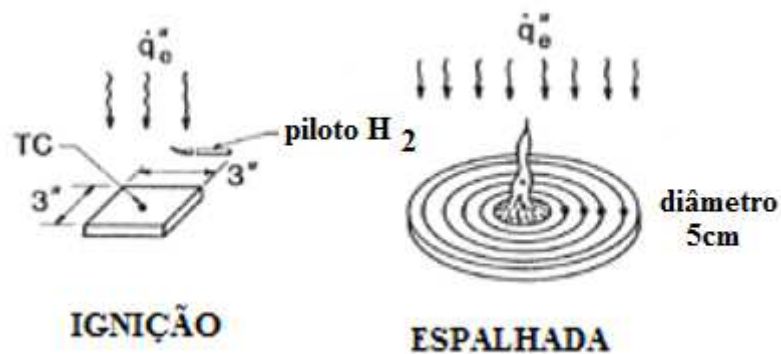


Figura 2.1: Modo Horizontal de propagação de chama.

Fonte: Atreya *et al.*, 1986.

As bordas da amostra foram protegidas por papel alumínio para evitar quaisquer efeitos de borda. Para testar a chama piloto para ignição, uma pequena chama de hidrogênio foi baixada em intervalos regulares (um segundo) perto da superfície de pirólise, a uma altura não superior a dois milímetros. A chama piloto estava fora do centro e a amostra foi girada muito lentamente para evitar aquecimento de um ponto particular. A temperatura da superfície foi monitorada continuamente e nenhum aumento mensurável na temperatura da superfície foi observado devido à chama piloto. O tempo de exposição exigido para o incêndio sustentado também foi gravado.

Com a amostra vertical (Figura 2.2), os experimentos de propagação lateral da chama foram conduzidos em amostras de 15,2cm x 78cm x 1,9cm expostas a uma irradiância externa. A ignição foi instigada por uma chama piloto de acetileno e ar posicionado acima da amostra. A posição da chama em função do tempo foi gravada por uma câmera de vídeo e a taxa de propagação da chama foi determinada. Termopares posicionados em vários locais ao longo da amostra monitoraram a temperatura da superfície. Amostras de 15,2cm x 15,2cm x 1,9cm foram usadas para testes com chama piloto. Essas amostras foram expostas a diferentes irradiações externas e o tempo necessário para o incêndio sustentado foi registrado. A temperatura da superfície também foi monitorada continuamente por termopares alocados na superfície da amostra.

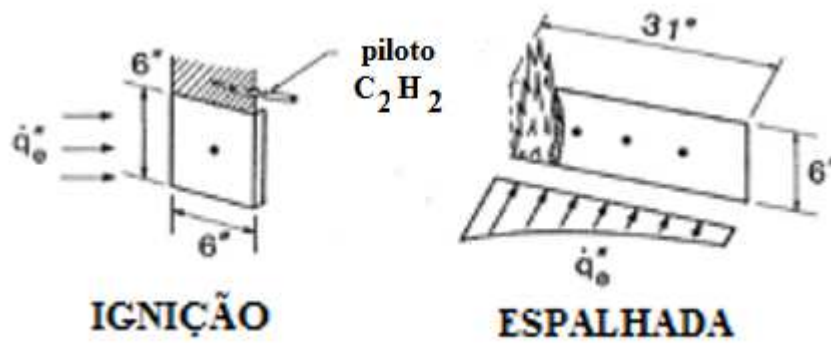


Figura 2.2: Modo Vertical de propagação de chama.

Fonte: Atreya *et al.*, 1986.

Como conclusões do trabalho pode-se citar: a orientação é independente e parece indicar que a relação entre ignição e propagação da chama, como é assumido na teoria da propagação da chama térmica, é válida. A relação entre tempo para ignição e radiação incidente também apresentou independência em relação a orientação (Figura 2.3). Verificou-se que existem duas razões para a independência da orientação: (i) Em altas temperaturas a perda de calor por re-radiação domina as perdas convectivas. (ii) No ambiente com concentrações de O₂, a propagação da chama é insensível a pequenas mudanças.

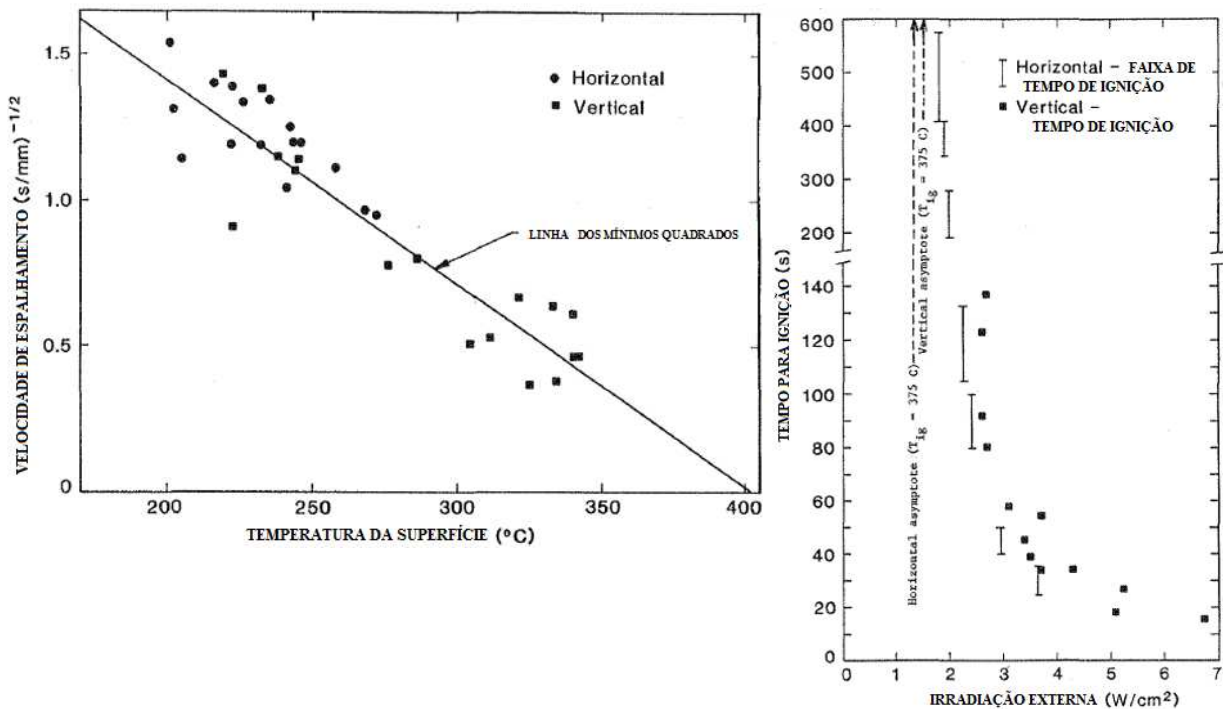


Figura 2.3: (a) Relação entre a temperatura da superfície e a velocidade da chama, entre as amostras vertical e horizontal. (b) Relação entre a irradiação externa e o tempo para ignição, entre as amostras vertical e horizontal.

Fonte: Atreya *et al.*, 1986.

Moghtaderi e Fletcher (1988) fizeram uma análise experimental em materiais a base de madeira para investigar os efeitos de fatores externos e internos nas características de combustão com chama nestes materiais. Foi usado o cone calorímetro nos experimentos. Foram realizados ensaios com fluxos entre 20 e 85kW/m², com orientação horizontal, com 4 tipos de madeira Australianas, com densidades diferentes. Os resultados, conforme figura 2.4, demonstraram que:

(i) Tanto a taxa de liberação de calor e o calor de combustão de materiais à base de madeira são significativamente afetados pelo nível de densidade, teor de umidade, irradiância e orientação da amostra.

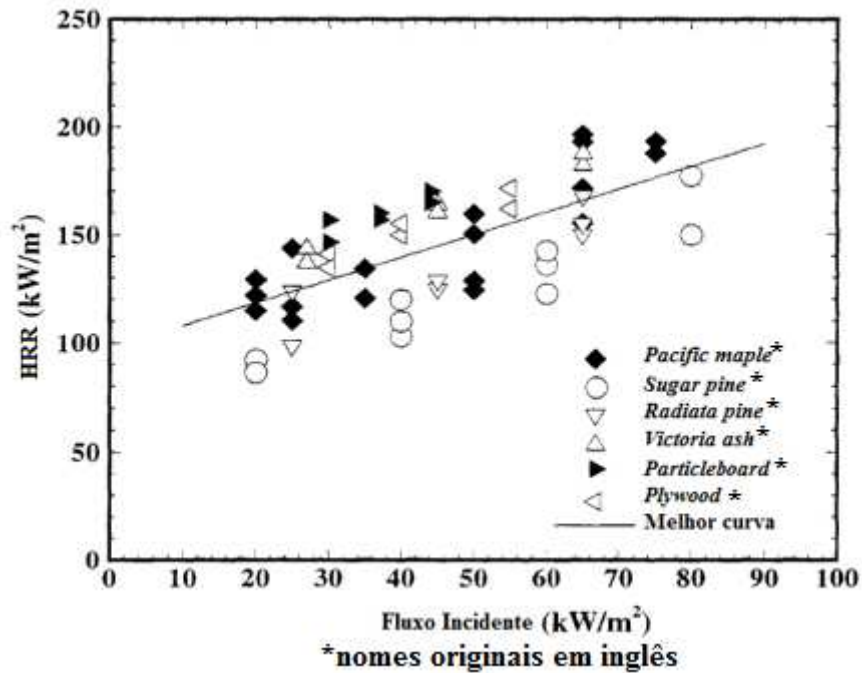


Figura 2.4: Média do HRR durante um minuto para seis tipos de madeira

Fonte: Moghtderi e Fletcher (1988).

(ii) A taxa de liberação de calor aumenta com o aumento do nível de irradiação.

(iii) Quanto maior for o teor de umidade, menor a taxa de liberação de calor.

(iv) A taxa de liberação de calor na orientação horizontal é muito mais elevada do que a da orientação vertical (para algumas espécies, a diferença foi cerca de 28%).

(v) O calor eficaz da combustão de materiais à base de madeira varia de acordo com nível de irradiação de uma forma linear.

(vi) O calor de combustão eficaz também é influenciado pelo teor de umidade do material (quanto maior o teor de umidade, mais baixo calor de combustão).

Os trabalhos de Parker (1988), Urbas e Parker (1993), Hopkins (1995), Dietenberger (1996 e 1999), Grexa e Lubke (2001), Ayrimis *et al* (2007) e Terzi *et al* (2009) discutem peças de madeira ensaiadas em cone calorímetros.

Parker (1988), Hopkins (1995) e Dietenberger (1996) obtiveram dados sobre madeiras de climas temperados, sem análise ou comparação detalhada com modelos integrais. No trabalho de Parker (1988) ele desenvolveu um método para prever a taxa de liberação de calor da madeira para diferentes espessuras e umidade. Taxas de liberação de calor e o EHC foram medidas como função do tempo e um fluxo radiante em amostras de 12,5mm de espessura. Os resultados

encontrados foram promissores, conforme gráfico da figura 2.5, que mostra que a curva calculada e medida têm correspondência.

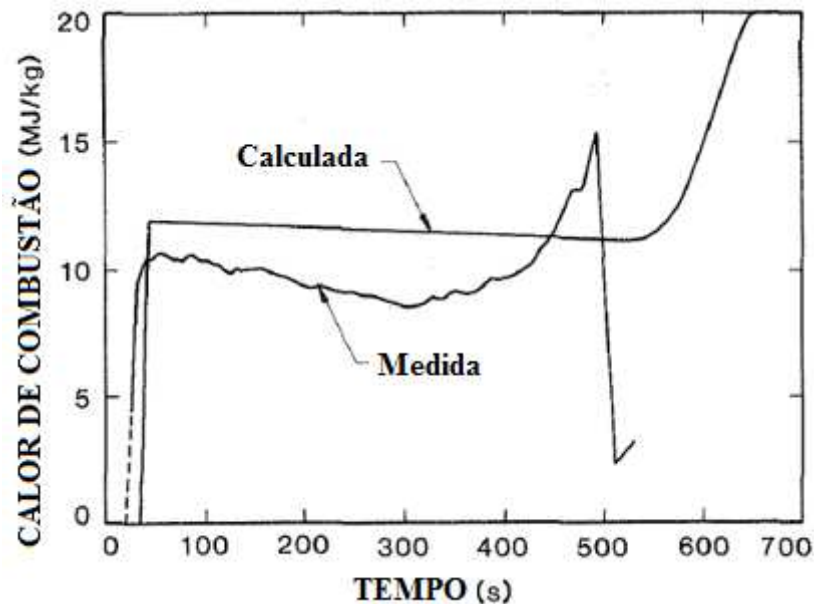


Figura 2.5: EHC em um corpo de prova de madeira com fluxo de calor incidente de 50kW/m^2 .
Fonte: Parker, 1988.

Urbas e Parker (1993) mediram a temperatura superficial de amostras da espécie de pinheiro Douglas em um calorímetro cônico utilizando termopares e um pirômetro infravermelho. Obtiveram uma boa concordância entre as medidas com termopares e com o pirômetro quando a emissividade foi assumida ser 1,0 e os termopares colocados em contato com a superfície e não colocados perto de fissuras geradas na biomassa durante a queima. A maior parte das fissuras ocorriam na direção normal à orientação dos grãos da madeira e os voláteis saíam através das fissuras. A oxidação do carvão na região entre as fissuras verticais resultou em temperaturas superficiais mais elevadas.

Dietenberger (1999) realizou um trabalho onde testes de cone calorímetro com madeira com três apoios diferentes e 4 fluxos de radiação ($20, 35, 50$ e 65kW/m^2) mostraram que o suporte não afetou o tempo de ignição, a velocidade inicial de liberação de calor (HRR) e o calor total liberado. No entanto, o uso de painéis densos para ensaio do túnel Steiner eliminou o segundo pico no perfil HRR e prolongou o período interposto de combustão simultânea e incandescente, como evidenciado por um aumento gradual do calor da combustão com o tempo.

Spearpoint (1999) comparou medidas de ignição e taxa de queima de madeira em um calorímetro cônico com um modelo integral unidimensional que descreve a pirólise transiente de um sólido carbonizável semiinfinito sujeito a um fluxo de calor radiante constante. Ele analisou experimental e teoricamente a ignição de amostras de madeira de 50 mm de espessura, expostas a fluxos de calor incidente de até 75kW/m^2 com orientações paralela e perpendicular. O tempo de medição da ignição obtido do cone foi utilizado para derivar propriedades características dos materiais. O fluxo de calor radiante mais baixo para causar ignição foi encontrado em aproximadamente 10kW/m^2 dependendo da espécie, orientação dos grãos ou teor de umidade. O trabalho chegou a algumas conclusões, destacando-se: a ignição da madeira depende de muitos fatores, incluindo a espécie, o grão, orientação, teor de umidade, condições de exposição e a variabilidade inerente da madeira como material natural; e o modelo integral para o tempo de ignição apresenta uma boa referência com dados experimentais em fluxos de calor maior que 20kW/m^2 .

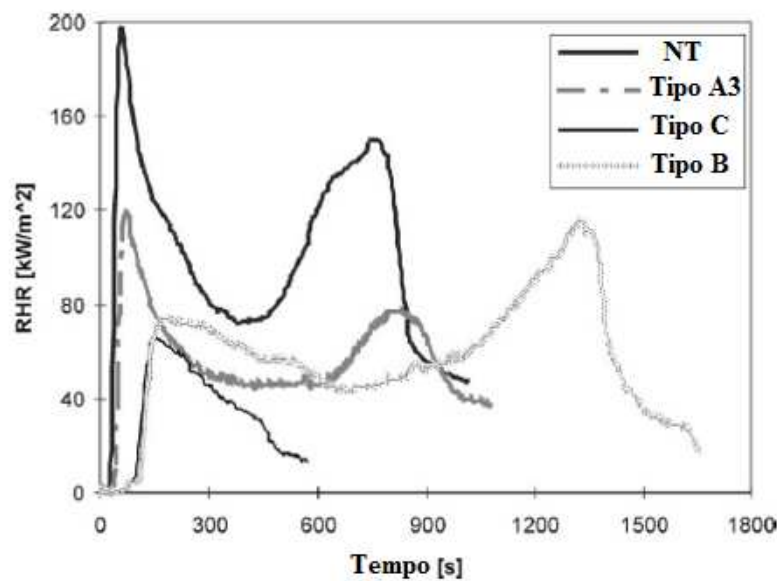
Orientações sobre a influência nas curvas HRR da placa de revestimento protetor usado nos testes de cone calorímetro são escassas na literatura existente. Vários estudos fornecem dados sobre o modelo de pirólise, mas não consideram o material de apoio. Uma exceção é o trabalho de Richter *et al* (2009), que afirma que de acordo com o modelo de previsões, o segundo pico de HRR é muito sensível à espessura do substrato isolante, embora nenhum resultado ou números específicos sejam apresentados.

Grexa e Lubke (2001) e Terzi *et al* (2009) fizeram estudos para as madeiras tratadas com retardadores de chama, apontando a reação ao fogo. Eles trabalharam com amostras de 100×100 mm e com espessura aproximada de 20 mm colocadas em uma base de fibra refratária de baixa densidade. Os parâmetros foram medidos usando um cone calorímetro com irradiação externa de 50kW/m^2 , com uma orientação horizontal. Terzi *et al.* usou um acendedor de faísca elétrica, acima da amostra, até ocorrer a chama sustentada que, por critério, era de no mínimo 10s. O teste era finalizado quando o valor médio da taxa de perda de massa, no período de 1 minuto, caía abaixo de 150g/m^2 , como especificado na ISO 5660-1. Além do teste no cone o trabalho de Terzi *et al.* (2009) também realizou ensaios em tubo de fogo, de acordo com a norma ASTM E69. A metodologia usada foi a mesma.

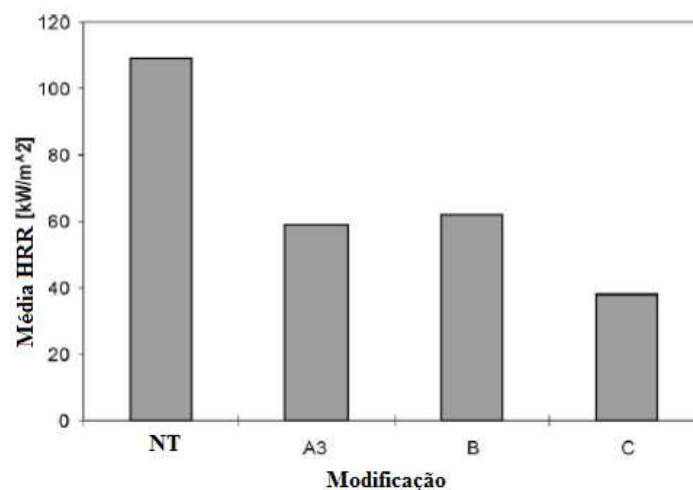
Grexa e Lubke (2001) usaram 3 sistemas retardadores de chama. O tipo A era hidróxido de magnésio; o tipo B, uma combinação de fosfato monoamônio e hidróxido de alumínio e o tipo C, uma combinação de fosfato de monoamônio e ácido bórico.

Já no trabalho de Terzi *et al* (2009), os tratamentos foram realizados nas concentrações de 1% e 4%, diluídos em solução aquosa, dos químicos retardadores de chama comuns (MAP, DAP e AS).

Os trabalhos mostram que o desempenho da madeira preservada de química é pior e as taxas de liberação de calor das espécies tratadas foram menores, diminuindo a formação de fumaça e mantendo a produção de carbono por unidade de área quando comparada às madeiras não tratadas, conforme figura 2.6a e b. A curva típica de HRR com dois picos foi mantida em todas as situações.



(a)



(b)

Figura 2.6: (a) HRR em função do tempo para madeira não tratada e tratadas com retardantes de chama. (b) Média do HRR para as mesmas amostras.

Fonte: Grexa e Lubke, 2001

O código de construção americano utiliza um índice (FSI – *flame spread index*) para dividir os materiais usados nas construções em 3 classes (A, B e C). De acordo com a classificação, os materiais são ou não submetidos a algum tratamento antes de serem utilizados. Para definição deste índice são realizados ensaios de acordo com a norma ASTM E-84.

White e Dietenberger (2004) realizaram uma revisão de resultados de vários estudos, apresentados por eles na 12ª Conferência Anual de Retardadores de Chama (Dietenberger e White, 2001), usando um modelo com dados de cone calorímetros para cálculos de propensão ao aumento do fogo. O estudo foi realizado acerca das propriedades da maioria dos materiais, a propensão de aumento de fogo na superfície e para sustentar uma estimativa do índice de propagação de chama (FSI) de acordo com a ASTM E 84. Foi apresentada uma metodologia que incorpora o tempo para ignição, a taxa de liberação do pico de calor (PHRR) e a taxa de liberação do calor total (THR) no teste de cone calorímetro. Para o modelo preditivo, um fluxo de 50kW/m² foi usado. Um parâmetro de aceleração, β , é calculado com o PHRR, um coeficiente de decaimento exponencial, derivado da fórmula analítica de propagação de chamas:

$$\beta = b + cQ_p^{\&} - \omega\tau \quad (2.1)$$

onde $Q_p^{\&}$ é o PHRR; ω é um coeficiente de decaimento de tempo exponencial; τ é uma constante de tempo do material; b e c são constantes do teste de túnel (ASTM E84), com valores de -0,085 e 0,00188 respectivamente.

Com as equações desenvolvidas nesse trabalho de White e Dietenberger (2004), tem-se um

$$\beta = 0,6[1 - \exp(-0,032FSI)] - 0,36 \quad (2.2)$$

Previsões para o ASTM E 84 FSI foram calculados a partir de uma correlação logarítmica entre β e o ASTM E 84-07 FSI (Dietenberger e White, 2001). Devido à relação logarítmica entre β e o FSI, a equação utilizada para estimar o FSI não é sensível a variações na FSI maior do que o valor aproximado de 75 e não produz uma estimativa numérica do FSI para valores mais altos de β (Ayrilmis *et al.*, 2007).

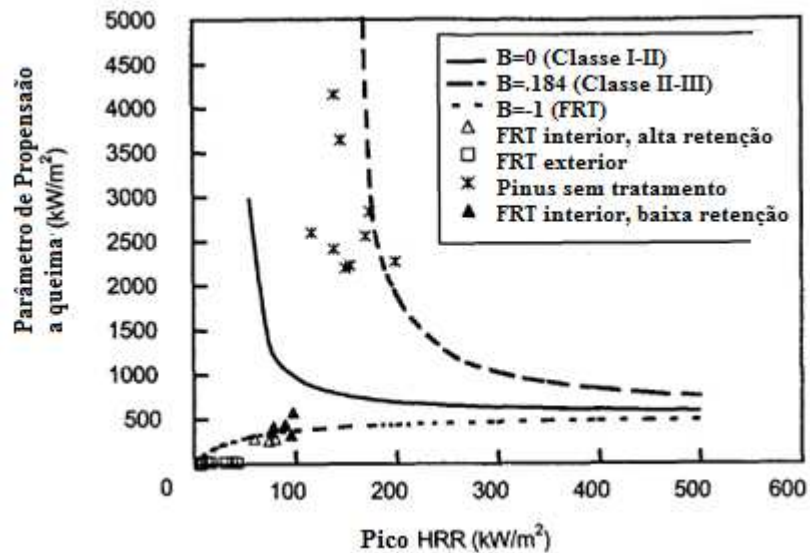
$$FSI = -31,25\ln(0,4 - 1,67\beta) \quad (2.3)$$

No trabalho de Terzi, *et al* (2009), eles também fizeram esta estimativa para a queda na resistência de sólidos da madeira. Os dados do cone foram usados para estimar o FSI (White e Dietenberger, 2004), que é deduzido no ensaio de túnel de Steiner (ASTM E 84). Foram calculados o parâmetro de aceleração, β , e o índice de propagação de chama, FSI, para todos os ensaios. No trabalho não houve nenhuma amostra classificada como Classe A, que é a madeira que requer maior restrição no tratamento retardador de fogo, o que pode ser explicado pelo baixo nível de retenção relativa usada no trabalho. No entanto no compensado e nas amostras de MAP sólidas, os valores aumentaram de FSI Classe C para a B, quando a concentração da solução aumentou de 1 para 4%.

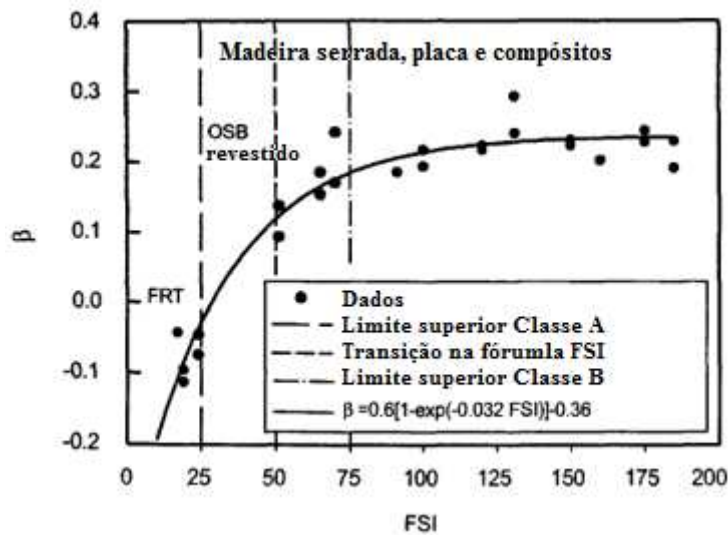
Os valores mais baixos de β refletem melhor desempenho contra o fogo. O valor de $\beta = 0,184$ é utilizado para diferenciar entre Classe C (FSI de 76 a 200) e Classe B (FSI de 26 a 75) materiais. A classe mais restritiva é Classe A (FSI de 25 ou menos). O modelo utiliza β igual a zero para diferenciar entre materiais Classe B e Classe A (Ayrilmis *et al.*, 2007, White e Dietenberger 2004).

No trabalho de 2004, White e Dietenberger realizaram testes com madeira tratada e não tratada com fosfato de monoamônia e ácido bórico. Quando não exposto a elevadas temperaturas, as amostras tratadas apresentaram curvas HRR significativamente menores que as amostras não tratadas. Para amostras com o fosfato de monoamônia não foi detectado aumento significativo na HRR depois de exposto a temperatura constante de 66°C por 6 meses. Já nas amostras com ácido bórico, depois de 6 meses, o FSI passou de 29 para 66.

A figura 2.7a apresenta as curvas para β =zero, $\beta = -0,184$ e $\beta = -01$. Baseado na regressão experimental, a curva do parâmetro de aceleração em função do índice FSI é desenvolvida na figura 2.7b.



(a)



(b)

Figura 2.7: Curvas para classificação da madeira através de: (a) β x PHRR e (b) β x FSI.

Fonte: White e Dietenberger, 2004

Ayrilmis *et al.* (2007) realizaram um estudo das propriedades físicas, mecânicas e reação ao fogo de OSB cobertas com retardadores de chama, usando como retardadores quatro produtos químicos, a base de: fosfato de monoamônio (MAP), fosfato de diamônio (DAP), ácido bórico (BX/BA) e água de cal (PV). As propriedades físicas e mecânicas foram ensaiadas de acordo

com os padrões EN e DIN. Para as características de combustão foi utilizado o cone calorímetro, com a mesma metodologia dos trabalhos de Grexa e Lubke (2001) e Terzi *et al* (2009) e ignição através de faísca elétrica. Para amostras tratadas, foi percebido um terceiro pico na curva de HRR, sendo concluído que o primeiro era devido a ignição e combustão, um segundo pico observado quando o núcleo OSB (não tratado), envolveu-se na combustão, e um terceiro, que ocorre perto do fim dos testes, que normalmente está associado com o aquecimento mais rápido da parte de trás da amostra, como apresenta a figura 2.8.

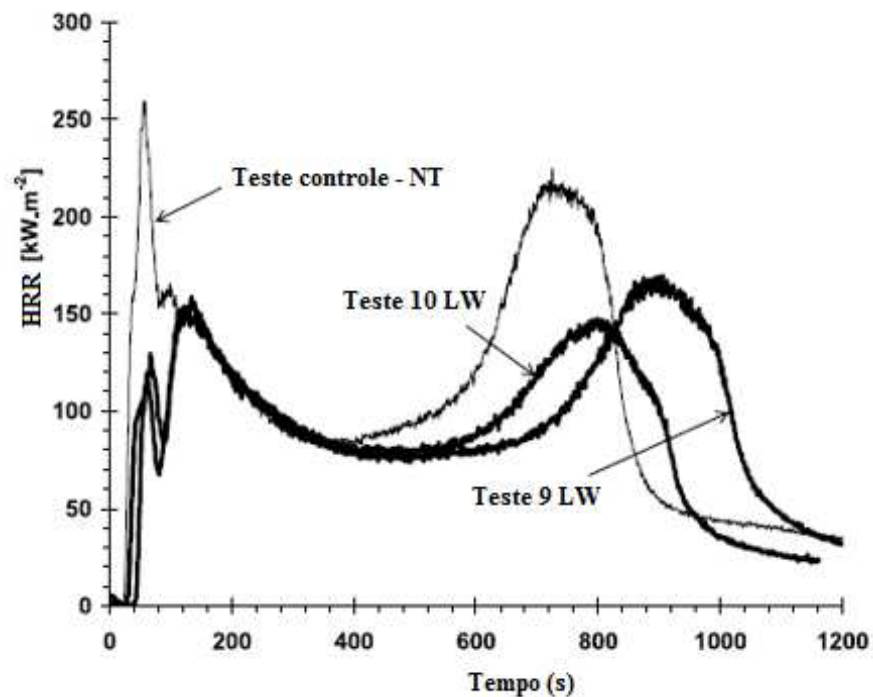


Figura 2.8: Curva HRR para duas espécies *lime water* (LW) (Testes 9 e 10) e para uma amostra de controle.

Fonte: Ayrilmis *et al.* 2007

O autor também utilizou o modelo preditivo de (White e Dietenberger, 2001), para estimar o valor de FSI, apresentando o gráfico de propensão para o desenvolvimento do incêndio (figura 2.9). As linhas para β são usadas para dividir as parcelas em áreas onde o modelo estima que a ASTM E84 FSI será em uma das três classes utilizadas nos códigos de construção dos E.U.A.

No gráfico, FRT é um retardador de fogo para a madeira tratada que provavelmente satisfaz os requisitos de segurança contra incêndio nos códigos de construção nos EUA.

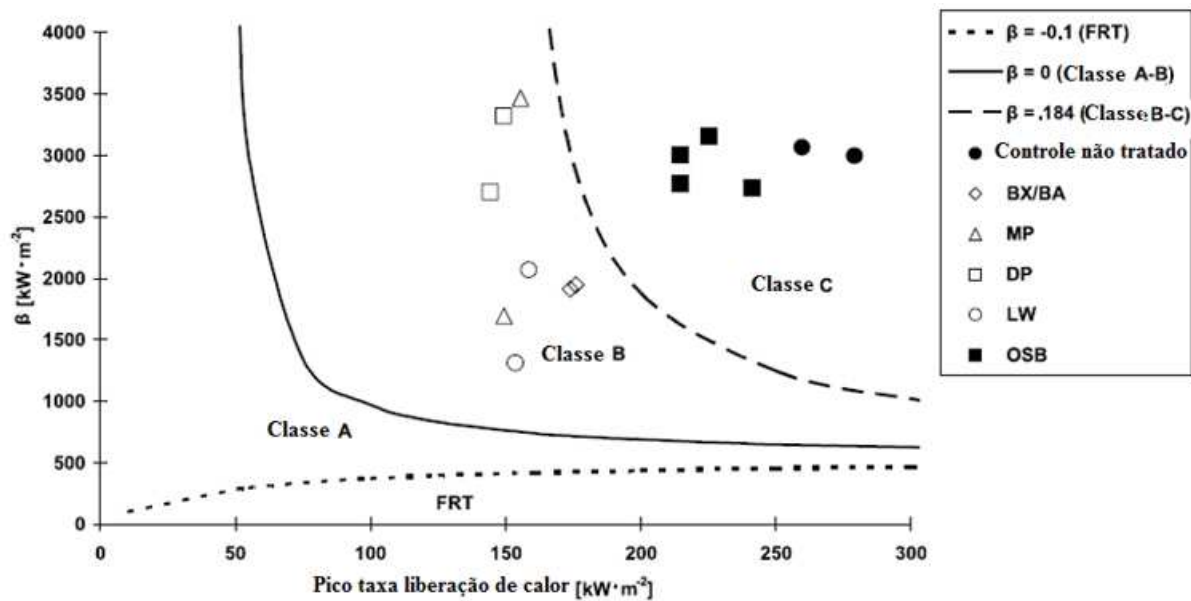


Figura 2.9: Propensão de crescimento do fogo com base em um modelo discutido em Dietenberger e White (2004).

Fonte: Ayrilins *et al.*, 2007

No trabalho foi concluído que os painéis de OSB, tratados com retardadores de chama foram significativamente afetados pelo tratamento. As propriedades mecânicas, avaliadas no trabalho, de todos os painéis tratados foram menores quando comparados com a amostra não tratada. Já quanto ao fogo, os tratamentos reduziram a taxa média de liberação de calor e os valores totais de liberação de calor em relação a amostra de controle.

Castro (2009), fez uma análise experimental e teórico numérica das características de combustão de algumas madeiras, dentre elas duas que foi usada neste no trabalho (pinus e eucalipto). Na sua pesquisa foi projetada e construída uma bancada experimental contendo dois calorímetros (um cônico e um cilíndrico) e um sistema de coleta e registro de dados, para a determinação das características de queima de cilindros e placas planas de madeira. Os corpos de prova planos usados tinham dimensões de 10cm x 10cm x 5cm, cortadas com a face em que incide a radiação térmica na direção paralela ou perpendicular à orientação das fibras da

madeira. E os corpos cilíndricos tinham 3cm de diâmetro e 10 cm de altura. Foram realizadas medidas de todas as fases de queima das diversas madeiras.

O projeto do calorímetro cilíndrico possibilitou obter uma boa uniformidade e uma razoável axissimetria do escoamento ao redor do corpo de prova cilíndrico. Permitiu também obter uma vazão de ar induzida por efeito convectivo (efeito chaminé) suficiente para manter a queima da amostra e reduzir as perdas de calor. Permitiu, ainda, um aquecimento uniforme da amostra com o controle preciso da potência incidente no corpo de prova.

Com os resultados dos ensaios, Castro (2009) chegou a algumas conclusões, dentre elas:

(i) As curvas de evolução de massa e de massa normalizada apresentam, em geral, pontos de mudança de curvatura, indicando os momentos da autoignição e de extinção da chama, ou caso não haja ignição, os pontos de início e de fim da pirólise. Após a extinção da chama ou o fim da pirólise, quando não houver chama, ocorre o processo de incandescência. Os pontos de autoignição e de extinção da chama são identificados mais claramente observando-se os picos existentes nas curvas de taxa de consumo e de taxa de consumo percentual instantâneo. Quando não ocorre a auto-ignição estas curvas não apresentam picos, porém o ponto de início de pirólise pode ser identificado pelo fim do aumento inicial das taxas de consumo e o ponto de fim de pirólise pode ser identificado pelo início da região de taxa de consumo relativamente baixa e constante indicativa do processo de incandescência. Na região entre a ignição e a extinção da chama as curvas de taxa de consumo tomam um perfil aproximadamente parabólico.

(ii) O teor de umidade influencia, reduzindo as taxas de liberação de voláteis, porém não afeta as massas e as taxas de consumo durante a fase de incandescência.

(iii) A presença de umidade influencia todas as fases da queima de amostras de madeira, aquecidas a uma taxa constante. Embora o tempo total de secagem e de queima, até uma dada percentagem da massa inicial, não seja afetado significativamente pelo teor de umidade, a fração consumida e a duração de cada fase são modificados.

(iv) As placas planas apresentaram curvas de evolução de massa similares às dos cilindros de madeira, com pontos de mudança de curvatura indicando transição de regimes de secagem e pirólise para regime de queima com chama e deste para regime de queima incandescente. Observou-se que as curvas de evolução de massas das amostras apresentaram dispersão pequena para as amostras paralelas, o que não é verificado para as amostras perpendiculares.

(v) Verificou-se que a orientação das amostras influencia nas taxas de liberação de voláteis, sendo esta taxa maior, durante o período de pirólise, para as amostras com a face onde incide o

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, que no caso perpendicular é, em média, o dobro do paralelo. Possuindo a orientação paralela a condutividade menor, é razoável que a taxa de liberação de voláteis neste caso seja maior devido ao aumento local da temperatura do corpo de prova, em decorrência da maior dificuldade de se propagar o calor pelo interior da amostra. As curvas de evolução de massa das placas planas com orientações de grãos diferentes foram similares na forma, porém com diferenças entre os tempos característicos apresentados. O tempo médio até o fim de pirólise para a orientação paralela foi quase 15 % maior. Os perfis de temperaturas medidos 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.

Figuerola e Moraes (2005) fizeram um trabalho com uma abrangente revisão bibliográfica sobre o comportamento da madeira a temperaturas elevadas, abordando assuntos relativos à degradação térmica, à taxa de carbonização e à influência de temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira. Um dos objetivos do trabalho era contribuir para a eliminação do preconceito relativo ao uso da madeira nas construções brasileiras. Como conclusões do trabalho pode-se citar: as taxas de carbonização das madeiras variam conforme a massa específica, o teor de umidade, a espécie de madeira, as dimensões das peças de madeira, a forma da seção transversal e a intensidade do fluxo de calor; e a redução das propriedades mecânicas em função da temperatura indica a necessidade de empregar um fator redutor das propriedades obtidas à temperatura ambiente.

O trabalho de Marney *et al.* (2008) apresenta uma co-formulação de óleo usado para conservação da madeira com um retardador de chama a base de polímero sintético, avaliando o efeito do uso deste retardador e seu impacto na ação fungicida e termiticida do conservante. Os retardadores usados (FR1 a FR4) foram reformulados com nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$). O índice de desempenho do fogo (FPI) foi determinado a partir de dados de tempo de ignição e a taxa máxima de liberação de calor (PHRR), que por sua vez, foram medidos a partir do cone calorímetro de perda de massa com uma termopilha. Foi usado um fluxo de radiação de 25kW/m^2 , com orientação horizontal e chama piloto. As propriedades do conservante foram avaliadas usando bioensaios de decomposição de térmitas e blocos de solo. Em resumo, descobriu-se que a taxa de crescimento do fogo foi reduzida quando usou-se retardadores de

fogo em combinação com o conservante da madeira, e que o PHRR define melhor o desempenho do fogo do que o FPI.

O desempenho do conservante da madeira foi fortalecido contra a deterioração dos fungos e o ataque de térmitas quando usado em combinação com os retardadores de fogo. Os retardadores de fogo também demonstraram algumas de suas próprias propriedades de preservação da madeira.

Foi observado uma grande variação em alguns tempos de ignição, o que não surpreendeu devido ao uso de um fluxo de calor relativamente baixo. Isso também foi observado por Grexa *et al.* (1996) que descobriram que um grande problema com a avaliação dos dados de ignição observados experimentalmente é a incerteza do tempo de ignição contínua. Esses pesquisadores reduziram a incerteza definindo o menor limite de exposição à radiação para a determinação do tempo de ignição a 30kW/m².

Quando exposto a um fluxo constante de calor radiante de 25kW/m², todos os tratamentos considerados dentro deste trabalho atuaram para diminuir a taxa de crescimento de fogo, como mostrado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Parâmetros do fogo da *P. radiata* tratada determinados usando um CCPM com fluxo de calor de 25kW/m².

Tratamento	Parâmetros de Fogo		
	TTI (s)	PHRR* (kW/m ²)	FPI (m ² s/kW)
Sem tratamento (controle)	98 (1)	182 (7)	0,54 (0,02)
Solvente (controle)	127 (6)	180 (9)	0,71 (0,04)
CuN	115 (10)	149 (8)	0,77 (0,05)
FR1	101 (2)	121 (4)	0,83 (0,05)
FR2	127 (16)	144 (3)	0,88 (0,09)
FR3	81 (2)	103 (11)	0,82 (0,06)
FR4	120 (25)	107 (5)	1,04 (0,28)
CuN/FR1	70 (5)	107 (9)	0,66 (0,1)
CuN/FR2	68 (7)	137 (6)	0,50 (0,05)
CuN/FR3	55 (7)	97 (6)	0,57 (0,05)
CuN/FR4	72 (16)	78 (4)	0,92 (0,15)

Fonte: Marney *et al.* (2008)

- o número entre () representa a quantidade de amostras ensaiadas.

VITO (2013) fez um estudo criterioso do processo de carbonização de vigas de madeira de eucalipto (*Eucalyptus Citriodora*) tratadas com cinzas de casca de arroz (CCA) para determinar a capacidade máxima de suporte de carga para elementos estruturais desta madeira em tamanho real à temperatura variando entre 32°C e 700°C, simulando uma situação real de incêndio. As vigas, em tamanho natural, foram divididas em 5 grupos de temperatura (32°C, 200°C, 350°C, 650°C e 700°C) que eram alcançadas pelo uso de queimadores a gás natural por um tempo igual a 60 minutos. O rompimento das amostras se dava através do ensaio de resistência à flexão estática. Com os resultados obtidos foi analisada a redução proporcional da seção para cada temperatura exposta e a carga máxima suportada. Os resultados mostraram a redução gradativa da seção transversal e conseqüentemente da capacidade de resistência das amostras. Ficou evidente que a capacidade de suporte de carga das vigas de madeira está ligada diretamente à seção transversal, sendo menor a redução de seção para peças maiores.

Hasburgh *et al.* (2015) compararam resultados de HRR usando o conecalorímetro e o CCPM, com termopilhas instaladas na parede da chaminé do equipamento. Foram analisadas madeiras de média e alta densidade, tratadas e não tratadas com retardadores de chama, submetidas a irradiância de 50kw/m² em uma orientação horizontal, seguindo o padrão ASTM E-1354. Eles concluíram que é amplamente aceito que o conecalorímetro, com o método de consumo de oxigênio, é mais preciso para obter as taxas de liberação de calor que o CCPM com termopilha. Mas o segundo é uma alternativa econômica, para o qual os resultados mostram uma concordância, fornecendo previsões sensíveis para as taxas de liberação de calor.

Os gráficos das figuras 2.10 e 2.11 indicam o nível de concordância entre o cone e o CCPM para os materiais do trabalho. Ambos ilustram que, para a maioria dos materiais, a liberação de calor total está em perante acordo, com um viés de quase zero e teste de desvio não significativo ($p = 0.1328$).

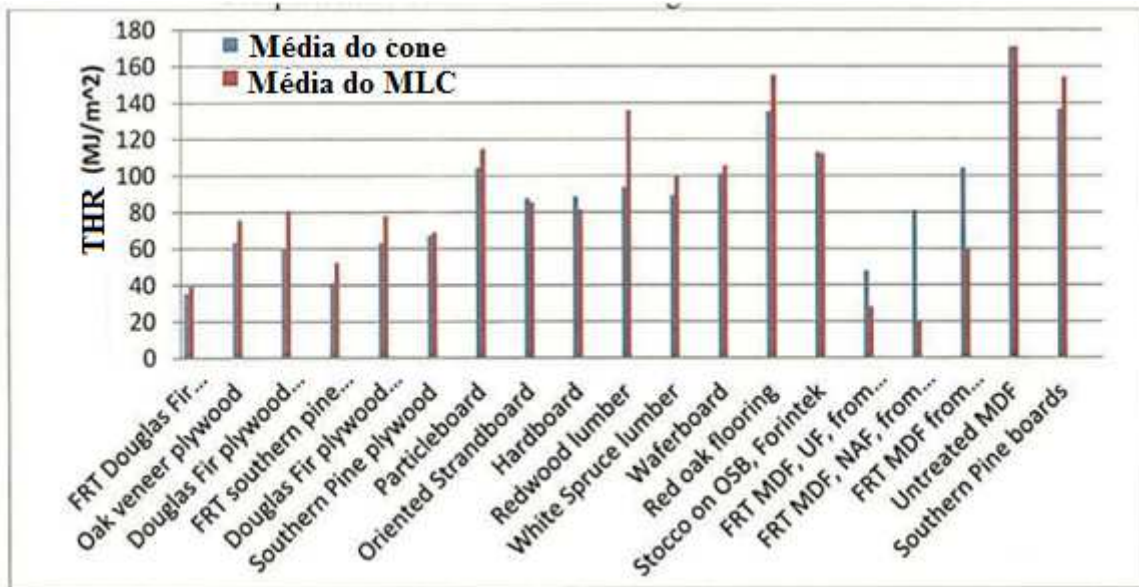


Figura 2.10: Comparação do HRR médio fornecido pelo cone e pelo CCPM.

Fonte: Hasburgh *et al.*, 2015.

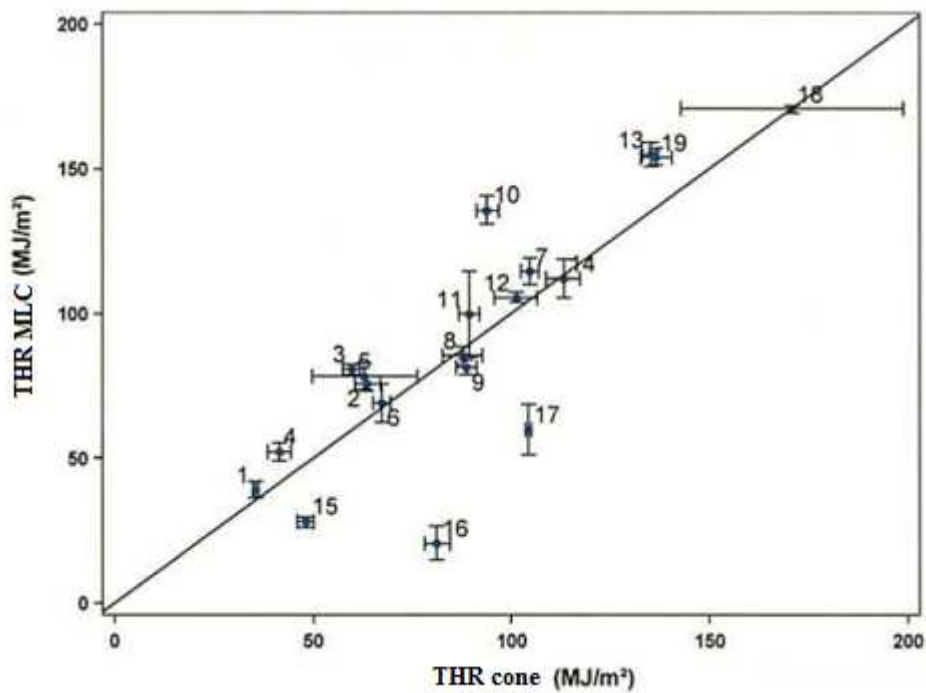


Figura 2.11: THRR médio para cada material, com erro padrão de ± 1 .

Fonte: Hasburgh *et al.*, 2015.

Lawrence e Jiang (2017), escrevem sobre a variedade de métodos que podem ser usados para medir porosidade e caracterizar a microestrutura de materiais em geral, e discutem como algumas dessas técnicas foram usadas em bio-agregados. Eles definem que, em primeira instância, baixa densidade está associada com baixa resistência, mas também com baixa condutividade térmica. Por esta razão a maioria dos bio-agregados não são adequados para uso como materiais estruturais, mas são iminentemente adequados para atuar como um enchimento de baixa densidade em materiais compósitos que conferem baixa condutividade térmica no bio-composto resultante.

Eles mencionam que a porosidade é uma medida da fração de vazio em um material, que pode ser do tipo "fechado", e inacessível ou "aberto" e conectado a outros vazios e, então, ao exterior do material. A porosidade também pode ser expressa como uma porcentagem do volume de material. É um parâmetro bastante fácil de definir, mas certamente não é tão fácil de quantificar, já que os vazios podem abranger de poucos nanômetros a centímetros.

No trabalho eles ainda discutem que não existe um método que possa adequadamente cobrir esta enorme variedade em escala, como visto na figura 2.12. Além disso, a porosidade pode ser modificada por uma variedade de processos durante o teste, tais como deformação, alteração hidrotérmica e produção de porosidade secundária ou de fratura.

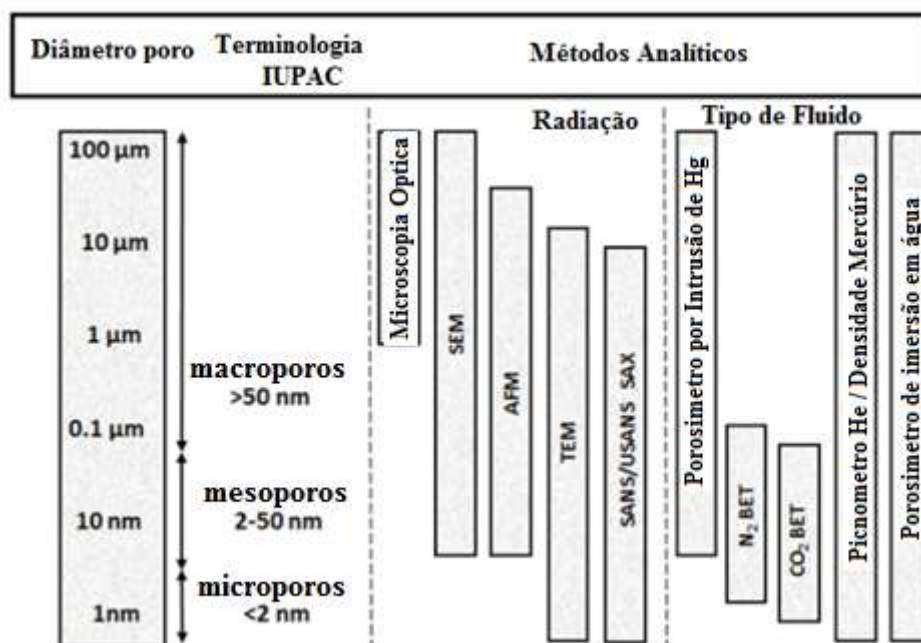


Figura 2.12: Métodos usados para determinar a porosidade e a distribuição dos poros (PSD)

Fonte: Anovitz e Cole, 2015.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MÉTODOS

O modelo do equipamento usado é o CCPM FTT-0014/2012 produzido pela *Fire Testing Technology* e calibrado conforme metodologia descrita em Rocha (2014). O CCPM tem o nome derivado da forma cônica do aquecedor radiante que produz um fluxo de calor praticamente uniforme ao longo da superfície da amostra. O método utilizado pelo equipamento segue os procedimentos descritos nas normas internacionais ASTM E1354-11B (2013) que regulariza toda a parte de calibração do equipamento e ISSO 5660-1 (2002) específica para ensaios sobre HRR. A superfície da amostra (área de no máximo 100 x 100mm e espessura máxima de 50mm) é exposta a um nível constante de radiação de calor, dentro da gama de 0-100 kW/m², e colocada sobre uma célula de carga que registra a taxa de perda de massa durante a combustão. De acordo com a norma, três amostras deverão ser testados em cada nível de fluxo de calor (os níveis típicos de irradiância são 25, 35, 50 e 75 kW/m²). Gases voláteis da amostra aquecida são inflamados por uma faísca de ignição elétrica. Os gases de combustão são recolhidos por um exaustor para análise posterior. Esta análise de gás faz com que seja possível calcular a taxa de liberação de calor e para avaliar a produção de gases tóxicos (esse último em apenas alguns equipamentos), de materiais e produtos. O princípio para a medição da taxa de liberação de calor está baseado no *princípio de Huggett* (1980) de que o calor bruto de combustão de qualquer material orgânico está diretamente relacionado com a quantidade de oxigênio necessário para a combustão.

Ainda segundo a Monique (2014) existem dois tipos de Cone Calorímetro: o de orientação vertical, que é empregado para estudos de diagnóstico, e o horizontal, de uso mais comum e utilizado nesse presente trabalho. O equipamento ainda reúne dados sobre o tempo de ignição, perda de massa, calor efetivo de combustão, calor total liberado e outros parâmetros associados às suas propriedades de queima. A Figura 3.2 representa o conjunto experimental do CCPM usado, o qual é composto de dois componentes: (i) o conjunto do cone (Figura 3.1 (a)) - constituído por (1) aquecedor cônico, (2) célula de carga, (3) faísca de ignição, (4) medidor de fluxo (5) três termopares de controle de temperatura (6), mecanismo de isolamento de calor, (7)

suporte de montagem ajustável para amostras horizontais, e (ii) unidade de controle (Figura 3.1 (b)) - composto por (8) controlador de temperatura com leitura digital, (9) interruptores de liga/desliga, de ignição, célula de carga e aquecedor cônico e (10) controlador de célula de carga com leitura digital e tare eletrônico.

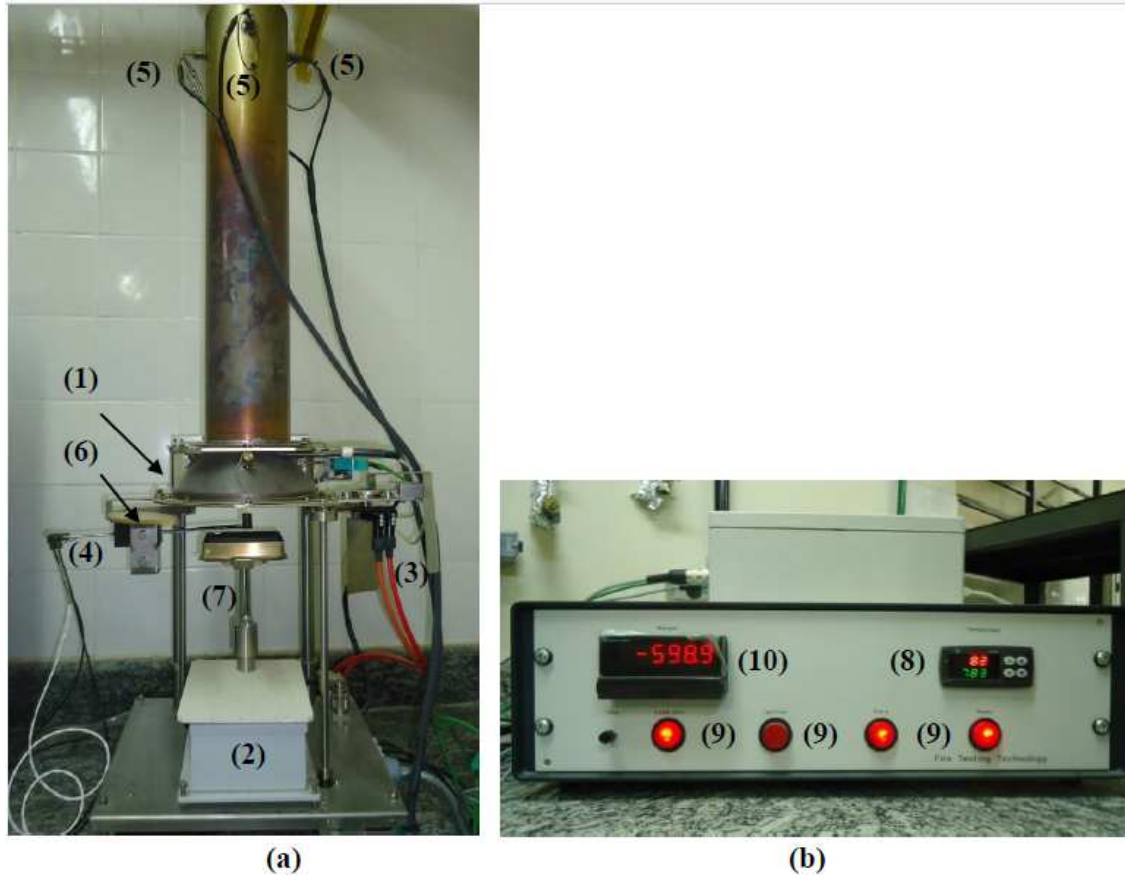


Figura 3.1: Imagem do Cone Calorímetro utilizado nos ensaios, (a) conjunto do cone e (b) unidade de controle.

Fonte: Rocha, 2014.

Segue abaixo o detalhamento dos componentes do CCPM de orientação horizontal utilizado:

(i) Aquecedor radiante cônico elétrico avaliado em 5000W e 240V.

(ii) Controladores de temperatura, capaz de mantê-la constante dentro do equipamento. Os controladores possuem uma gama de entrada de temperatura de 0-1000°C.

(iii) Suporte de amostra, nesse caso, de orientação horizontal.

(iv) Sistema de exaustão para escape de gases, com monitoramento de oxigênio e de medição do fluxo de instrumentação.

(v) Escudo removível no aquecedor, para isolar a amostra do fluxo de calor antes do início dos testes.

(vi) Vela de ignição elétrica, com descarga de 50 a 60Hz.

(vii) Reguladores de saída de gás Metano (com 99,5% de pureza).

A norma ASTM E 1354 -11b (2013) fornece o método de ensaio para medir a razão de perda de massa, a razão de liberação de calor ou potência do incêndio (HRR), o tempo para uma ignição sustentada, o calor de combustão efetivo e a área específica de extinção. A superfície não exposta a radiação dos corpos de prova deve ser envolvida em uma folha de alumínio e eles são postos sobre um colchão de lã de rocha de acordo com a ISO 17554 (2014) e a ISO 13927 (2015). O fluxo de calor externo usado foi de 50 kW/m² (Grexa e Lubke, 2001; Terzi *et al.*, 2009; Ayrilmis *et al.*, 2007). Nos ensaios foi definido que usaríamos a combustão espontânea, ou seja, a ignição ocorre naturalmente com o aumento da temperatura, sem chama piloto. O critério para caracterizar a ignição como sustentada é 10s (Terzi *et al.*, 2009). Durante o ensaio, a potência do incêndio é medida pelo método do consumo de oxigênio.

A medição de HRR baseia-se no princípio de que a queima completa de 1g de um material em condições de ar ambiente libera a mesma quantidade de calor. Uma termopilha é usada para medir o calor liberado pela amostra à medida que sua massa é consumida. A calibração da termopilha geralmente é feita através da queima de 1g de metano, que libera 13,1 kJ. Medindo a massa queimada em intervalos regulares de 1 segundo, o MLR e o HRR são obtidos em tempos discretos. A perda de massa total (TML) e o calor total liberado (THR) são obtidos por integração direta de MLR e HRR em função do tempo. O EHC é calculado para cada amostra dividindo-se o THR pelo TML. O tempo de ignição (TTI) que é o tempo de iniciação da chama, é registrado pela observação direta de uma chama sustentada, enquanto a temperatura da ignição é medida por um termopar colocado na superfície da amostra através de um furo localizado no centro do suporte em cada corpo de prova, como é mostrado na figura 3.2.

Após a calibração do CCPM, somente a perda de massa e a diferença de potencial gerada na termopilha são medidas durante o teste. Todas as outras quantidades são calculadas analiticamente. Isso torna o teste CCPM muito simples e útil. No entanto, os testes CCPM não geram dados sobre gases de combustão como CO₂, CO e NO_x.

A taxa média de perda de massa, \dot{m} , expressa em gramas por segundo, entre dois tempos, t , em um ensaio, é dada pela equação 3.1:

$$\dot{m}_{t_1-t_2} = \frac{m_{t_1}-m_{t_2}}{t_2-t_1} \quad (3.1)$$

onde,

m_{t_1} : massa expressa em gramas, no tempo 1, expresso em segundos.

m_{t_2} : massa expressa em gramas, no tempo 2, expresso em segundos.

A taxa de perda massa, m , em cada intervalo de tempo pode ser calculada utilizando cinco expressões de diferenciação numérica:

Já para determinar o calor total liberado durante a combustão, q'' , é feito o somatório do seguinte modo:

$$q'' = \sum_i q_i''(t)\Delta t \quad (3.2)$$

Onde a soma começa na leitura após a última taxa negativa de liberação de calor observada no início do teste e continuando até a leitura final registrada.

O calor efetivo de combustão médio, a partir da soma feita ao longo de todo o teste, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum_i \dot{q}_i(t)\Delta t}{m_i - m_f} \quad (3.3)$$

$$e_i = \frac{M_i}{A \cdot \rho} \quad (3.4)$$

A taxa de Liberação de Calor pode ser calculada usando as equações 3.5 a 3.7:

$$\dot{q}''(t) = \frac{\dot{q}(t)}{A_S} \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}(t) = \frac{\Delta h_c}{r_o} (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2}(t))}{1.105 - 1.5X_{O_2}(t)} \quad (3.6)$$

onde:

$$X_{O_2}(t) = X_{O_2}^1(t + t_d) \quad (3.7)$$

Onde,

\dot{q}'' representa a taxa de liberação de calor por unidade de área (kW/m²).

\dot{Q} representa a taxa de Liberação de Calor (kW).

A_S representa a área inicialmente exposta (m²), isto é, 0,0088m² na orientação vertical e de 0,01m² na orientação horizontal.

Δh_c representa o calor líquido de combustão (kJ/kg), sendo o valor da razão ($\Delta h/r_o$) igual a $13,1 \times 10^3$ kJ/kg, a menos que um valor mais exato é conhecido para testar o material.



Figura 3.1: Suporte para uso no CCPM com a perfuração para o termopar.

3.2 MATERIAIS

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram conseguidos no mercado regional, cortados sempre de uma mesma peça da madeira, garantindo assim a similaridade entre amostras de mesma espécie. Foram selecionadas 9 espécies, sendo 9 corpos de prova para cada espécie, com dimensões de 97mm x 97mm x 20mm (comprimento x largura x espessura), conforme recomendação encontrada na ISO 5660-1 (2002), com as fibras da madeira de modo a apresentar orientação num plano perpendicular ao fluxo de incidência. A Tabela 3.1 apresenta as 9 espécies de madeira utilizadas. A identificação do grupo (ID), nomes locais e científicos e a família botânica são fornecidos para cada espécie de madeira.

Tabela 3.1 – Amostras de madeira usadas no teste do Conecalorímetro

ID	Nome regional	Família botânica	Nome científico
AN	Angelin	<i>Leguminosae</i>	<i>Hymenolobium flavum</i>
MU	Muiracatiara	<i>Anacardiaceae</i>	<i>Astronium sp</i>
EU	Eucalipto	<i>Myrtaceae</i>	<i>E. saligna</i>
CU	Curupixá	<i>Sapotaceae</i>	<i>Micropholis venulosa</i>
IP	Ipê	<i>Bignoniaceae</i>	<i>Handroanthus impetigosus</i>
PA	Paraju	<i>Sapotaceae</i>	<i>Manilkara longifolia</i>
PI	Pinus	<i>Pinaceae</i>	<i>Pinus elliottii</i>
SU	Sucupira	<i>Fabaceae (Leguminosae)</i>	<i>Bowdichia nitida</i>
JA	Jatobá	<i>Leguminosae</i>	<i>Hymenae sp</i>

A identificação das madeiras, com sua família, nome científico e classe foram fornecidos pelo Departamento de Botânica, ICB/UFMG, após caracterização de uma amostra de cada.

As amostras foram colocadas em uma estufa com renovação e circulação de ar, de baixa temperatura, por períodos de 4 horas. A cada período todas as amostras eram pesadas e recolocadas na estufa até a variação da massa ser inferior a 1%. Em seguida as amostras foram colocadas em sacos herméticos, conforme figura 3.3.



Figura 3.3: Preparação dos corpos de prova para ensaio no CCPM.

Para a utilização do termopar junto ao CCPM foi necessária a confecção de uma panela, já que a original do equipamento não possui nenhum furo. A panela foi confeccionada com as dimensões do projeto do CCPM, apropriada para ensaio com CPs de 100x100mm. Além do furo centralizado no fundo da panela, o projeto contemplou uma “gaveta” para passagem da fiação do termopar, como já mostrada na figura 3.2.

3.3 TRATAMENTOS

Existem 3 maneiras de aplicar tratamentos em madeiras ou produtos de madeira: pela impregnação da madeira com a solução a ser utilizada; incorporando a solução em um sistema de cola, ou tratando a superfície do produto (madeira) (Grexa e Lubke, 2001).

O tratamento anti-inseto foi aplicado usando a terceira técnica. As amostras de 1 a 3 em cada série não foram tratadas (amostras referidas como "NT"), enquanto as amostras de 4 a 6 foram tratadas a uma concentração de 5% em volume (amostras referidas como "5%"), e para as amostras de 7 a 9, a concentração foi de 10% (amostras referidas como "10%"). O produto de tratamento foi o fipronil, com diluição a base de querosene, conforme indicado pelo fabricante. Foram utilizadas 3 demãos de pincelamento, com um tempo de secagem entre elas. Após o pincelamento as amostras foram deixadas ao ar livre, para vaporização do querosene. O controle desta vaporização foi feito através da pesagem dos corpos de prova, imediatamente antes do pincelamento, imediatamente após as 3 demãos, decorridas 4 horas, 10 horas e 18 horas do pincelamento. Novamente as amostras foram ensacadas, evitando assim a reabsorção de umidade do ar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados encontrados com a análise experimental no CCPM. As primeiras análises foram realizadas com 7 das espécies descritas acima (EU, PI, IP, CU, SU, PA e AN), que são as 7 espécies que sofreram ignição espontânea (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Espécies de madeira que sofreram ignição com chama aparente.

Gr	Nome	Família botânica	Nome científico	Densidade (ρ)
PI	Pinus	<i>Pinaceae</i>	<i>Pinus elliottii</i>	696
CU	Curupixá	<i>Sapotaceae</i>	<i>Micropholis venulosa</i>	795
SU	Sucupira	<i>Fabaceae</i>	<i>Bowdichia nitida</i>	824
AN	Angelin	<i>Leguminosae</i>	<i>Hymenolobium flavum</i>	846
EU	Eucalipto	<i>Myrtaceae</i>	<i>E. saligna</i>	957
PA	Paraju	<i>Sapotaceae</i>	<i>Manilkara longifolia</i>	1081
IP	Ipê	<i>Bignoniaceae</i>	<i>Handroanthus impetigosus</i>	1130

As tabelas 4.2a e 4.2b abaixo resumem alguns resultados obtidos durante os ensaios, dividindo essas madeiras em dois grandes grupos, sendo o primeiro com (ρ) ≥ 900 e o segundo com (ρ) ≤ 900 . A identificação (Gr) do grupo, identificação do número da amostra, abreviatura do nome local e espessuras são fornecidas. Quando se observa que uma amostra está ausente em uma série de grupos, entende-se que o resultado do teste no CCPM foi divergente com os outros do mesmo grupo. As Tabelas 4.2a e 4.2b listam a taxa máxima de liberação de calor (PHRR), liberação de calor total (THR), perda de massa total (TML), taxa média de perda de massa (MLR), calor de combustão efetivo (EHC), tempo de ignição (TTI) e temperatura de ignição (TIG). Embora tenha sido testado um mínimo de 3 amostras de NT, 5% e 10%, alguns corpos

de prova foram removidos do estudo de TTI, uma vez que o teste CCPM forneceu incertezas mesmo na reprodutibilidade desses resultados

Tabela 4.2a – Grupo de amostras com $\rho \geq 900$.

Gr	ID	t_s [mm]	PHRR [kW/m ²]	MHRR [kW/m ²]	THR [MJ]	TML [%]	MLR [%]	TTI [s]	EHC [MJ/kg]	TIG [°C]
PA	1	19,40	259,37	143,09	228,8	73,7	0,082	119	16,52	448,0
	2	19,40	263,25	133,3	227,8	74,2	0,08	116	15,38	442,8
	4	19,40	310,52	135,51	210,1	73,7	0,086	129	14,8	436,0
	5	19,60	315,43	145,62	222,7	73,3	0,085	154	16,04	435,5
	8	19,50	259,16	127,84	199,6	68,8	0,084	85	13,9	439,6
	9	19,60	315,16	131,57	210,7	74,1	0,081	120	15,06	433,0
EU	1	22,10	204,37	96,68	156,5	72,4	0,088	62	10,61	297,8
	2	22,10	207,93	122,9	193,4	72,3	0,088	63	12,96	299,7
	4	22,10	209,45	82,06	130,9	72,8	0,085	63	9,07	260,0
	5	22,10	221,68	116,91	178,7	71,8	0,091	63	12,11	255,3
	7	22,10	305,79	204,97	318,5	68,2	0,084	66	23,1	240,4
	8	22,10	222,23	99,16	156,1	70,4	0,082	55	11,25	242,5
IP	2	20,40	331,00	186,29	281,2	71,8	0,10	82	17,99	293,0
	4	21,10	325,00	186,1	305,1	73,3	0,10	59	17,8	265,4
	5	21,10	317,00	173,83	282,3	72,0	0,10	80	16,92	258,7
	7	20,80	480,00	274,84	441	72,6	0,10	65	27,82	209,0
	8	21,10	307,00	157,06	257,7	71,2	0,09	89	15,36	216,6

Tabela 4.2b – Grupo de amostras com $\rho < 900$.

Gr	ID	t_s [mm]	pHRR [kW/m ²]	aHRR [kW/m ²]	THR [MJ]	TML [%]	MLR [%]	TTI [s]	EHC [MJ/kg]	TIG [°C]
PI	1	20,70	316	245	192,1	68,3	0,12	24	19,26	250,8
	2	20,90	386	269	206,7	72,6	0,12	21	21,1	245,4
	5	20,90	336	240	204,7	73,7	0,12	50	19,74	239,0
	6	20,90	332	221	187,4	73,6	0,11	50	18,29	230,0
	7	20,20	422	309	288,1	76,6	0,10	67	27,9	236,7
	8	20,90	388	281	283,6	79,5	0,10	42	27,09	217,2
AN	1	21,00	326,67	158,3	190,7	75,9	0,10	48	15,56	223,0
	2	20,90	387,3	179,94	197,7	74,8	0,11	53	16,57	274,0
	4	21,00	284,03	163,38	203,3	75,4	0,10	60	16,44	382,0
	5	21,00	304,85	157,09	200,2	76	0,10	64	15,62	375,8

	7	21,00	367,23	200,29	276,9	69,7	0,09	64	22,31	237,1
	8	21,00	396,31	165,08	228,3	70,5	0,09	69	18,33	238,0
SU	1	20,40	315,04	198,12	208,8	72,8	0,10	44	17,48	388,6
	2	20,50	308,92	204,66	205,3	72,4	0,11	51	17,27	248,9
	4	20,00	275,87	178,54	184,6	73,6	0,10	48	16,61	309,7
	5	20,50	248,28	174,87	195,7	74,2	0,10	47	15,91	265,2
	9	19,00	255,3	142,99	137,6	74	0,10	52	13,17	408,0
CU	1	22,00	249,13	160,09	189,7	71,7	0,09	58	16,26	286,0
	5	22,00	239,99	163,54	199,5	71,7	0,086	63	17,39	260,8
	6	21,90	260,51	178,3	204,9	69,8	0,095	58	17,6	251,3
	7	21,00	429,00	311,96	385,6	69,6	0,085	61	34,09	235,0
	8	21,50	280,84	180,15	228,6	70,5	0,084	74	19,83	234,0

4.1 Tempo para Ignição (TTI)

Em primeiro lugar, é evidente que o TTI média varia entre os grupos de madeira, como é mostrado na Figura 4.1. Observa-se que o TTI média aumenta para os grupos NT, 5% e 10% no grupo com $\rho < 900$. Quando os grupos com $\rho \geq 900$ são considerados, observa-se que o TTI médio é praticamente constante para amostras de EU e diminui com o aumento da concentração de fipronil para o IP. Para o grupo PA, o TTI média apresenta um máximo nas amostras de 5%.

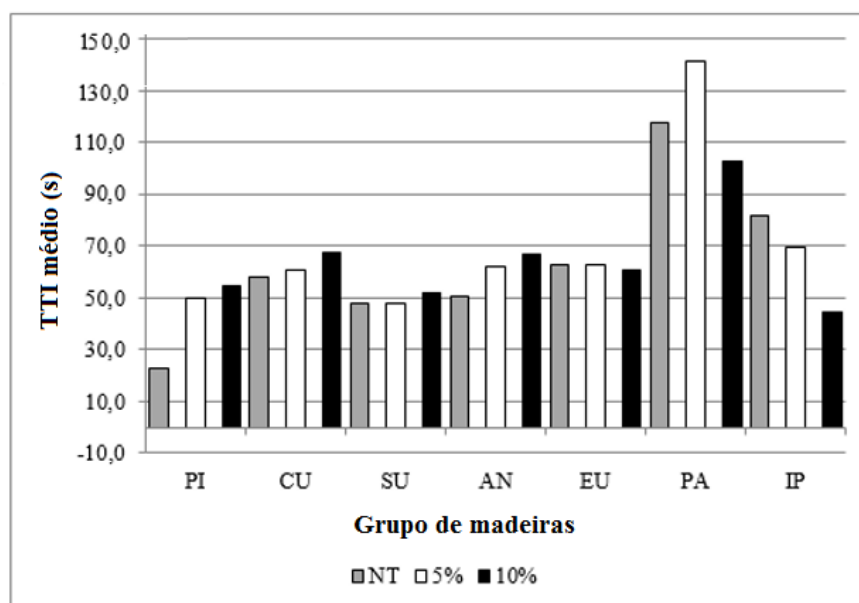


Figura 4.1: Média do TTI entre os grupos de madeira.

Seguindo uma sugestão de Harada (2001), a Figura 4.2 mostra o TTI média das espécies de madeira NT como uma função do fator " $k\rho c/I^3$ " onde k é a condutividade térmica dada em kW/mK por $k = (1,74 + 1,86\rho) \times 10^{-7}$ quando uma radiação de intensidade I (kW/m^2) é aplicada perpendicularmente à direção das fibras sendo ρ (kg/m^3) a densidade. Além disso, o calor específico c é considerado constante independentemente das amostras de madeira e tomado como $1,25 \text{ kJ/kg K}$. Observa-se boa relação linear entre TTI médio e " $k\rho c/I^3$ " com um coeficiente de correlação de 0,945.

Considerando as amostras de madeira tratada, verifica-se que o TTI perde progressivamente sua dependência linear de $k\rho c/I^3$ como mostrado na Figura 4.3 com coeficiente de correlação de 0,6183 para amostras de 5%. Na Figura 4.4 para amostras a 10%, a correlação linear entre TTI médio e $k\rho c/I^3$ é muito pobre com coeficiente de correlação de 0,0607." Conclui-se que o tratamento com solução de fipronil em solução de querosene causou progressivamente perda de dependência de linearidade de TTI média com a densidade.

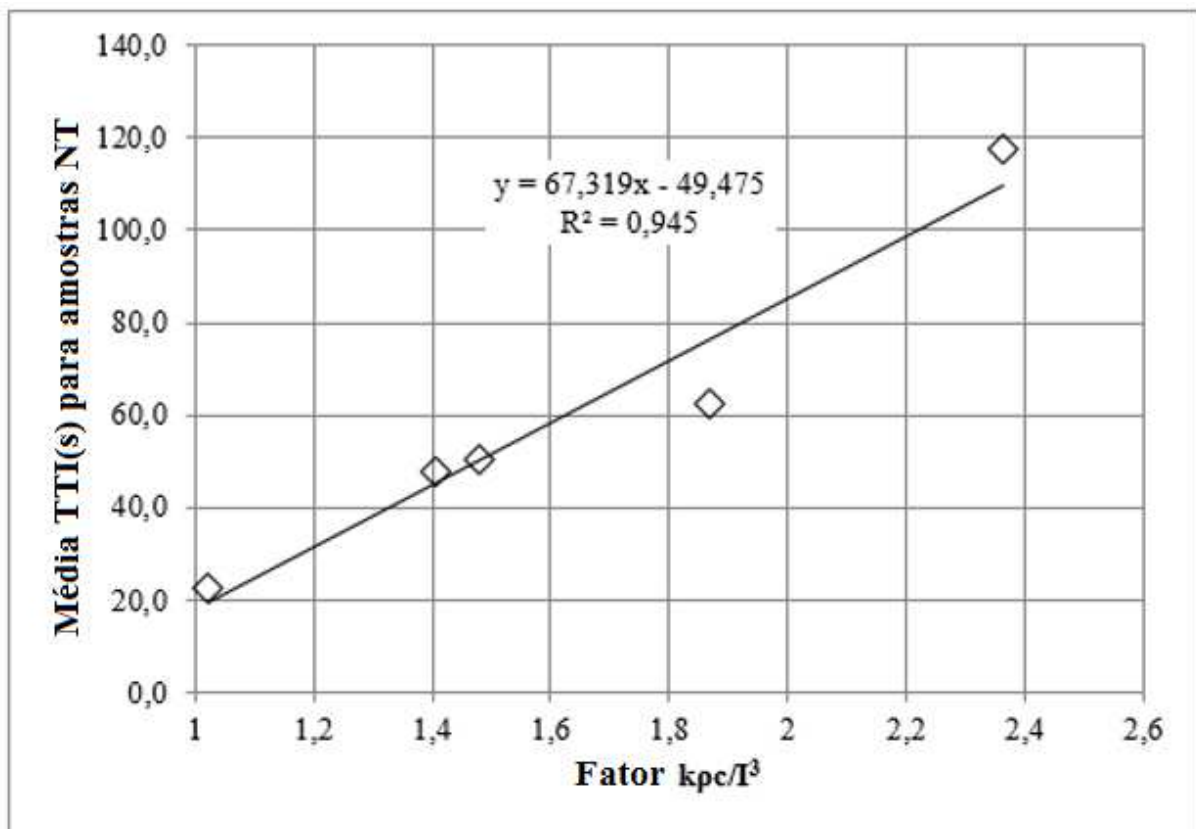


Figura 4.2: TTI (s) médio como função de $k\rho c/I^3$ para amostras NT

A variação do TTI médio para as amostras de madeira tratada quando comparada com NT pode ser devida à influência de outros parâmetros e não apenas da densidade no processo de

transferência de calor. É justo mencionar o trabalho de Simms e Law (1967) onde a ignição da madeira seca e úmida foi estudada. Eles identificaram dois fenômenos concorrentes ao queimar amostras de madeira com diferentes níveis de umidade, alterando a condutividade e o calor específico da madeira: (a) a transferência de calor por difusão molecular da água; (b) a perda de calor de regiões mais quentes através da vaporização da água. Fenômenos análogos podem explicar a influência do tratamento com soluções de querosene de fipronil em TTI médio medido nesta pesquisa. Para tal, uma investigação específica se faz necessária.

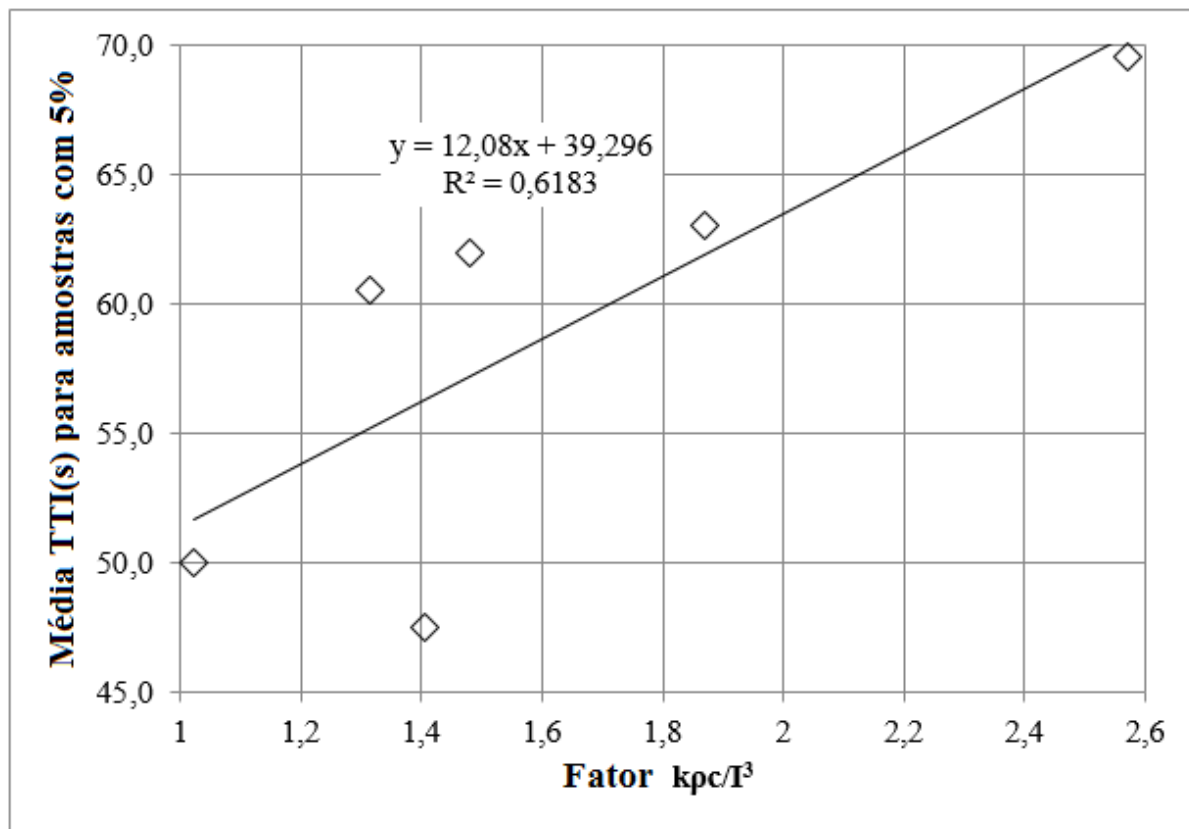


Figura 4.3: Média do tempo de ignição (s) em função de kpc/I^3 para amostras com 5%.

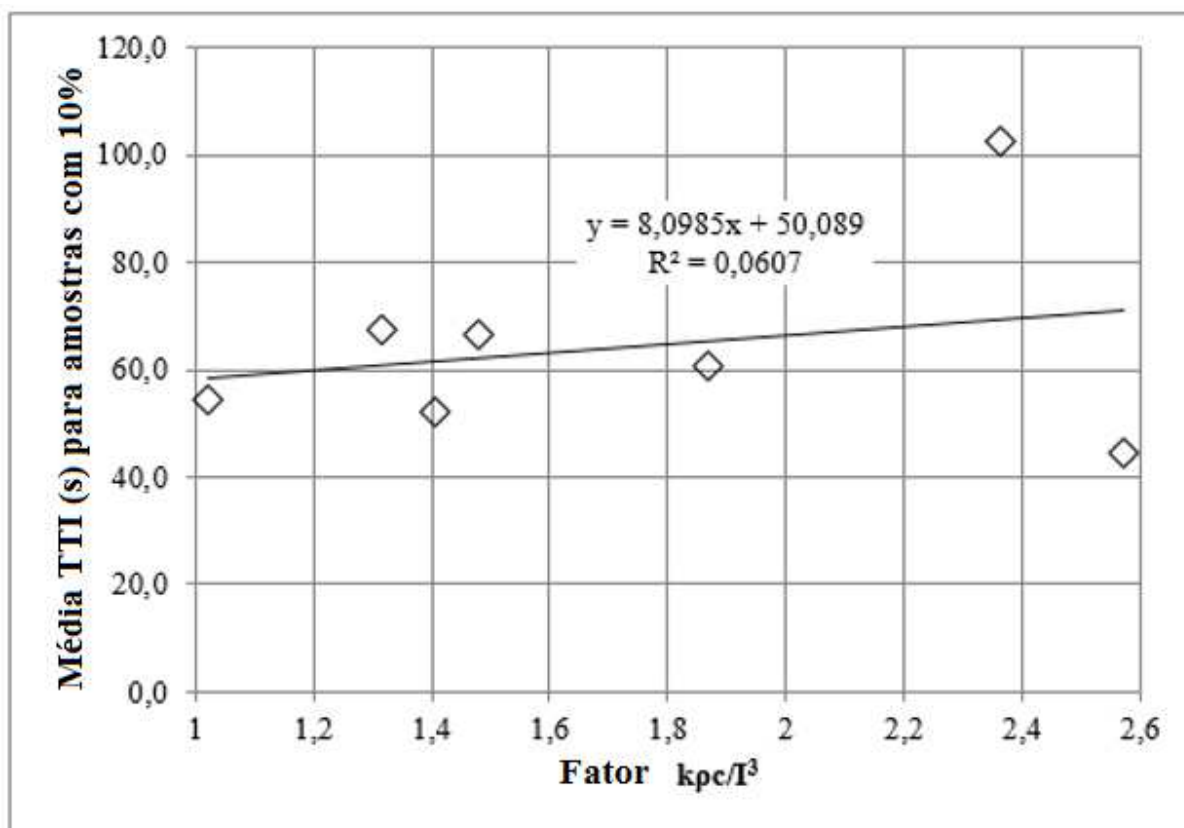


Figura 4.4: Média do tempo de ignição (s) em função do fator kpc/l^3 para amostras com 10%.

4.2 Temperatura de Ignição (TIG)

Observa-se na Figura 4.5 que a TIG tende a diminuir com o aumento da concentração de fipronil, exceto para os grupos SU e AN. Considerando que a temperatura de ignição do querosene é de 220 °C, é razoável prever que a TIG de amostras tratadas seja menor do que a de amostras de madeira não tratadas. Anomalias como as dos grupos SU e AN podem ser explicadas pela alta porosidade dessas espécies (Richter e Dallwitz, 2009), embora a porosidade seja difícil de quantificar devido ao tamanho e forma de poro complexo (Lawrence e Jiang, 2017) e está fora do âmbito desta pesquisa.

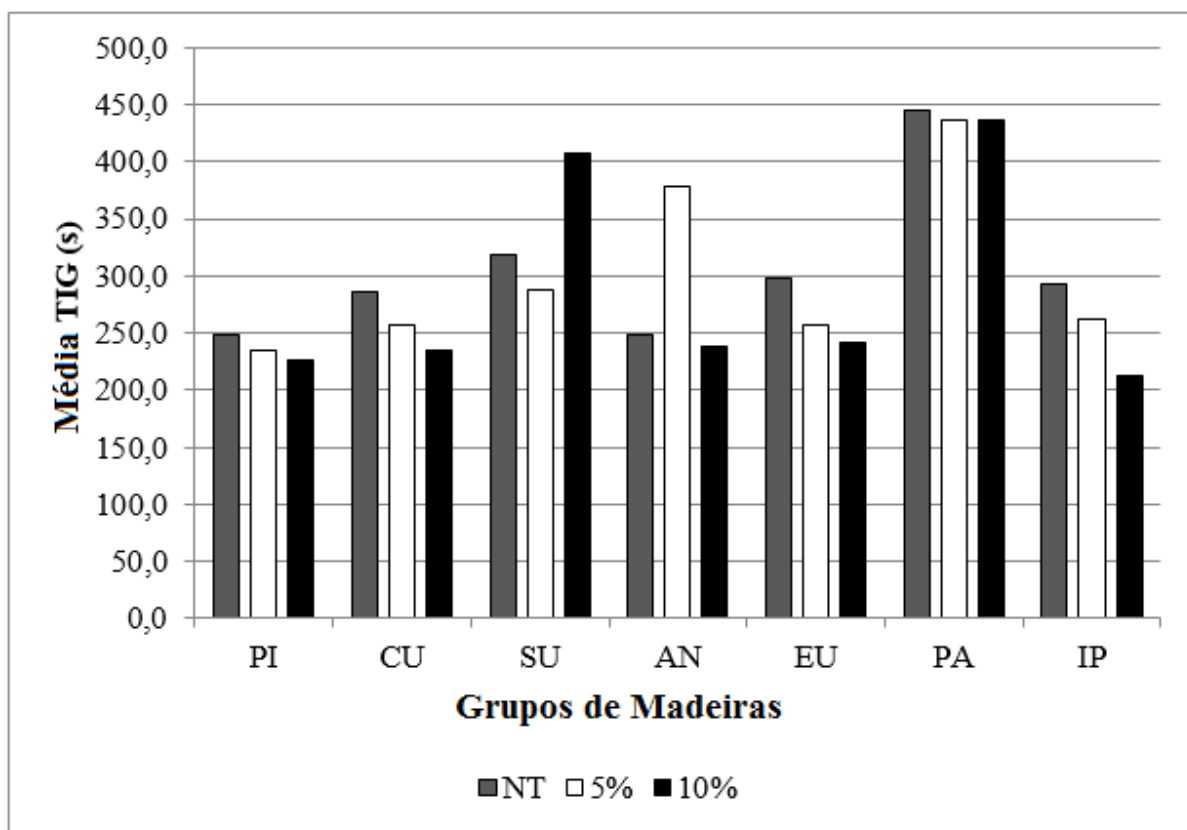


Figura 4.5: Temperatura de ignição média entre os grupos de madeiras.

Traçando a TIG média das amostras do grupo NT como uma função do TTI médio, uma relação linear com um coeficiente de correlação $R^2 = 0,7355$ é encontrado, como é mostrado na Figura 4.6. Assim, em geral, como o TTI médio diminui com a concentração de fipronil, é razoável aguardar valores menores de TIG. Como foi dito antes, anomalias ocorrem em face da porosidade da amostra de madeira, o que pode causar uma penetração relativamente profunda da solução de querosene em caso de alta porosidade ou manter uma camada superficial de solução de querosene em caso de baixa porosidade. No primeiro caso, valores mais baixos de TIG são esperados e no segundo caso, valores de mais altos de TIG.

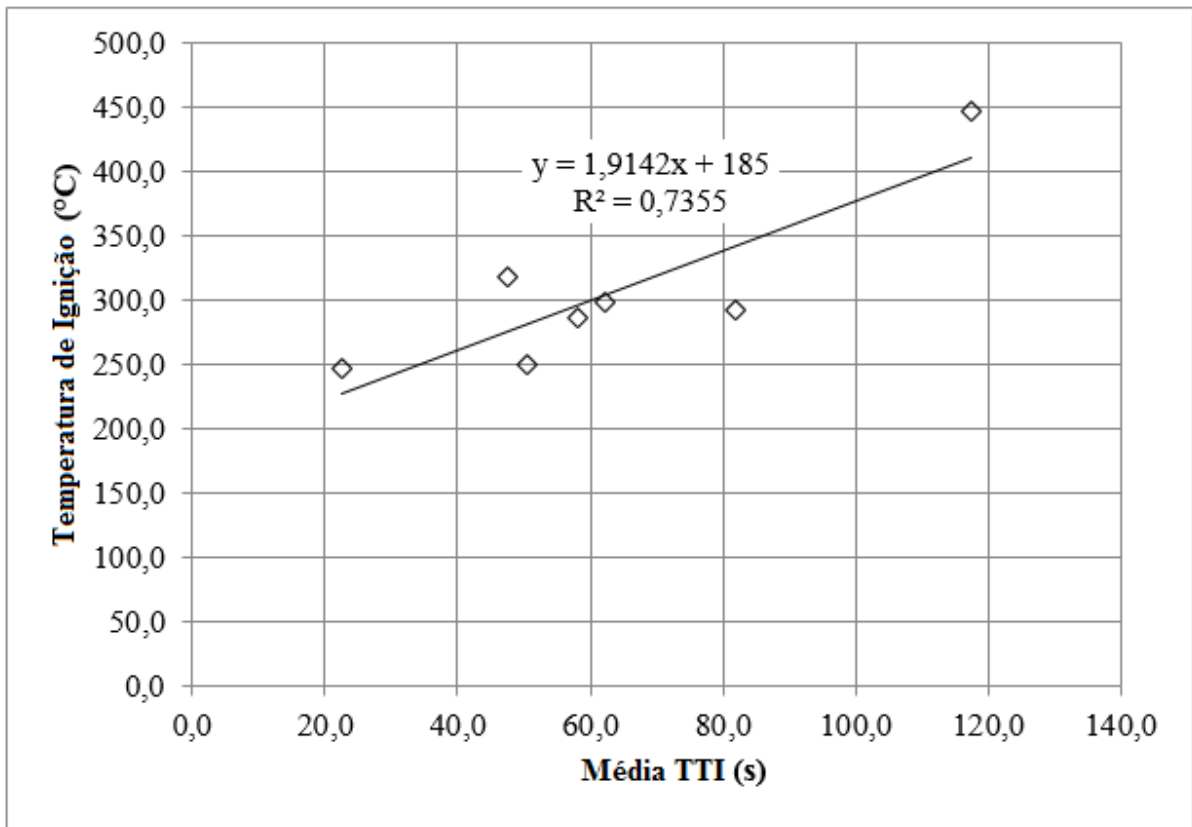


Figura 4.6: Relação linear da média do TIG em função do TTI das amostras NT.

Na busca de avaliar a influência do tratamento sobre a TIG, verificou-se que existem relações lineares entre a média da TIG em amostras de 5% e 10% e a média da TIG em amostras NT, como é mostrado na Figura 4.7. Como indicação, é visto que a TIG média das amostras tratadas diminui em 13% em relação a TIG média de amostras NT, independente da concentração da solução em querosene. Esta conclusão é perturbada por anomalias de amostras como geometria e distribuição de madeira porosa.

4.3 Taxa de Liberação de Calor (HRR)

A curva típica do HRR nos testes CCPM da madeira apresenta no início um pico agudo (Grexa e Lubke, 2001, Ayrilmis *et al.*, 2007). Um exemplo de curvas de HRR típicas é mostrado na Figura 4.8. À medida que a queima ocorre e uma camada de carbonização é formada na superfície das amostras, o HRR diminui, criando um platô praticamente estável, mas as camadas internas de madeira queimam progressivamente. Quando a camada de carbonização é fraturada, mais calor é absorvido (mais voláteis são liberados) e HRR aumenta até um segundo pico. O

segundo valor de pico corresponde então ao aumento da taxa de produção de voláteis na parte não queimada da amostra, antes que a chama ardente termine. A última parte da curva, após consumir os voláteis, corresponde à queima sem chamas, isto é, incandescência.

Outra análise é feita por Spearpoint e Quintiere (2000), que diz que o segundo pico na curva HRR resulta da camada de carbonização quebrando e contraindo, produzindo pequenas rachaduras na superfície que facilitam a fuga de substâncias voláteis que queimam e resultam no aumento observado na HRR. Depois que os voláteis forem exauridos, a combustão flamejante termina, deixando um resíduo sólido e reduzido HRR (Spearpoint, 1999). Alternativamente, de acordo com estudos de modelagem de pirólise e calorimetria de cone por Hagge *et al.* (2004), a forma, o tempo e a presença do segundo pico no perfil HRR dependem das condições no lado não exposto da madeira.

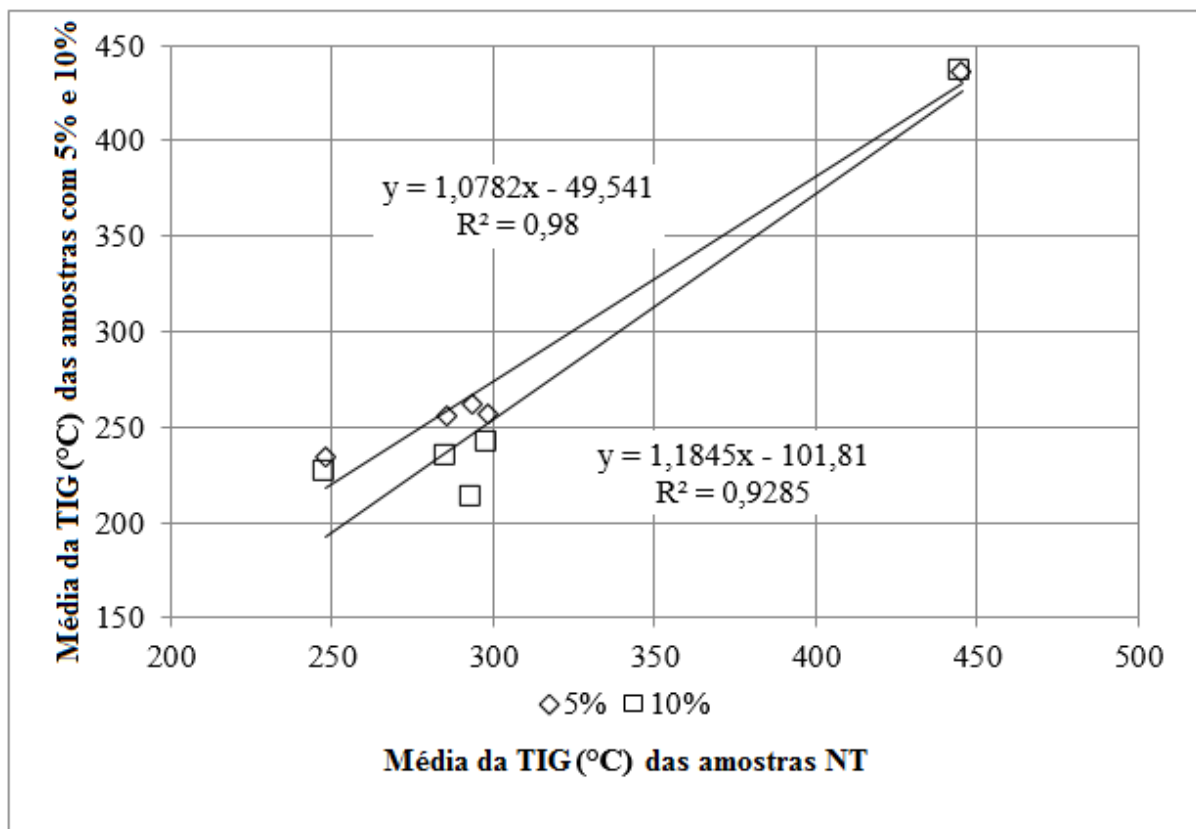


Figure 4.7: Relação entre TIG de amostras tratadas em função de amostras NT.

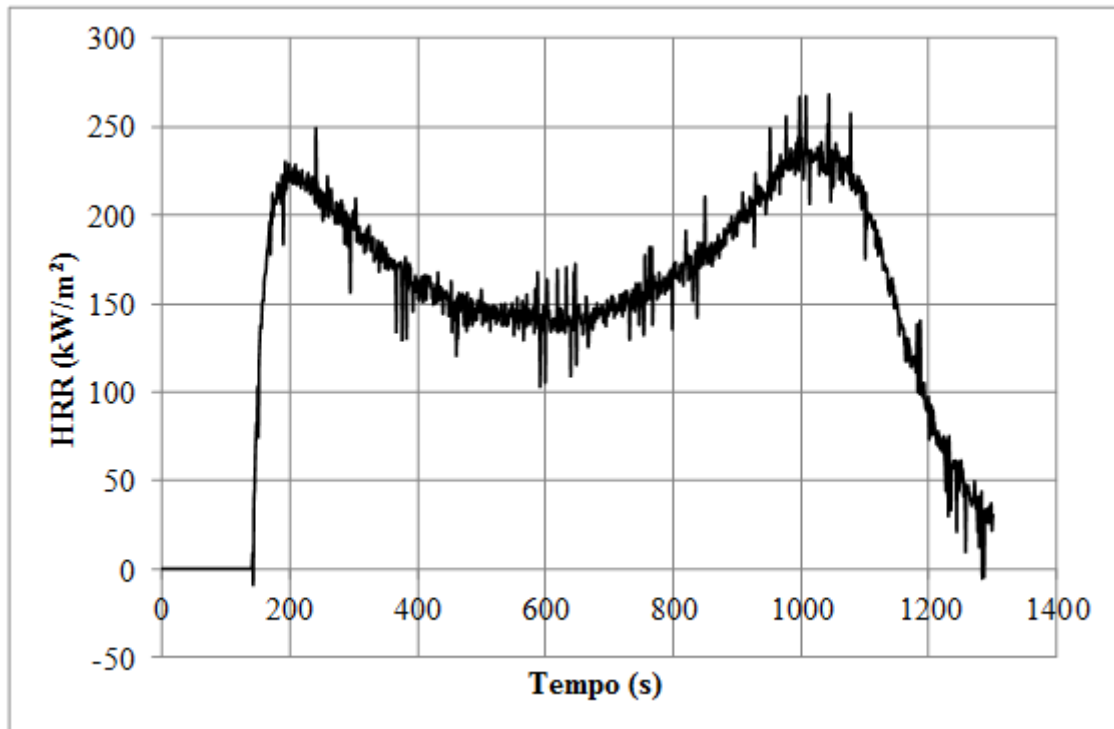


Figura 4.8: Curva HRR para a amostra 1 da *Micropholis venulosa*.

A Tabela 4.3 lista os primeiros valores médios de pico das amostras de madeira NT. É visto na Figura 4.9 que, em todos os casos, exceto para amostras da EU, o segundo valor de pico é maior que o primeiro. Isso pode ser explicado porque quando as amostras são aquecidas os primeiros voláteis são liberados antes da combustão da madeira (TIG), mas os voláteis no interior ficam presos, até o momento que a madeira “trinca” e eles são liberados, proporcionando um pico de liberação de calor maior.

Tabela 4.3: Curva característica do HRR médio para amostras NT.

Gr	Nome científico	Primeiro pico kW/m ²	Segundo pico kW/m ²
PI	<i>Pinus elliottii</i>	324	363
CU	<i>Micropholis venulosa</i>	248	257
SU	<i>Bowdichia nitida</i>	268	327
AN	<i>Hymenolobium flavum</i>	248	361
EU	<i>E. saligna</i>	224	188
PA	<i>Manilkara longifolia</i>	222	277
IP	<i>Handroanthus impetigosus</i>	288	340

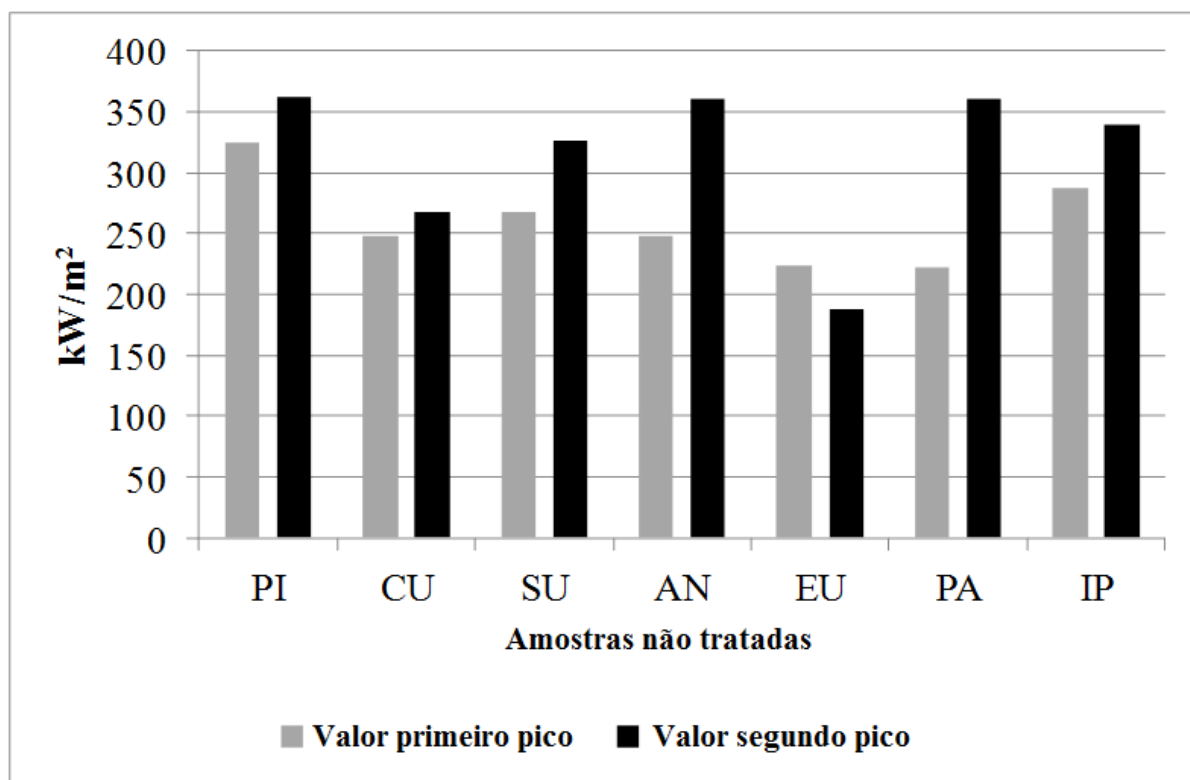


Figura 4.9: Valores do primeiro e do segundo picos de HRR para amostras não tratadas.

A Figura 4.10 mostra a curva HRR para o *Micropholis venulosa* cujo nome local é Curupixa. Observa-se que os valores de pico de HRR são ordenados das amostras de NT para 10%, sendo as amostras com 5% em algum lugar intermediário. Este é o comportamento esperado considerando que a solução de fipronil diluído em querosene pode aumentar a capacidade de calor de amostras de madeira. Para o segundo pico HRR, as amostras com 10% têm um valor médio 42% superior às amostras NT, enquanto as amostras NT e 5% são praticamente coincidentes.

O comportamento de *M. venulosa* é parecido com o da *Eucalyptus saligna* (Figura 4.11) cujo nome local é Eucalipto, mas o primeiro valor médio de pico de HRR das amostras de NT aparece algum lugar entre os valores de amostras a 5% (menores) e os a 10% (maiores). Considerando os segundos valores médios de HRR, as amostras a 10% são 28% maiores do que as NT. E é observado novamente com *Pinus elliottii* (Figura 4.12) cujo nome local é Pinus. Neste caso, o primeiro valor médio de pico de HRR das amostras a 10% é maior do que amostras NT e amostras a 5%, cerca de 24% maior. O segundo valor médio de HRR segue a mesma tendência, com amostras a 10% apresentando valores 15% maiores que as amostras NT e 23% superiores às amostras a 5%.

A Figura 4.13 mostra curvas médias de HRR para *Bowdichia nitida* cujo nome local é Sucupira. Considerando os primeiros valores médios de HRR, observa-se que eles estão em ordem crescente das amostras a 10% para amostras NT. O segundo valor médio de HRR das amostras NT é 22% maior do que as amostras a 10% sendo que as amostras a 5% tem valor máximo de HRR médio praticamente coincidente com as amostras NT.

Após esta análise, a Figura 4.14 mostra as curvas médias de HRR para *Hymenolobium flavum*, cujo nome local é Angelim. Observa-se que os primeiros valores de pico HRR são praticamente coincidentes, com amostras a 10% apresentando atraso e ligeiramente mais baixas. Analisando os segundos valores médios de pico de HRR, o valor médio de HRR das amostras NT é 9% inferior a amostras a 10% e 18% superior a amostras a 5%.

O comportamento de *Hymenolobium flavum* é próximo a *Handroanthus impetigosus* (Figura 4.15) cujo nome local é Ipê. Considerando os segundos valores médios de HRR, o valor médio de HRR das amostras NT é 3% superior a amostras a 5% e 14% inferior a amostras a 5%.

O último é *Manilkara longifolia*, cujo nome local é Paraju (Figura 4.16). Observa-se que as três curvas são muito similares. Os primeiros valores máximos de HRR são ordenados de amostras a 10% para amostras NT, sendo amostras a 5% aparecendo em algum lugar, oposto ao mostrado na Figura 6. Para o segundo valor de pico HRR, as amostras a 10% têm um valor médio 8% superior a amostras NT e 13% menos do que amostras a 5%.

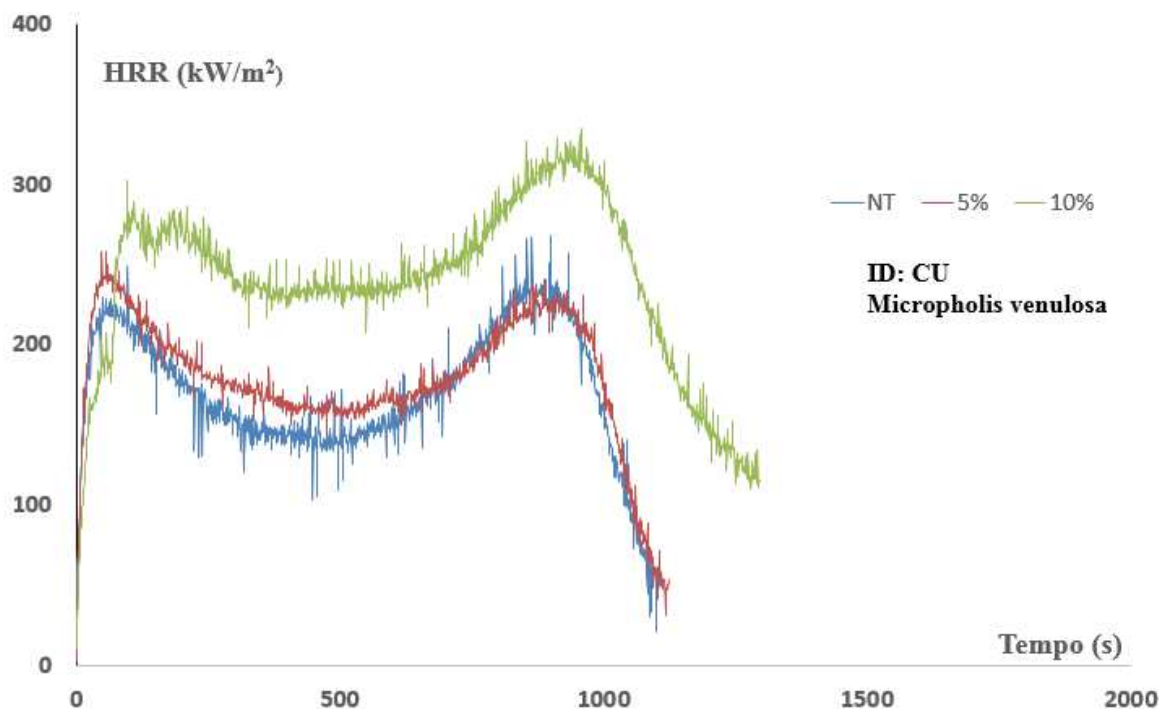


Figura 4.10: Curva HRR médio para *Micropholis venulosa* (CU).

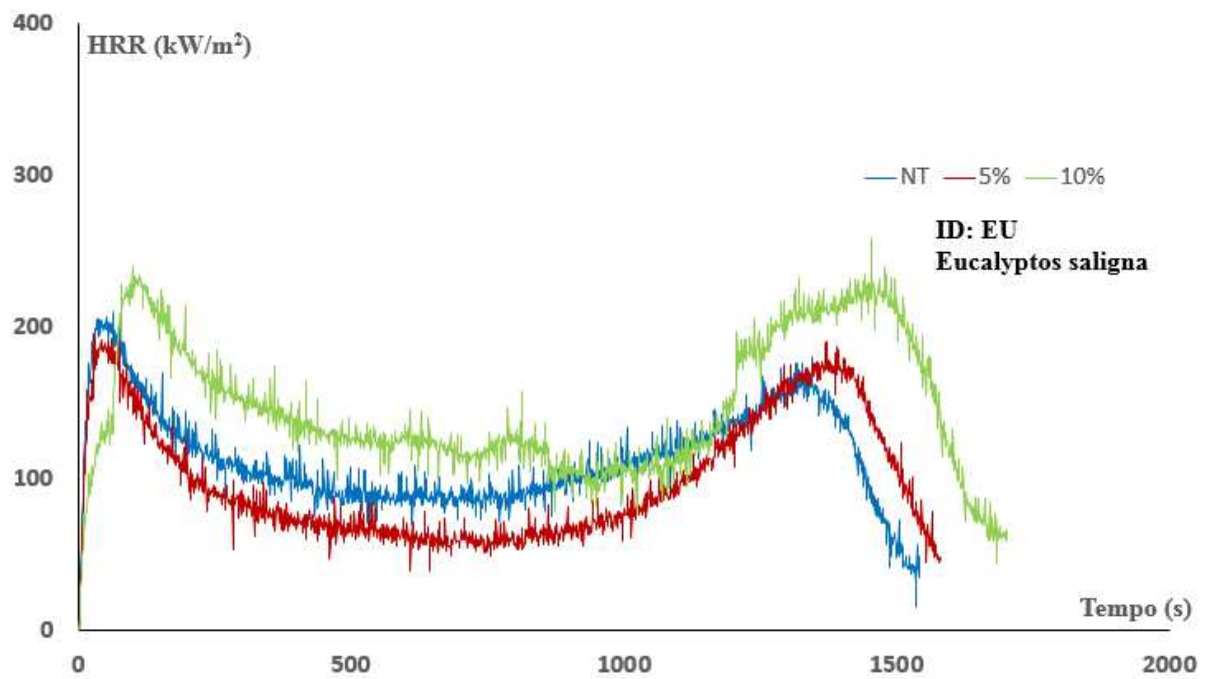


Figura 4.11: Curva HRR médio para *Eucalyptus saligna* (EU).

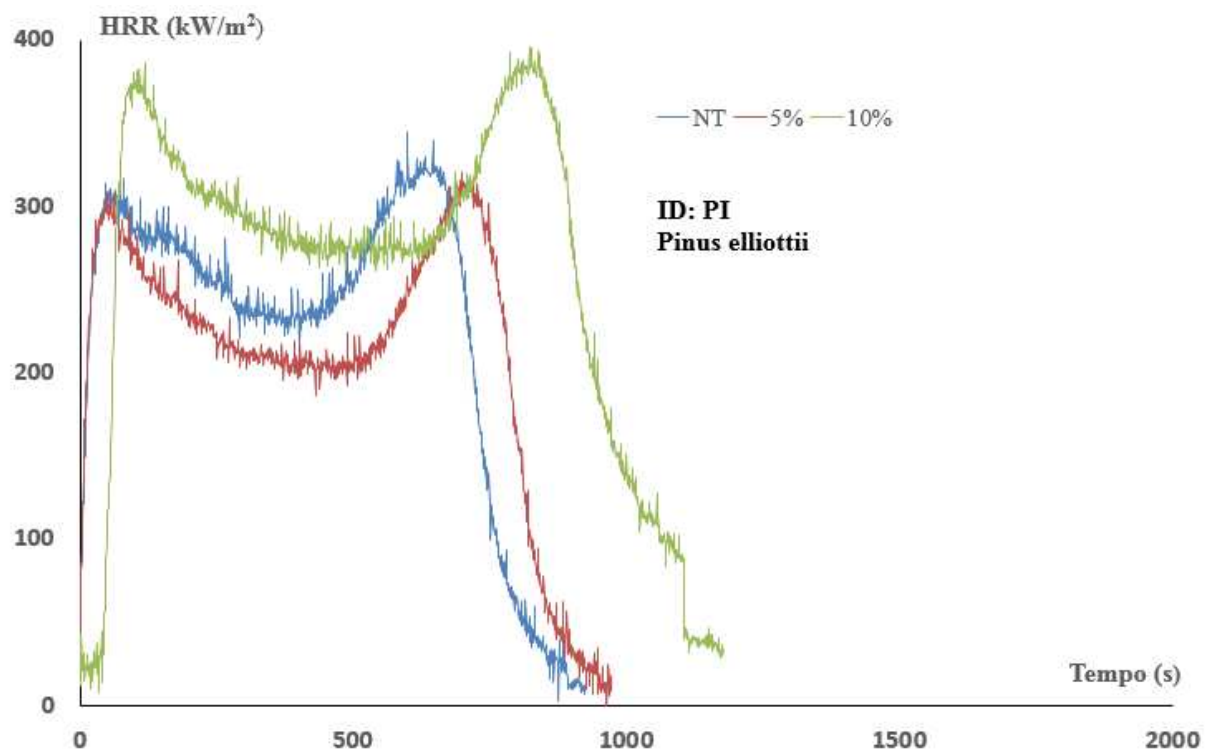


Figura 4.12: Curva HRR médio para *Pinus elliottii* (PI).

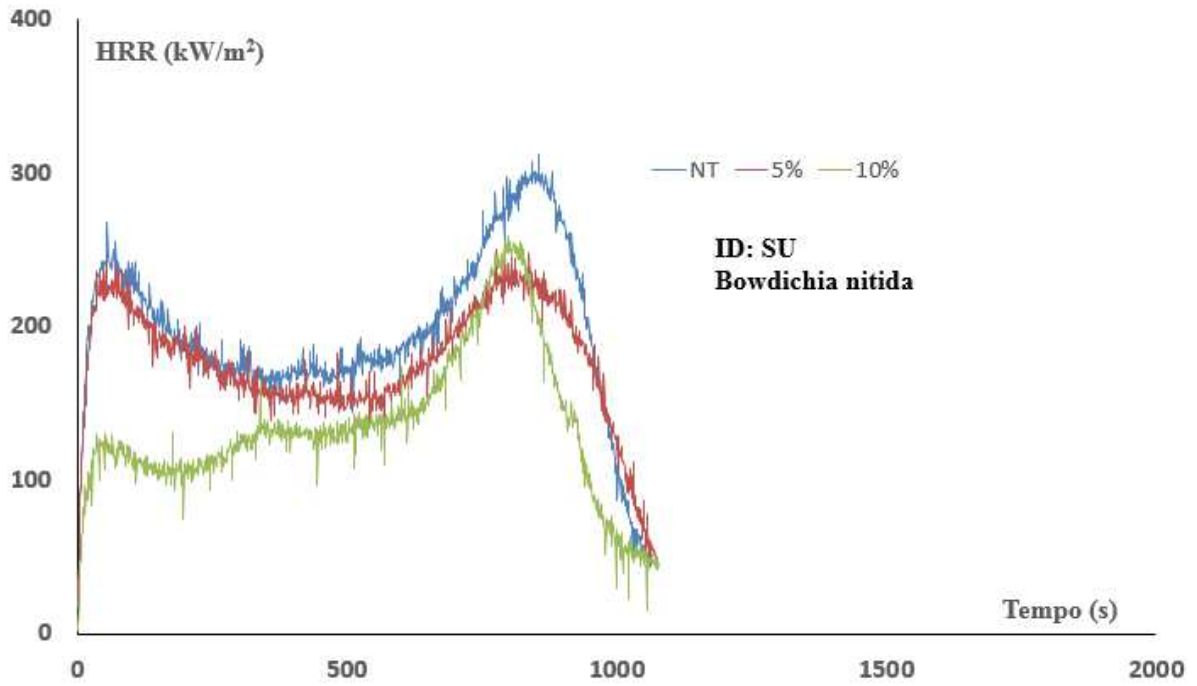


Figura 4.13: Curva HRR médio para *Bowdichia nitida* (SU).

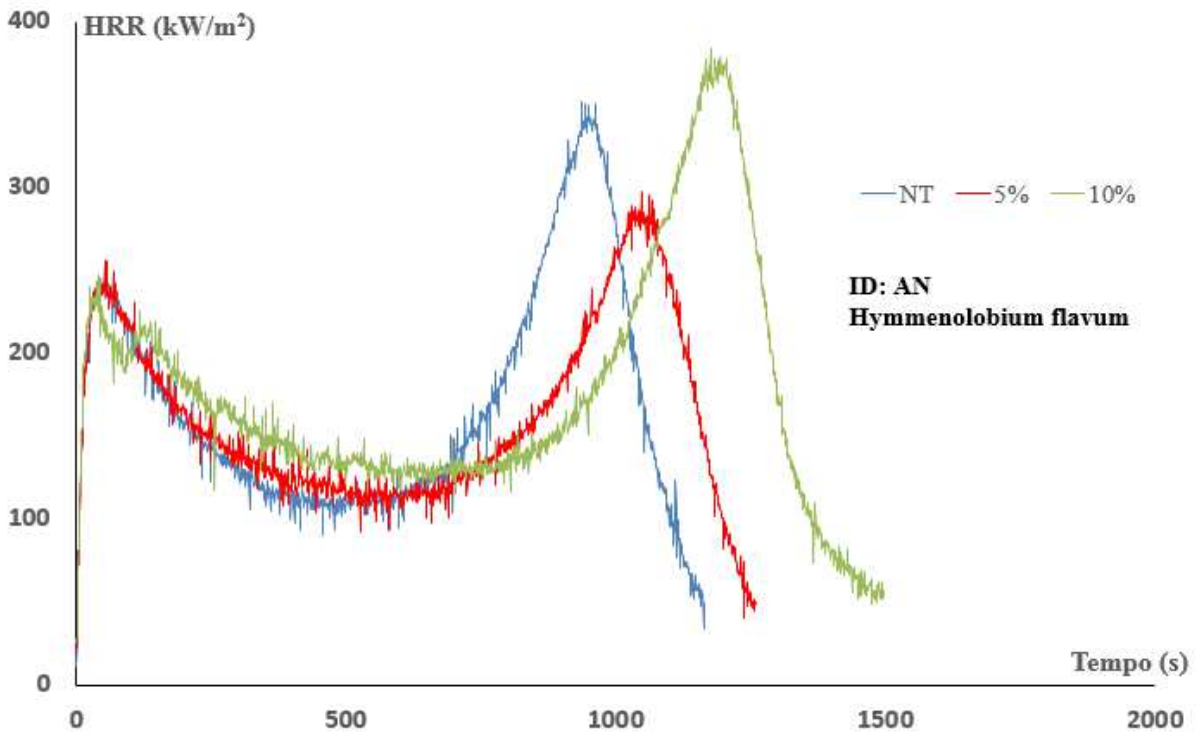


Figura 4.14: Curva HRR médio para *Hymmenolobium flavum* (AN).

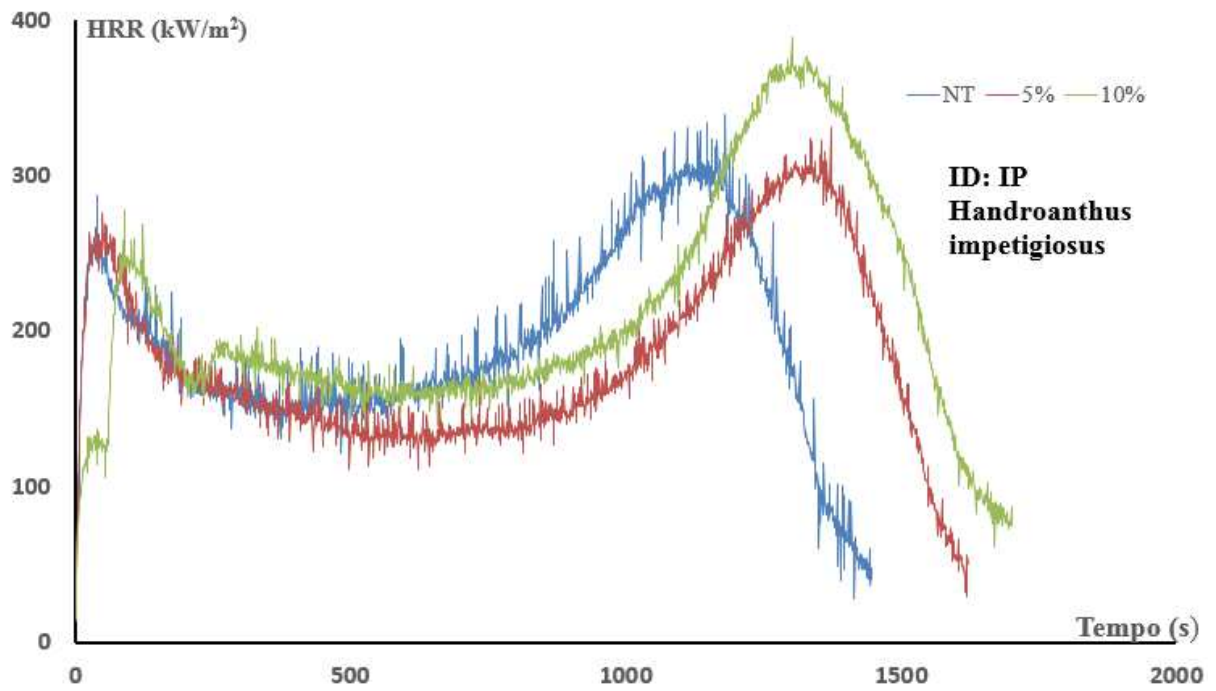


Figura 4.15: Curva HRR média para *Handroanthus impetiosus* (IP).

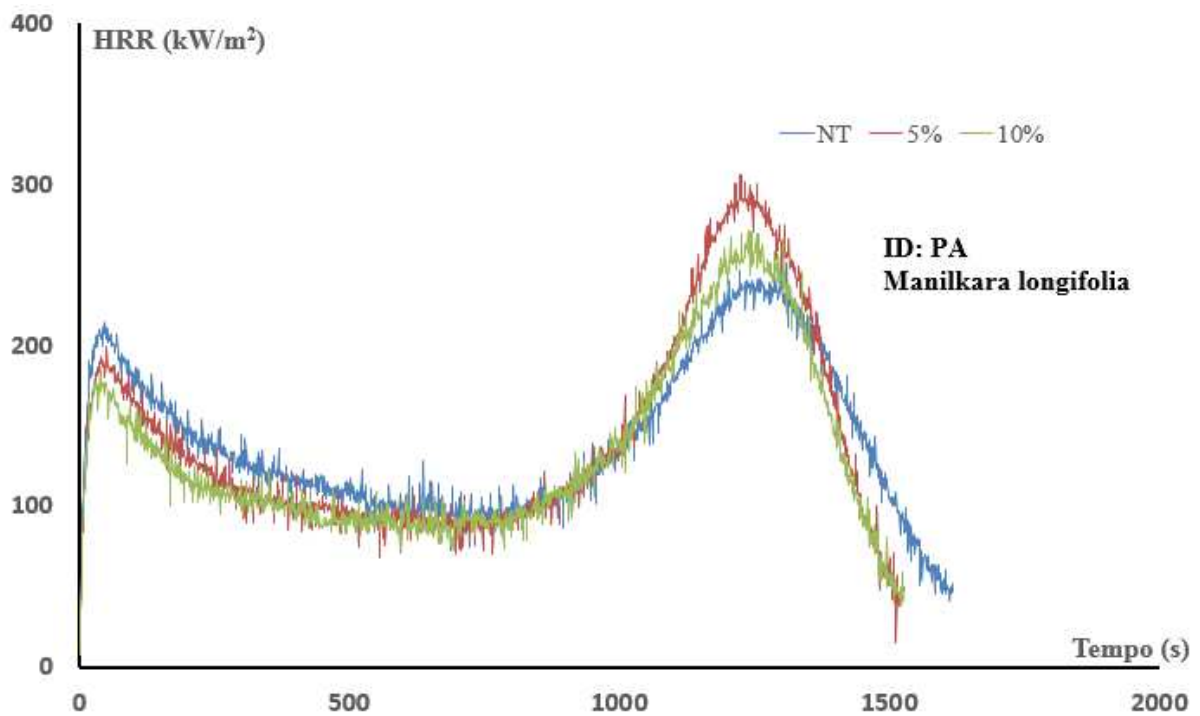


Figura 4.16: Curva HRR média para *Manilkara longifolia* (PA).

Resumindo, quando amostras de 5% e 10% são comparadas com NT (Figuras 4.10 a 4.16), observa-se que os primeiros valores máximos de HRR são ordenados de amostras de NT para 10%, sendo as de 5% em algum lugar intermediário. Este é o comportamento esperado, considerando que a solução de fipronil no querosene deve aumentar a capacidade de calor das amostras de madeira. Para o segundo pico de HRR médio, as amostras com 10% têm um valor médio 42% maior do que as amostras NT, enquanto as amostras NT e 5% são praticamente coincidentes. Considerando os segundos valores médios máximos de HRR, amostras com 10% são 28% maiores do que a média de HRR para NT.

Outras observações das Figuras 4.10 a 4.16 são:

(i) As amostras de AN, PI e EU apresentaram um segundo pico de HRR deslocado para a direita à medida que a concentração da solução de tratamento aumenta. Além disso, o maior valor de HRR ocorre com as amostras tratadas com uma solução de 10% de fipronil. Para PI e EU, as curvas de HRR são muito próximas, mostrando apenas um pequeno atraso nos picos.

(ii) À medida que o segundo pico está associado à queima volátil, é esperado um aumento no seu valor, aumentando a concentração de fipronil, como ocorreu em quase todas as amostras (exceto Sucupira e Paraju).

(iii) As amostras de Paraju eram praticamente imunes ao tratamento, apresentando uma curva HRR similar para as amostras de controle; e com 5% e 10% de tratamento, o 5% de fipronil apresentou o maior valor de pico. As amostras de Sucupira também apresentaram um comportamento diferente, onde a madeira sem tratamento apresentou o maior pico HRR.

(iv) As amostras de Curupixá apresentaram comportamentos semelhantes para amostras de controle e com 5% de tratamento. No entanto, quando a concentração química aumentou para 10%, houve um aumento em todos os valores da curva HRR, além disso, os picos ocorreram um pouco mais tarde.

4.4 Calor Efetivo de Combustão (EHC) e Calor Total Liberado (THR)

O calor efetivo de combustão, que é a liberação de calor pela perda de massa da unidade, é outro dado importante a ser avaliado em um teste de calorímetro. Como mencionado por Ayrilmis *et al.* (2007), quanto menor o EHC, melhor as características de desempenho do fogo,

ou seja, menor será o risco de incêndio esperado. A Figura 4.17 descreve o EHC médio para cada grupo. Verificou-se que, como regra geral, o tratamento com soluções de querosene na maior concentração tende a aumentar o EHC. Mas, é interessante notar que as amostras de PA e SU tiveram um comportamento inesperado quando comparadas aos outros grupos: quanto maior a concentração de solução de querosene com fipronil, menor o EHC.

Observa-se que o grupo de amostras de CU a 10% apresentou EHC 65% maior do que NT. Os outros grupos apresentaram uma diferença em EHC entre amostras a 10% e NT de 20% (IP) a 47% (EU).

O THR segue a mesma tendência, uma vez que é determinado diretamente pelo equipamento CCPM, como a soma de calor total liberado durante a duração do teste.

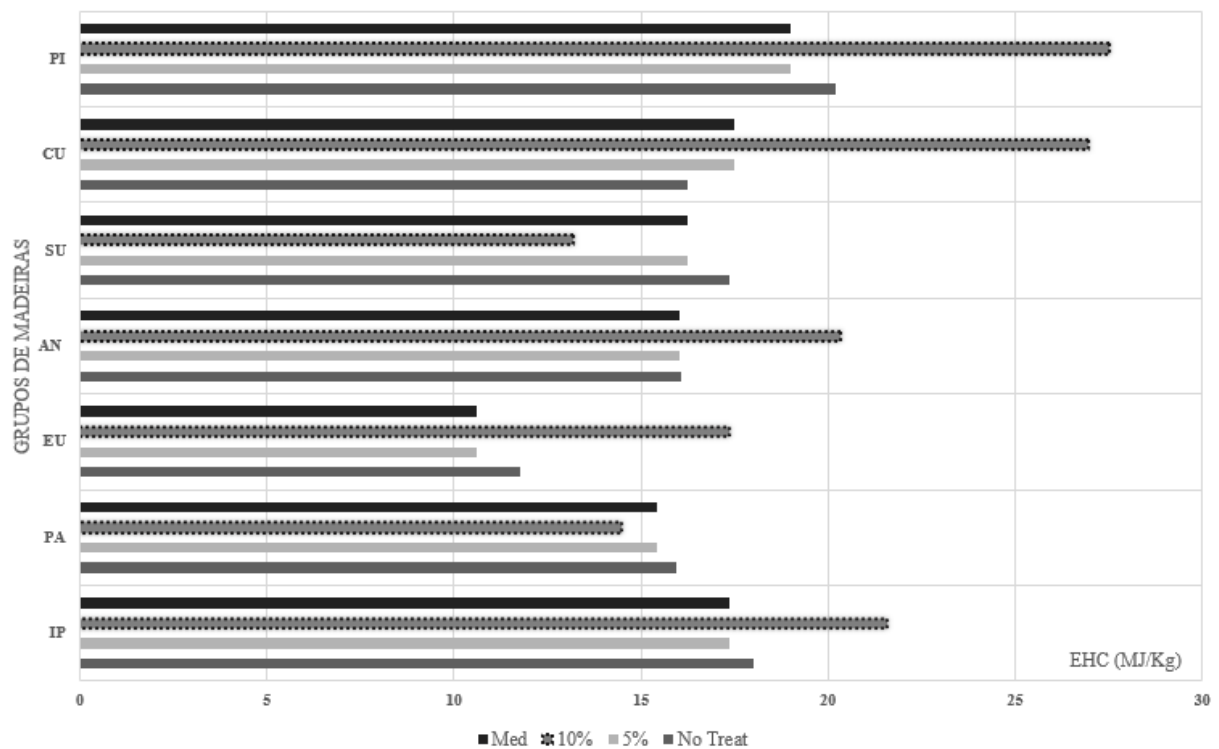


Figura 4.17: Média do calor efetivo de combustão (EHC) para amostras que sofreram ignição espontânea.

Resumindo, a tabela 4.4 apresenta o calor total médio irradiado (MTHR), o calor efetivo médio de combustão (MEHC), a taxa média de perda de massa (MMLR) e a taxa média de liberação de calor (MHRR) para amostras NT, 5% e 10% de cada grupo de madeira. Como mencionado anteriormente, as quantidades médias foram calculadas considerando as amostras mostradas nas Tabelas 4.2a e 4.2b para cada tratamento.

Tabela 4.4 - Média de THR, EHC, MLR and HRR dos grupos de madeiras.

Gr	Amostras	Média massa inicial [g]	Massa queimada [g]	Teste Duração [s]	MTHR [kJ]	MEHC [MJ/kg]	MMLR [g/s]	MHRR [kW]
PI	NT	137	97	801	1881	19.49	0.120	2.348
	5%	141	104	900	1864	18.01	0.115	2.071
	10%	133	103	1024	2691	26.05	0.101	2.628
CU	NT	159	108	1245	1722	16.02	0.086	1.383
	5%	156	110	1244	1870	17.00	0.088	1.503
	10%	162	114	1313	2855	25.15	0.086	2.174
SU	NT	157	114	1079	1882	16.51	0.106	1.744
	5%	154	114	1125	1743	15.36	0.101	1.549
	10%	135	110	1250	2306	20.96	0.088	1.845
AN	NT	165	124	1204	1888	15.23	0.103	1.568
	5%	169	124	1321	1945	15.69	0.094	1.472
	10%	183	128	1451	2444	19.09	0.088	1.684
EU	NT	202	146	1638	1798	12.32	0.089	1.098
	5%	199	143	1591	1691	11.83	0.090	1.063
	10%	193	137	1544	1477	10.77	0.089	0.957
PA	NT	196	144	1773	2133	14.81	0.081	1.203
	5%	195	143	1681	2032	14.21	0.085	1.209
	10%	199	142	1756	1906	13.42	0.081	1.085
IP	NT	217	156	1592	2621	16.80	0.098	1.646
	5%	222	161	1702	2703	16.79	0.095	1.588
	10%	221	156	1697	3302	21.17	0.092	1.946

Usando números redondos, a tabela 4.5 mostra que o tratamento com a solução de querosene com fipronil em uma concentração de 5% praticamente não afetou o EHC. Mas o tratamento em uma concentração de 10% aumentou o EHC de 23% para 56% sendo registrado em alguns casos uma ligeira diminuição do EHC. Como mencionado anteriormente, a hipótese é que a

geometria e a distribuição porosa podem ser responsáveis pela pouca influência do tratamento de 10% em alguns casos, embora o pequeno efeito de 5% de tratamento para todos os grupos de madeira precisa ser explicado de outra maneira.

Observou-se que a HRR aumentou para todos os grupos de madeira quando o tratamento de 10% foi comparado com o NT, exceto nos grupos EU e PA situados na faixa de [0,957; 2,628] kW com um valor médio de 1,533 kW. Verifica-se na tabela 4.5 que as amostras de EU e PA apresentaram coerentemente um MEHC ligeiramente reduzido quando comparado com a média de amostras de NT. Em paralelo, MMLR apresentou um valor médio para todas as amostras de 0,094 g / s sendo o mínimo de 0,081 para o grupo PA a 10% e o máximo de 0,120 para PI sem tratamento.

Tabela 4.5 – Efeito do tratamento na MEHC (MJ/kg).

Gr	NT	5%	10%
PI	19	-1	+7
CU	16	-1	+9
SU	17	-1	+4
AN	15	0	+4
EU	12	0	-2
PA	15	-1	-1
IP	17	0	+4

4.5 Taxa de perda de massa (MLR) e Massa total perdida (TML)

A taxa de perda de massa da amostra que ensaiada é medida pela célula de carga que compõe o CCPM. Segundo Castro (2009), o teor de umidade influencia, reduzindo, as taxas de liberação de voláteis, porém não afeta as massas e as taxas de consumo durante a fase de incandescência. A Figura 4.18 apresenta a taxa de perda de massa das amostras durante o ensaio. Percebe-se que a variação entre as espécies é muito pequena, ficando todas as amostras entre 68,2% e 79,5% de perda de massa, com média de 72,65% e desvio padrão de 2,357. A explicação para isso é que a perda de massa está mais associada à perda de voláteis e hidrocarbonetos do que à própria combustão da espécie. O grupo de PI foi o que apresentou uma pequena variação com

as amostras tratadas a 10% tendo a maior perda de massa, com valores 8% maiores que as amostras NT e 5% mais perda de massa que as amostras tratadas a 5% da solução de fipronil.

A TML segue a mesma tendência, uma vez que é determinado diretamente pelo equipamento CCPM, sendo obtido por integração direta de MLR.

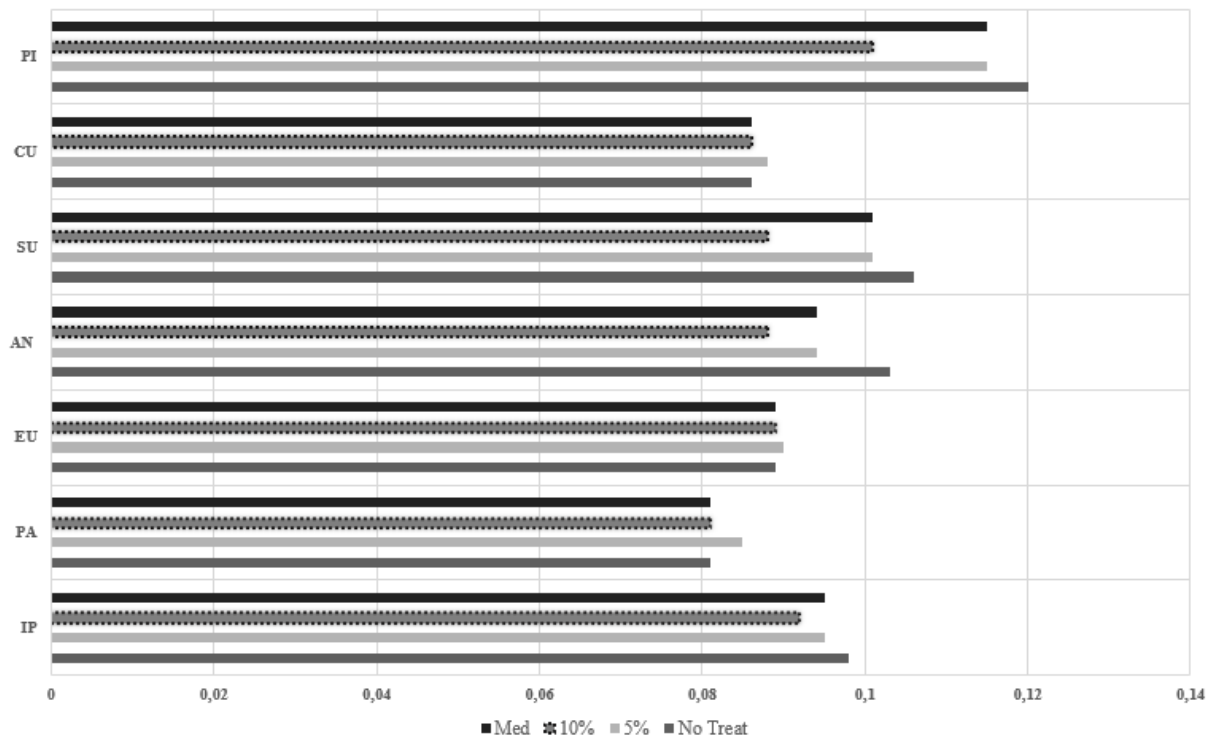


Figura 4.18: Taxa média de perda de massa durante os ensaios.

4.6 Parâmetros FSI e β

A tabela 4.6a e 4.6b apresentam os valores do FSI para as amostras ensaiadas.

Tabela 4.6a – Grupo de amostras com $\rho \geq 900$.

Gr	ID	t_s [mm]	β	FSI
PA	1	19,40	0,136	54,86
	2	19,40	0,145	57,69
	4	19,40	0,1211	50,63
	5	19,60	0,0748	40,32
	8	19,50	0,1836	74,07

	9	19,60	0,1492	59,09
EU	1	22,10	0,117	49,57
	2	22,10	0,1534	60,61
	4	22,10	0,0818	41,69
	5	22,10	0,1558	61,49
	7	22,10	0,3472	53,60
	8	22,10	0,1565	61,75
IP	2	20,40	0,3354	57,25
	4	21,10	0,3911	42,92
	5	21,10	0,3185	63,31
	7	20,80	0,6668	10,54
	8	21,10	0,2641	99,72

Tabela 4.6b – Grupo de amostras com $\rho < 900$.

Gr	ID	t_s [mm]	β	FSI
PI	1	20,70	0,5014	25,84
	2	20,90	0,5573	19,79
	5	20,90	0,3713	47,31
	6	20,90	0,35	52,81
	7	20,20	0,503	25,65
	8	20,90	0,5235	23,31
AN	1	21,00	0,3528	52,02
	2	20,90	0,4216	37,20
	4	21,00	0,2697	93,40
	5	21,00	0,2792	84,84
	7	21,00	0,4234	36,89
	8	21,00	0,4032	40,52
SU	1	20,40	0,3683	48,02
	2	20,50	0,3355	57,20
	4	20,00	0,2904	77,02
	5	20,50	0,2573	109,97
	9	19,00	0,2082	92,25
CU	1	22,00	0,2127	97,02
	5	22,00	0,1975	83,03
	6	21,90	0,241	187,31
	7	21,00	0,577	17,91
	8	21,50	0,2416	177,38

A última análise realizada no grupo das 7 espécies que sofreram ignição aparente foi o cálculo dos parâmetros FSI e β , através do modelo descrito por White e Dietenberger (2004).

A figura 4.19 apresenta o parâmetro β para as espécies, mostrando uma tendência de aumento de β para as amostras com 10%. Nos grupos de CU, EU e IP as amostras NT e com 5% quase não sofreram alteração e nos grupos PI, AN e PA as amostras com 10% se aproximam mais das amostras NT. O grupo PA é o que apresenta maior constância.

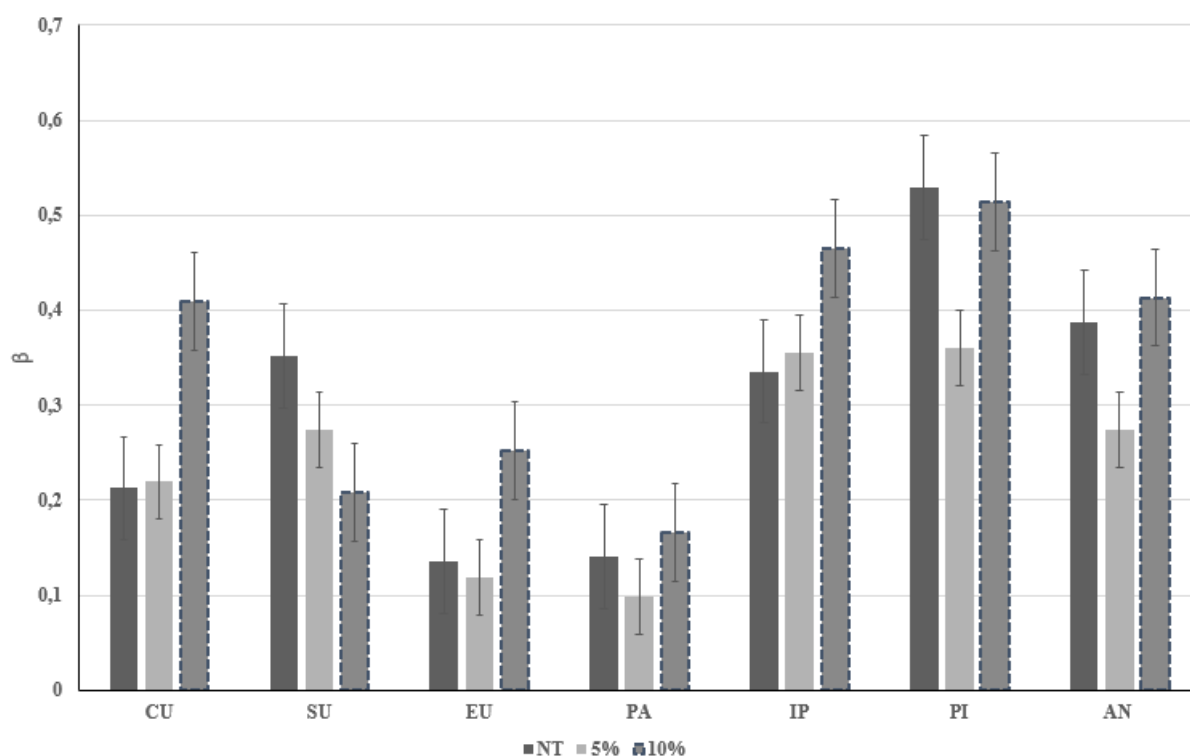


Figura 4.19: Parâmetro β dos grupos de madeiras.

Quando analisamos o FSI, apenas para amostras NT, a PI é a única que classifica-se como classe A; a CU classifica-se na classe C e as demais se enquadram na classe B. (Dietenberger e White, 2001).

4.7 Combustão sem Chamas

As amostras de *Hymenae sp*, cujo nome local é Jatoba, e as amostras de *Astronium sp*, cujo nome local é Muiracatiara, não apresentaram ignição com chamas, mas em vez disso, houve "combustão sem chamas" (CSC) ou ardente. Como o CSC não é um fenômeno com um ponto de partida definido, foi decidido registrar o tempo em que a superfície superior da amostra estava escurecendo, ou seja, o tempo necessário para formar uma fina camada de carbono da ordem de 50 μm de espessura na superfície do corpo. Esse tempo foi definido como "tempo de combustão sem chama", t_{CSC} , e corresponde à primeira alteração observada na massa da amostra. A Tabela 4.7 mostra os tempos médios de combustão sem chama para cada conjunto de três corpos de teste, \bar{t}_{CSC} (s)

Tabela 4.7 – Tempo combustão da chama livre

ID's	η_s	Conc. % em vol.	t_{CSC} (s)	\bar{t}_{CSC} (s)
JA	1	0 %	66	66
	2		67	
	4	5 %	66	
	5		68	67
	8	10 %	68	
	9		70	69
MU	1	0 %	65	66
	3		67	
	4	5 %	67	
	5		66	66
	8	10 %	66	
	9		66	66

Observa-se que o tempo de combustão livre de chamas permaneceu quase constante, independentemente da concentração de fipronil, Figura 4.20. Após a formação de uma camada fina de carvão superficial, a combustão acentua a perda de massa de amostra em uma taxa, $\dot{\Delta}m(t)$. Os gases gerados por este processo de combustão são inseridos no cilindro do CCPM e através deles o poder de combustão, HRR, é medido.

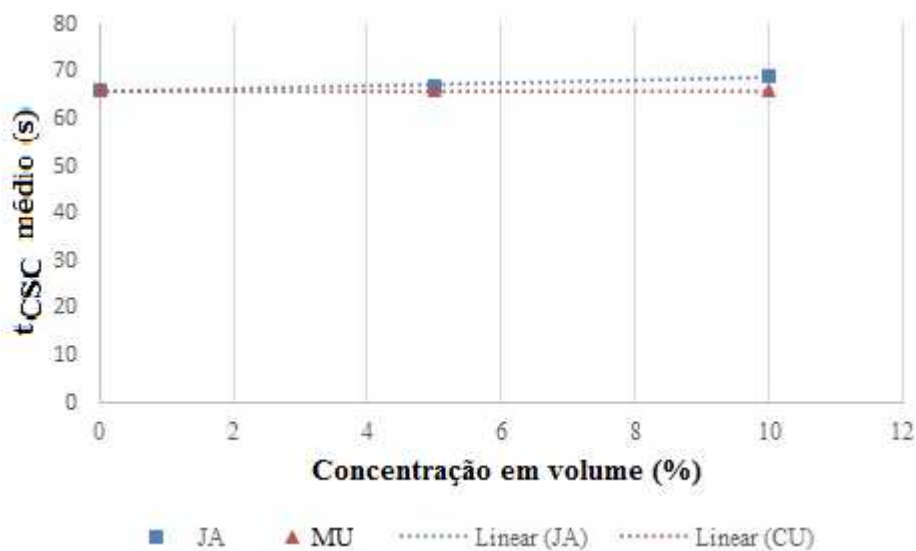
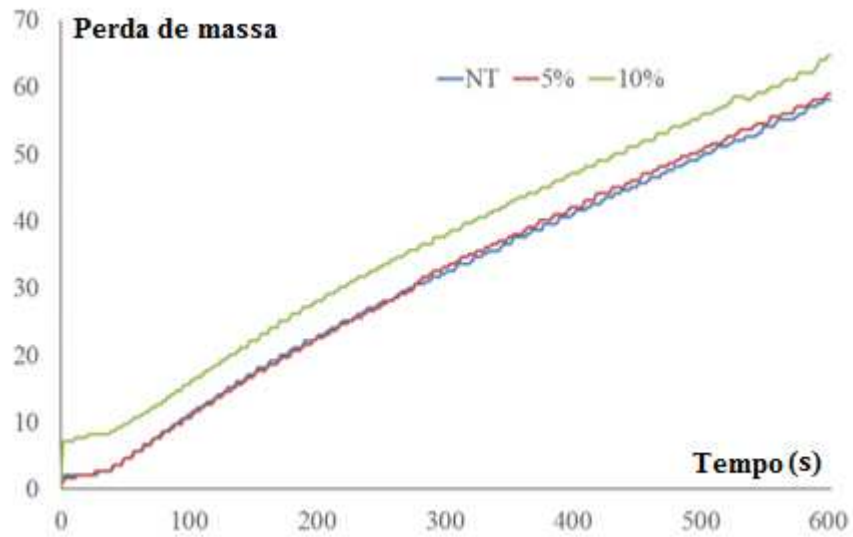
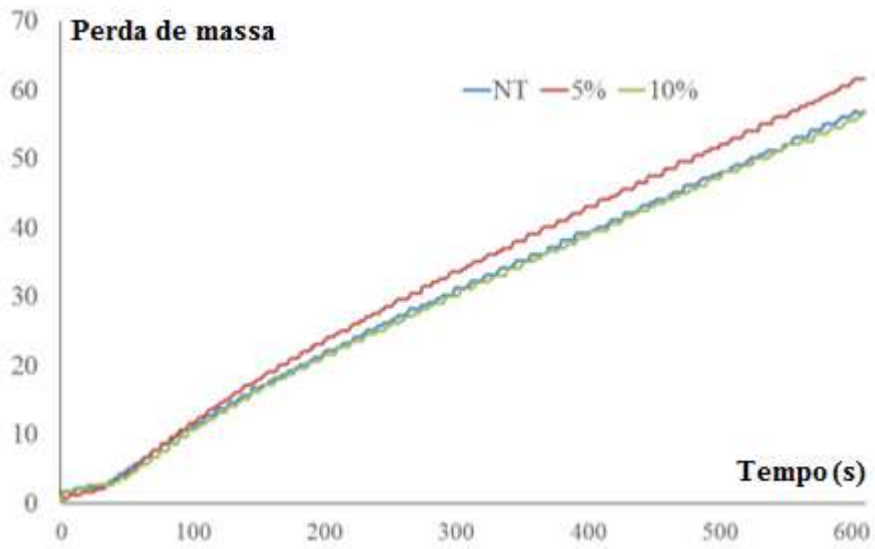


Figura 4.20: Tempo de combustão da chama livre para as amostras analisadas.

A comparação da perda de massa nas seis amostras de Jatobá é mostrada na Figura 4.21a. Analisando as perdas em massa, observamos um paralelismo das curvas após o tempo de combustão sem chamas, t_{CSC} . Este paralelismo indica que as amostras se comportam a taxas de perdas de massa constantes e aproximadamente iguais após a fase inicial. Para medir a taxa de perda de massa em intervalos iguais de 60 s, obtemos do gráfico da Figura 4.22a os valores médios ($\overline{\Delta \dot{m}}$), para o corpo de controle (NT) de 0,091g/s; para tratamento a 5% de 0,100g/s e para tratamento a 10% de 0,090g/s. O valor de intercessão da linha de tendência com o eixo vertical corresponde a uma perda de massa inicial Δm_i de 1,7g para as amostras não tratadas, 1,41g para o fipronil a 5% e 1,60g para tratamento com fipronil a 10%.

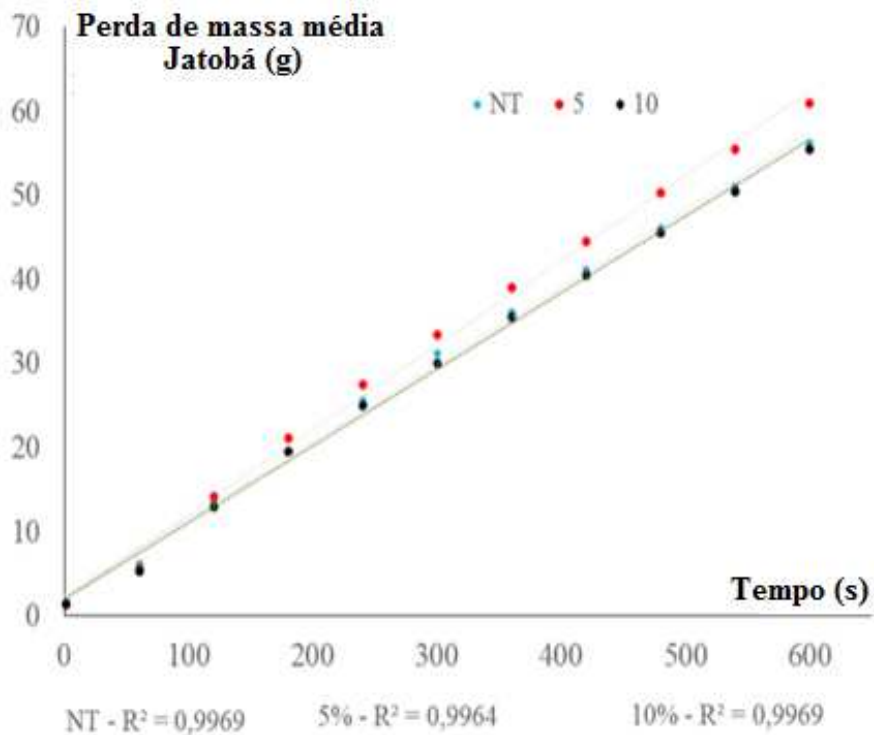


(a)

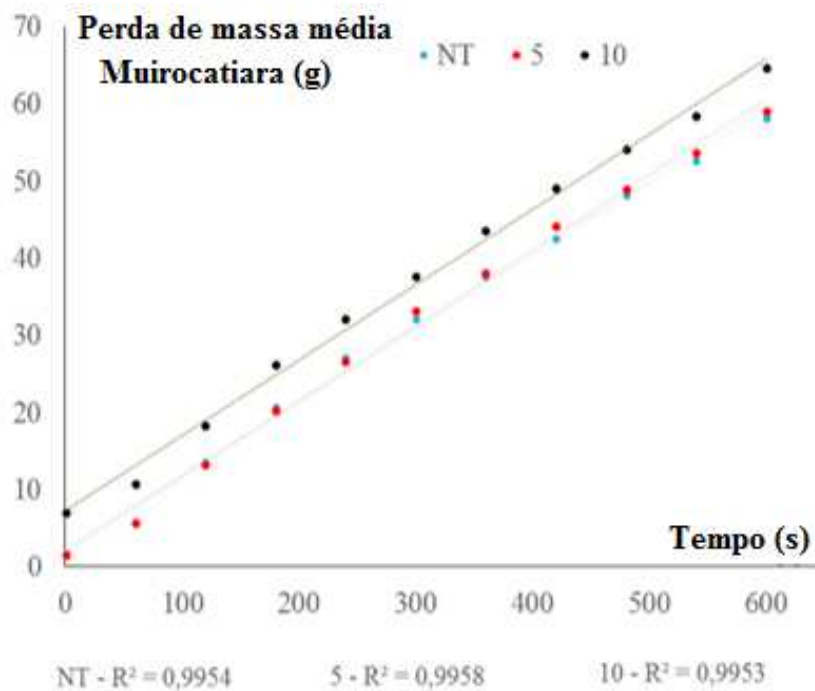


(b)

Figura 4.21: Perda de massa (a): Jatobá, (b) Muircatiara.



(a)



(b)

Figura 4.22: Taxa de perda de massa (a): Jatobá, (b) Muiracatiara.

A comparação da perda de massa das seis amostras de Muiracatiara é mostrada na Figura 4.21b. Analisando as perdas de massa, podemos observar um paralelismo das curvas após o

tempo de combustão sem chamas, t_{CSC} . Este paralelismo indica que as amostras se comportam a taxas de perdas de massa constantes e aproximadamente iguais após a fase inicial. Ao medir a taxa de perda de massa em intervalos iguais de 60 s, obtemos o valor médio ($\Delta\bar{m}$); a partir do gráfico da Figura 4.22b, bem como para o corpo de controle (NT) de 0,097g/s e para o 5% tratamento, 0,095g/s e 10% de tratamento, 0,097g/s. O valor de intercessão da linha de tendência com o eixo vertical corresponde a uma perda de massa inicial Δm_i de 1,63g para amostras não tratadas, 1,59g para o fipronil a 5% e 7,10g para tratamento com fipronil a 10%.

5 CONCLUSÕES

Um programa experimental foi planejado com 27 amostras sem tratamento, comparando com 54 amostras tratadas contra ataques de insetos com soluções de fipronil dissolvido em querosene, em concentrações de 5% e 10% em volume. As amostras utilizadas para este estudo foram preparadas de acordo com as normas ISO 17554 (2014) e ISO 13927 (2015), foram secas no forno, irradiadas com um fluxo de calor constante de 50kW/m² ortogonal à orientação das fibras da madeira. Os resultados foram obtidos para (i) taxa de liberação de calor (HRR), pico da taxa de liberação de calor (PHRR) e liberação de calor total (THR), (ii) perda de massa total (TML) e taxa de perda de massa (MLR), (iii) calor efetivo de combustão (ECH), bem como (iv) tempo de ignição (TI) e temperatura de ignição (TIG). O objetivo final deste trabalho de pesquisa é (i) adquirir conhecimento aprofundado sobre o tratamento de insetos com fipronil nos principais parâmetros de combustão e (ii) contribuir para o desenvolvimento de um banco brasileiro de dados de combustão de madeira para uma abordagem eficiente de segurança para esses elementos quando submetidos a temperaturas elevadas devido a condições de incêndio. A partir dos vários dados obtidos no decorrer deste estudo, os seguintes merecem ser especialmente mencionados:

- (i) o TTI foi observada bastante dependente do peso específico para amostras NT e variando linearmente com o fator " $k\rho c/l^3$ ". No entanto, o tratamento com solução de querosene com fipronil perturbou progressivamente essa dependência linear sendo verificado que praticamente desaparece para amostras a 10%;
- (ii) observou-se que o TIG foi linearmente relacionado à TTI para todos os casos de tratamento;
- (iii) MEHC mostrou-se aumentado pelo tratamento com solução de querosene com fipronil na concentração de 10%, mas foi praticamente inalterado com solução de querosene com fipronil a uma concentração de 5% quando comparada com amostras NT;
- (iv) MMLR e MHRR aumentaram com o tratamento da solução de querosene com fipronil na concentração de 10% e não são conclusivos quando o tratamento de 5% é comparado com NT.
- (v) Os resultados indicam que geometria, densidade e dimensões porosas e fibras devem ser consideradas para melhor explicar o comportamento da madeira CCPM, 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.

(vi) é evidente, a partir dos resultados dos ensaios de madeira no CCPM, que as taxas de liberação de calor são importantes para a classificação das madeiras, bem como muito sensíveis, exigindo uma melhoria na medição para compensar perdas de calor radiante.

(vii) Como a ignição sem chamas ou ardentes libera muitos gases sem queimar (e, portanto, sem liberar calor), os registros HRR das amostras que não foram inflamadas não têm sentido físico, sendo analisadas apenas a perda de massa, que por sua vez, não alterou significativamente devido ao tratamento. Em amostras que não se inflamam, observa-se a continuidade da taxa de perda em massa, bem como nos testes em que a ignição ocorreu. A explicação para isso é que a perda de massa está mais associada com a perda de voláteis e hidrocarbonetos do que com a própria combustão.

(viii) Ao analisar o calor efetivo de combustão, é possível classificar Paraju como a madeira que desenvolveu as melhores características de reação ao fogo com o tratamento e sua taxa de liberação de calor ao longo do tempo. Outra variável positiva de Paraju foi β , sendo entre as mais baixas delas.

(ix) O eucalipto também mostrou um bom desempenho, no entanto, quando tratado com 10% de concentração, o calor efetivo de combustão aumenta consideravelmente.

(x) Com a análise dos dados, pode-se ver uma relação inversamente proporcional entre o TIG e o segundo PHRR.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Sugere-se como pesquisas futuras a investigação da relação da densidade com as diversas variáveis analisadas, mas principalmente no processo de transferência de calor; além de investigar a influência de outros parâmetros nesta transferência.

Como sugerido por Simms e Law (1967), deve-se pesquisar fenômenos de transferência de calor por difusão molecular e a perda de calor de regiões mais quentes através da vaporização da água, quando ocorre o tratamento com fipronil diluído em querosene.

Estudo da geometria e distribuição porosa em relação a influência do tratamento com solução a 10% de fipronil.

REFERÊNCIAS

- ANOVITZ, L.M.; COLE, D.R. **Characterization and analysis of porosity and pre structures**. Rev. Mineral. Geochem. 80, 61–164 (2015)
- ASTME 84-17, **Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM E 1354-11b, **Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ATREYA, A.; CARPENTIER, C.; HARKLEROAD, M. “**Effect of sample orientation on piloted ignition and flame spread**”. In: Fire Safety Science - Hemisphere Publishing, p. 97-109, 1986.
- AYRILMIS, N.; CANDAN, Z.; WHITE, R. **Physical, mechanical, and fire properties of oriented strandboard with fire retardant treated veneers**. Holz Roh- Werkst 2007; 65:449–458
- BABRAUSKAS, V. “**Development of the Cone Calorimeter - a bench scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption**”. National Bureau of Standards, NBSIR 82-2611, 1982.
- BODIG, J; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. 2nd. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. p. 712.
- BODÎRLĂU, R.; SPIRIDON, I.; TEACĂ, C. A. **Chemical Investigation of Wood Tree Species in Temperate Forest in East-northern Romania**. BioResources, Raleigh, EUA, v. 2, n. 1, p. 41-57, 2007.
- CASTRO, A. **Uma investigação Teórico-experimental da Combustão de Madeira**. Dissertação de Mestrado, INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), São José dos Campos, 2009.
- COMBEN, A.J. “**The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber**”. Wood, v.20, n.8, p.311-313, 1955.
- DIETENBERGER, M.A. “**Ignitability analysis using the cone calorimeter and the LIFT Apparatus**”. In: Product Safety Corporation, p.189-197, 1996.

- DIETENBERGER, M. **Effect of Backing Board on the Heat Release Rate of Wood**. In: Proc. of International Conf. on Fire Safety, Columbus, OH, July 1999. Sissonville WV: Product Safety Corporation. Vol. 28, pp 62-73.
- DIETENBERGER, M.A.; WHITE, R. H. **Reaction to fire testing and modeling for wood products**. Twelfth Annual BCC Conference on Flame Retardancy, 2001, pp. 54-69
- EDWARDS, R.; MILL, A.E. **Termites in buildings: their biology and control**. Sussex: Rentokill, 1986. 261p.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultra Structure, Reactions**. Berlim, Walter de Gruyter Publisher, 1984.
- FIGUEROA, M.J.M.; MORAES, P.D. **Comportamento da Madeira a Temperaturas Elevadas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 157-174, dez 2005.
- FONSECA, C. D. *Igreja de Nossa Senhora do Carmo*. Património de Origem Portuguesa, 2012.
- Inventário de Proteção do Acervo Cultural, IPAC, acervo urbano, página 719-743, outubro de 2012.
- GERHARDS, C. C. “**Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects**”. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1980.
- GREXA O, LUBKE H. **Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter**. Polym Degrad Stabil. 2001; 74(3):427-32.
- HARADA, T. **Time to ignition, Heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test**. Fire and Materials, 2001; 161-167.
- HASBURGH, L.E.; WHITE, R.H.; DIETENBERGER, M.A.; BOARDMAN, C.R. **Comparison of the heat release rate from the mass loss calorimeter to the cone calorimeter for wood-based materials**. 14th International conference and exhibition, San Francisco, 2015.
- HOPKINS, D. “**Predicting the ignition time and burning rate of thermoplastics in the cone calorimeter**”. National Institute of Standards and Technology (NIST-GCR-95-677), 1995.

- HUGGETT C. “Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements”. **Fire and Materials**. 4:61-65, 1980. ISO 5660-1. **Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate**. International Standards Organization, 2002.
- ISO 17554. **Reaction to fire tests -- Mass loss measurement**. International Standards Organization, 2014.
- ISO 13927. **Plastics -- Simple heat release test using a conical radiant heater and a thermopile detector**. International Standards Organization, 2015.
- KEYLWERTH, R. “**High temperature drying installations**”. *Holz als Roh-und Werkstoff*, v. 10, n.4, p. 134-138, 1952.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÉ, W.A. “**Principles of wood science and technology solid wood**”. New York: Springer, 1968.
- LADELL, J. L. “**High-temperature drying of yellow birch**”. *For. Prod. J.*, v. 6, n. 11, p. 469-475, 1956.
- LAGE, M.C.G. **Eficiência de Inseticidas para preservar madeira contra danos de cupins subterrâneo**. Dissertação de Mestrado, UFRRJ, 2004.
- LANDESMANN, A.; ROCHA, M. A. F. “**Combustion properties of Brazilian natural wood species**”. *Fire and Materials*, 2014.
- LAWRENCE, M.; JIANG, Y. **Porosity, pore size distribution, micro-structure**. RILEM, 2017.
- LOPEZ, A. G. C.; LEPAGE, E. S.; MONTAGNA, R. G.. **Ensaio de campo em preservação de madeiras realizados através do convênio ipt-if**. 1º Encontro Brasileiro em Preservação de Madeiras, pp. 187-196, 1982.
- MARNEY, D.C.O.; RUSSEL, L.J., MANN, R. **Fire performance of wood (Pinus radiata) treated with fire retardants and a wood preservative**. *Fire and Materials*, 2008; 32:357-370
- MOGHTADER, B.; FLETCHER, D.F. “**Flaming Combustion Characteristics of Wood - Based Materials**”. International Association for Fire Safety Science, 1988.
- MORESCHI, J.C., **Biodegradação da madeira**. Biodegradação e Preservação da Madeira, Vol 1, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2013.

- PARKER, W.J. **Prediction of the Heat Release Rate of Wood**. Fire Safety Science – Proceedings of the first international symposium, 1988.
- PONCSÁK, S.; KOCAEF, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A.. **Effect of High Temperature Treatment on the Mechanical Properties of Birch (*Betula papyrifera*)**. Wood Science and Technology, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.
- REMADE. **Métodos de Tratamento de Madeira**. Revista da Madeira, edição 129, novembro de 2011.
- RICHTER, H.G.; DALLWITZ, M.J. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. 25th June 2009. Consultado em: <http://delta-intkey.com>'.
- ROCHA, M. A. F. “**Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras**”. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- SCHAFFER, E. L. **Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas Fir**. Journal of Testing and Evaluation, v. 1, n. 4, p319-329, 1973.
- SIMMS, D.L.; LAW, M., “**The Ignition of Wet and Dry Wood by Radiation**” Combustion and Flame, vol. 11, 1967, pp. 377–388.
- SPEARPOINT, M.J. “**Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model**”. *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, USA, 1999.
- SPEARPOINT, M.J.; QUINTIERE, J.G. “**Predicting the burning of wood using an integral model**”. *Combustion and Flame*, vol 123, No 3, pp. 308-325, Maryland, USA, 2000.
- SULZBERGER, P.H. “**The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints**”. Aust. Aeron. Sec. Consult. Com. Rep. 44 p. ACA-46, 1953.
- 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**. Eur. J. Wood Prod. 2009. 69:41-51

- URBAS, J.; PARKER, W.J. “**Surface temperature measurements on burning wood specimens in the cone calorimeter and the effect of grain orientation**”. *Fire and Materials*. 17:205-208, 1993.
- VITO, M. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Eucalipto Citriodora em Condição de Incêndio**. Dissertação de Mestrado, UNESC, Criciúma, 2013.
- WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. **The Chemistry of Wood Strength**. In: ROWELL, R. M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005
- WIKBERG, H.; MAUNU, S. L. **Characterization of Thermally Modified Hard- and Softwoods by ¹³C CPMAS NMR**. *Carbohydrate Polymers*, v. 58, p. 461-466, 2004
- WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M.A. **Tests / Standards / Methods – Cone calorimeter evaluation of wood products**. Fifteenth Annual BCC Conference on Flame Retardancy, 2004.
- WILLIAMS, C. C., **Damage initiation in organic materials exposed to high intensity thermal radiation**. Massachusetts Institute of Technology Fuels Research Laboratory, Technical Report no 2, Cambridge, 1953.
- WITTBECKER, F.W.; BANSEMER B. **A model for the scenario-related assessment of the smoke toxic potency**. Interflam 2004, Proceedings of the Tenth International Conference, Edinburgh, Interscience Communication Limited: London, 2004: pp. 1479-1490.