



APLICAÇÃO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS ALTERNATIVOS PARA  
AVALIAÇÃO DA RETARDÂNCIA À CHAMA EM MADEIRAS

Bruno Polycarpo Palmerim Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Alexandre Landesmann.

Rio de Janeiro  
Setembro de 2017

APLICAÇÃO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS ALTERNATIVOS PARA  
AVALIAÇÃO DA RETARDÂNCIA À CHAMA EM MADEIRAS

Bruno Polycarpo Palmerim Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Alexandre Landesmann, D.Sc.

---

Prof. Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar, D.Sc.

---

Dr. Julio Cesar Gonçalves da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2017

Dias, Bruno Polycarpo Palmerim

Aplicação de métodos experimentais alternativos para avaliação da retardância à chama em madeiras/ Bruno Polycarpo Palmerim Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVI, 116 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Landesmann.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 85-92.

1. Retardância à chama. 2. Madeiras. 3. Avaliação. I. Landesmann, Alexandre. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus pais Sérgio e Dilcéia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Alexandre Landesmann, pela orientação e pelo entusiasmo com o desenvolvimento da segurança contra incêndio e pânico no Estado do Rio de Janeiro.

À minha coorientadora, Dra. Simone Pereira da Silva Ribeiro, do Polo de Xistoquímica, pelos valorosos ensinamentos.

À Dra. Patrícia de Mattos Pavao, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Setor Florestas, pela cessão de parte do material empregado nos corpos de prova.

À minha namorada Fernanda Luz, pelo apoio incondicional e por entender meus momentos de ausência.

Aos companheiros do Laboratório de Estruturas, especialmente à Mestre Monique Rocha, pela camaradagem e pelo ambiente harmônico.

Ao Ten Cel BM Marco Albino Lourenço Pereira, pela amizade e pelo incentivo a continuar minha vida acadêmica.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, por ter me dado muito mais que uma profissão, mas uma verdadeira paixão.

Ao povo brasileiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

## APLICAÇÃO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS ALTERNATIVOS PARA AVALIAÇÃO DA RETARDÂNCIA À CHAMA EM MADEIRAS

Bruno Polycarpo Palmerim Dias

Setembro/2017

Orientador: Alexandre Landesmann

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho avalia experimentalmente a retardância à chama em madeiras através de métodos de ensaio não adotados pela atual classificação brasileira de inflamabilidade dos materiais. Desta forma, amostras de *E. dunnii*, *P. elliottii* e MDF foram selecionadas para a aplicação superficial de retardante de chamas à base de fósforo. A avaliação da reação ao fogo contemplou o ensaio GWFI (índice de inflamabilidade *glow-wire*) e o ensaio GWIT (temperatura de ignição *glow-wire*) no equipamento fio incandescente, seguindo os procedimentos preconizados na IEC 60695-2-10, IEC 60695-2-12 e na IEC 60695-2-13, e o ensaio do cone calorímetro de perda de massa (CCPM), de acordo com a ASTM E2102-08. Os resultados demonstraram que a aplicação superficial do retardante não reduziu de maneira significativa o pico de liberação de calor e o calor total liberado dos materiais ensaiados, se contrapondo ao tratamento por impregnação realizado em outros estudos. Além disso, o MDF não tratado enquadrou-se como um material retardante de chamas de acordo a *Building Standard Law* (BSL) do Japão, enquanto o MDF tratado não atendeu aos requisitos da aludida norma. Já a temperatura de ignição *glow-wire*, aumentou 75° C, 125° C e 150° C no *E. dunnii*, no *P. elliottii* e no MDF, respectivamente.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF ALTERNATIVE EXPERIMENTAL METHODS FOR THE  
EVALUATION OF FLAME RETARDANCY IN WOODS

Bruno Polycarpo Palmerim Dias

September/2017

Advisor: Alexandre Landesmann

Department: Civil Engineering

This work evaluates experimentally the flame retardancy of woods by means of test methods not adopted by the current Brazilian flammability classification of materials. So, a phosphorus-based flame retardant was applied on the surface of samples of *E. dunnii*, *P. elliotii* and MDF. The evaluation of flammability contemplated the glow-wire flammability index (GWFI) and the glow-wire ignition temperature (GWIT) tests, following the procedures recommended in IEC 60695-2-10, IEC 60695-2-12 and IEC 60695-2-13, and the mass loss cone calorimeter (MLCC) test, in accordance with ASTM E2102-08. The results demonstrated that the surface application of the flame retardant did not significantly reduce the peak of heat release rate and the total heat released from the tested materials, counter to the impregnation treatment performed in other studies. In addition, the untreated MDF was classified as a fire retardant material according to Building Standard Law (BSL) of Japan, while the treated MDF did not meet the requirements of the aforementioned standard. However, the GWIT increased 75 ° C, 125 ° C and 150 ° C in *E. dunnii*, *P. elliotii* and MDF, respectively.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 MADEIRAS .....	6
2.1.1 Anatomia, aplicações e propriedades físicas.....	7
2.2 A NATUREZA E O COMPORTAMENTO DO FOGO .....	10
2.2.1 Processo de ignição e combustão das madeiras.....	12
2.3 INFLAMABILIDADE DOS MATERIAIS COM ÊNFASE NAS MADEIRAS	13
2.3.1 Ignitabilidade .....	14
2.3.2 Liberação de calor .....	16
2.3.3 Tipos de Ensaio .....	19
2.3.4 Classificação da inflamabilidade dos materiais .....	20
2.4 RETARDANTES DE CHAMA.....	26
2.4.1 Retardantes de chamas para madeiras .....	28
2.4.2 Avaliação da retardância à chama em madeiras .....	30
<b>3 METODOLOGIA DE ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
3.1 DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	35
3.1.1 Tratamento dos corpos de prova com retardante de chamas .....	36
3.1.2 Codificação e propriedades físicas dos corpos de prova .....	41
3.2 CONE CALORÍMETRO DE PERDA DE MASSA - CCPM .....	44
3.2.1 Calibração do equipamento .....	47
3.2.2 Execução do ensaio .....	49
3.2.3 Procedimentos de Cálculo .....	52
3.3 FIO INCANDESCENTE .....	54
3.3.1 Execução do Ensaio GWFI.....	55
3.3.2 Execução do Ensaio GWIT.....	56
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>



4.1 CONE CALORÍMETRO DE PERDA DE MASSA - CCPM .....	58
4.2 FIO INCANDESCENTE .....	75
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A: Resultados experimentais do MLCC .....</b>	<b>93</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Imagem do incêndios na Grenfell Tower – Londres (maio de 2017). .....	3
Figura 2-1: Seção transversal da madeira [18]. .....	7
Figura 2-2: Corte transversal (a) e corte longitudinal (b) do <i>Pinus elliottii</i> [26]. .....	9
Figura 2-3: Típica combustão em chamas [16]. .....	11
Figura 2-4: Camada carbonácea das madeiras [19]. .....	13
Figura 2-5: Curva típica de liberação de calor de madeiras [6]. .....	17
Figura 2-6: Curva de liberação de calor do pinheiro escocês não tratado no cone calorímetro com piloto a 50 kW/m <sup>2</sup> [14]. .....	18
Figura 2-7: Fotografia do aparato do <i>Ignitability Test</i> (Ensaio de ignitabilidade). .....	19
Figura 2-8: Desenho esquemático do <i>Single Burning Item</i> (SBI). .....	20
Figura 2-9: TTI do MDF não tratado ( <i>non treated</i> ) e dos tratados superficialmente com retardante de chama à base de carbono [69]. .....	31
Figura 2-10: Concentração do retardante contendo carbamato polifosfórico impregnada no <i>Pinus desinflora</i> versus TTI [68]. .....	31
Figura 2-11: Concentração do retardante à base de polifosfato de carbamato impregnada no <i>Pinus desinflora</i> versus PHRR [68]. .....	32
Figura 2-12: Avaliação dos efeitos sinérgicos da impregnação de retardante de chamas à base de fósforo com a aplicação superficial de retardante de chama cerâmico no <i>Japanese Linden</i> e no <i>Japanese Red Pine</i> : (a) PHRR, (b) THR <sub>5min</sub> [52]. .....	33
Figura 2-13: Curva de liberação de calor observada no estudo [5]. .....	34
Figura 2-14: Curva de liberação de calor do MDF não tratado ( <i>non treated</i> ) e dos tratados superficialmente com retardantes de chama à base de carbono [69]. .....	34
Figura 3-1: Retardante de chamas CKC-2020. .....	37
Figura 3-2: Mensuração do volume expelido por borrifada do pulverizador manual. ....	38
Figura 3-3: Tratamento superficial com retardante de chamas. ....	39
Figura 3-4: Segunda demão do tratamento com o retardante de chamas. ....	40
Figura 3-5: Fotografias registradas vinte minutos após a aplicação superficial do retardante de chamas: (a) <i>Pinus elliottii</i> ; (b) MDF; (c) <i>Eucalyptus dunnii</i> . .....	41
Figura 3-6: Instrumentos de medição empregados: (a) paquímetro digital; (b) balança eletrônica. ....	42

Figura 3-7: Cone Calorímetro utilizado nos ensaios: (a) conjunto do cone; (b) unidade de controle. ....	46
Figura 3-8: Tela do módulo de calibração da célula de carga do MLCCalc. ....	47
Figura 3-9: Procedimento de calibração da termopilha. ....	48
Figura 3-10: Curva de calibração da termopilha obtida no MLCCalc. ....	48
Figura 3-11: Tela do módulo de calibração da célula de carga do MLCCalc. ....	49
Figura 3-12: Equipamentos de Proteção Individual. ....	49
Figura 3-13: Representação esquemática do ensaio do CCPM [84]. ....	51
Figura 3-14: Módulo de ensaio do MLCCalc. ....	51
Figura 3-15: Equipamento fio incandescente empregado no ensaio. ....	55
Figura 3-16: Representação esquemática do ensaio [84]. ....	57
Figura 4-1: Processo de ignição e combustão do EUCN: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em chamas; (d) cessar chamas (combustão em brasas). ....	59
Figura 4-2: Processo de ignição e combustão do PINR: (a) secagem/pirólise; (b) pirólise; (c) combustão em chamas; (d) cessar chamas (combustão em brasas). ....	60
Figura 4-3: Taxas de carbonização diferentes no <i>Pinus elliottii</i> . ....	60
Figura 4-4: Processo de combustão do MDFN: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em brasas. ....	61
Figura 4-5: Processo de combustão/ignição do MDFR: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em brasas; (d) combustão em chamas; (e) cessar chamas. ....	62
Figura 4-6: Representação gráfica do confronto de resultados: (a) PHRR <sup>o</sup> , (b) MLR <sub>180s</sub> , (c) MLR <sub>pir</sub> , (d) TTI, (e) TPHRR, (f) THR <sub>5min</sub> e (g) THR <sub>10min</sub> . ....	68
Figura 4-7: Confronto entre curvas Tempo x HRR <sup>o</sup> dos materiais tratado e não tratado: (a) <i>E. dunnii</i> , (b) <i>P. elliottii</i> e (c) MDF (escala vertical reduzida). ....	70
Figura 4-8: Representação gráfica do confronto dos resultados do ensaio GWIT. ....	76
Figura A-1: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN1. ....	94
Figura A-2: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN2. ....	95
Figura A-3: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN3. ....	96
Figura A-4: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN4. ....	97
Figura A-5: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR1. ....	98
Figura A-6: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR2. ....	99
Figura A-7: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR3. ....	100
Figura A-8: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR4. ....	101

Figura A-9: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN1. ....	102
Figura A-10: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN2. ....	103
Figura A-11: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN3. ....	104
Figura A-12: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN4. ....	105
Figura A-13: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR1. ....	106
Figura A-14: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR2. ....	107
Figura A-15: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR3. ....	108
Figura A-16: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR4. ....	109
Figura A-17: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN1. ....	110
Figura A-18: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN2. ....	111
Figura A-19: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN3. ....	112
Figura A-20: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN4. ....	113
Figura A-21: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR1.....	114
Figura A-22: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR2.....	115
Figura A-23: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR3.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Propriedades físicas do <i>Pinus elliottii</i> [26].....	9
Tabela 2-2: Classificação de Materiais no Japão [12]. .....	21
Tabela 2-3: Classificação de inflamabilidade de painéis à base de madeira aprovados por comissão europeia do CWFT [56]. .....	23
Tabela 2-4: Classificação dos materiais de revestimento de piso [58]. .....	24
Tabela 2-5: Classificação dos materiais exceto revestimento de piso [58]. .....	25
Tabela 3-1: Variações dos materiais. ....	42
Tabela 3-2: Propriedades físicas das amostras.....	43
Tabela 3-3: Classificação do coeficiente de variação [86]. .....	54
Tabela 4-1: Madeiras antes e após o ensaio no CCPM.....	64
Tabela 4-2: Dados obtidos a partir do CCPM.....	65
Tabela 4-3: Médias e coeficientes de variação dos resultados obtidos no CPPM. ....	66
Tabela 4-4: Médias e coeficientes de variação dos resultados obtidos no CPPM (após tratamento dos dados). .....	66
Tabela 4-5: Ensaio do GWFI. ....	75
Tabela 4-6: GWFI e GWIT dos corpos de prova.....	76
Tabela 4-7: Corpos de prova antes e depois do ensaio GWFI a 960° C. ....	77

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
As	Área superficial do corpo de prova
CBMERJ	Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro
CBPMESP	Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo
CCCO	Cone Calorímetro Por Consumo de Oxigênio
CCPM	Cone Calorímetro por Perda de Massa
CMAR	Controle de Materiais de Acabamento e Revestimento
COSCIP	Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico
CP	Corpo de prova
CV	Coeficiente de variação
DAP	Fosfato de Diamônio
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EUCN	<i>Eucalyptus dunnii</i> sem retardante de chamas
EUCR	<i>Eucalyptus dunnii</i> com retardante de chamas
FRT Wood	<i>Fire Retardant-Treated Wood</i>
FTT	<i>Fire Testing Technology</i>
GWFI	Índice de inflamabilidade <i>glow-wire</i> ( <i>glow-wire flammability index</i> )
GWIT	Temperatura de ignição <i>glow-wire</i> ( <i>glow-wire ignition temperature</i> )
HRR	Taxa de liberação de calor ( <i>heat release rate</i> )
HRR”	Taxa de liberação de calor por unidade de área
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LFS	Propagação lateral de chama ( <i>Lateral Flame Spread</i> )
LOI	Índice Limite de Oxigênio

M	Média
$m_0$	Massa no tempo inicial
MAP	Fosfato de Monoamônio
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
MDF	<i>Medium density fiberboard</i>
MDFN	MDF sem retardante de chamas
MDFR	MDF com retardante de chamas
$m_f$	Massa no tempo final
MLR	Taxa de perda de massa do ensaio
$MLR_{180}$	Intervalo compreendido da ignição até 180 segundos após o evento
$MLR_{pir}$	Intervalo compreendido do início do ensaio até a ignição, representando a massa perdida unicamente pelo processo de secagem e pirólise da madeira
NBR	Norma Brasileira
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
OSB	Painel de fibra orientada ( <i>Oriented Strand Board</i> )
PHRR	Maior pico de liberação de calor
PHRR''	Maior pico de liberação de calor por unidade de área
PHRR'' <sub>1</sub>	Primeiro pico de taxa de liberação de calor por unidade de área
PHRR'' <sub>2</sub>	Segundo pico de taxa de liberação de calor por unidade de área
PINN	<i>Pinus elliottii sem retardante de chamas</i>
PINR	<i>Pinus elliottii com retardante de chamas</i>
S	Desvio padrão
SBI	<i>Single Burning Item</i>
t	Tempo
$t_0$	Tempo inicial

$t_f$	Tempo final
THR	Calor total liberado por unidade de área do ensaio
THR <sub>5min</sub>	Calor total liberado por unidade de área após 5 minutos de ensaio
THR <sub>10min</sub>	Calor total liberado por unidade de área após 10 minutos de ensaio
TPHRR	Tempo para atingir a maior taxa de liberação de calor
TPHRR <sub>1</sub>	Tempo para atingir o primeiro pico de taxa de liberação de calor
TPHRR <sub>2</sub>	Tempo para atingir o segundo pico de taxa de liberação de calor
TTI	Tempo de ignição ( <i>time to ignition</i> )
$\Delta H_c$	Calor de combustão



## ***INTRODUÇÃO***

---

A segurança contra incêndio pode ser desenvolvida através de dois macro-objetivos: a prevenção da ignição e o gerenciamento do impacto dos incêndios. Dentre as medidas necessárias para atingir tais objetivos, há aquelas voltadas ao controle da ignitabilidade e do processo de combustão através da limitação de determinadas propriedades dos combustíveis [1]. Este conjunto de propriedades dos materiais é chamado de inflamabilidade ou reação ao fogo.

A inflamabilidade não pode ser representada por um valor único, por depender de uma série de parâmetros. Desta forma, a reação ao fogo é avaliada através de métodos de ensaio que determinam parâmetros relacionando propriedades como a ignitabilidade, a liberação do calor, a produção de fumaça e a propagação de chamas dos materiais [2]. Para se controlar tais propriedades, há basicamente duas alternativas: a substituição do material ou a aplicação de um retardante de chamas.

A retardância à chama é o processo através do qual a inflamabilidade de um material é reduzida através da aplicação de produtos chamados de retardantes de chamas. Os retardantes de chamas conferem aos materiais um melhor desempenho ao fogo e podem ser divididos em dois grandes grupos: compostos halogenados e não halogenados [3][4].

Os compostos halogenados apresentam alta eficiência na redução da inflamabilidade de uma série de materiais, incluindo madeiras [5][6]. No entanto, evidências da formação de substância tóxicas na combustão dos halogenados e descobertas recentes sobre questões ambientais negativas associadas ao uso desses compostos, sobretudo dos bromados, têm proporcionado um aumento na pesquisa e no desenvolvimento de formulações retardantes de chamas livre de halogenados, com destaque para compostos à base de fósforo [3][7].

Ao longo da história, os incêndios em ambientes compartimentados são aqueles que causaram o maior dano humano [8]. Dentre os materiais empregados nesses ambientes, pode-se destacar a madeira. O homem trabalha a madeira desde a sociedade pré-histórica e, atualmente, além dela ser empregada como elemento construtivo, apresenta uma série de usos que incluem os acabamentos e revestimentos de paredes, pisos e forros, bem como o mobiliário do interior das edificações. Apesar do emprego das madeiras, aparentemente, implicar num impacto negativo ao meio ambiente, o uso das madeiras oriundas de florestas certificadas se apresenta como uma alternativa sustentável, se comparado ao aço e ao concreto [9].

Dentre os grupos retardantes aplicados em madeiras, destacam-se aqueles que possuem fósforo em sua formulação [10]. Quanto às formas de aplicação, a impregnação e a aplicação superficial são possíveis tanto em madeiras naturais quanto em madeiras industrializadas (produtos à base de madeiras), tendo, a última, destaque no mercado brasileiro de retardantes de chama.

Há uma série de métodos de ensaio empregados para avaliar a retardância à chama em madeiras, sendo eles previstos na classificação da inflamabilidade dos materiais adotada pelas normas de segurança contra e incêndio locais. No Brasil, para materiais de revestimento de paredes, tetos e forros, *e. g.*, tal classificação leva em consideração a propagação de chamas e a produção de fumaça, não sendo avaliadas a liberação de calor e a ignitabilidade dos materiais [11].

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

O ano de 2017 está sendo marcado pelo processo de revisão do Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico (COSCIP) do Estado do Rio de Janeiro, datado de 1976. Trata-se de um trabalho que envolve mais de cem oficiais do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) na pesquisa para a elaboração de cerca de cinquenta Notas Técnicas.

Dentre as novidades do novo COSCIP, que está em fase de consulta pública, o comandante-geral do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro

(CBMERJ)<sup>1</sup> destacou o Controle de Materiais de Acabamento e Revestimento (CMAR). A motivação para tal destaque está relacionada, sobretudo, ao incêndio no edifício *Grenfell Tower* em Londres, ocorrido em maio de 2017, onde 79 pessoas morreram em virtude do baixo desempenho de reação ao fogo do revestimento de fachada do prédio (conforme Figura 1-1).



**Figura 1-1:** Imagem do incêndios na Grenfell Tower – Londres (maio de 2017).<sup>2</sup>

Este momento de pesquisa e desenvolvimento nos conduz a refletir sobre a atual classificação da inflamabilidade dos materiais adotada nas unidades federativas brasileiras e analisar trabalhos desenvolvidos, *e.g.*, por Babrauskas [12], que buscou diferentes formas de se enquadrar um material como incombustível, com o intuito de se propor a melhor delas.

Quando se envereda na análise da eficiência dos produtos empregados para redução da inflamabilidade dos materiais e abordando especificamente as madeiras, materiais amplamente empregados nas edificações, verifica-se que o Brasil possui um grupo de produtos retardantes de chama que se autodenominam certificados por terem sido submetidos a ensaios preconizados na atual classificação brasileira de inflamabilidade de

---

<sup>1</sup> <http://odia.ig.com.br/opiniao/2017-08-28/cel-ronaldo-alcantara-contra-incendio-e-panico.html>.

<sup>2</sup> Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/mundo/2017/06/1895392-incendio-em-torre-de-londres-comecou-em-geladeira-diz-policia-britanica.shtml>.

materiais e que avaliam a propagação de chamas e de produção de fumaça. No entanto, tais ensaios não englobam todas as propriedades de reação ao fogo dos materiais e seus resultados não especificam o tipo de madeira que foi submetida ao tratamento.

Sendo assim, para avaliar se tais produtos são eficazes em todas as propriedades de reação ao fogo, verifica-se a necessidade de se aplicar métodos de ensaio que confrontem a liberação de calor e a ignitabilidade de madeiras tratadas e não tratadas. Outrossim, não se pode esquecer das diferenças significativas entre as propriedades de reação ao fogo dos distintos tipos de madeiras [13], sendo inconcebível que um teste executado em apenas uma espécie garanta a eficiência em todas as madeiras.

Diante do que foi apresentado, o cone calorímetro por perda de massa (CCPM) se apresenta como o equipamento mais empregado para avaliar a liberação de calor dos materiais, sendo capaz de quantificar uma série de parâmetros, incluindo a taxa de liberação de calor, considerado o parâmetro mais importante para prever o comportamento dos incêndios [4][14][15][16]. Sob outra perspectiva, não se identificou registros científicos do emprego do equipamento fio incandescente para avaliar a ignitabilidade de madeiras, mesmo com sua capacidade de simular os efeitos de fenômenos oriundos do mau funcionamento de equipamentos e instalações elétricas [17], causas comuns de incêndios envolvendo madeiras [16].

## **1.2 OBJETIVOS**

Tendo o exposto, o presente estudo tem por objetivo avaliar a retardância à chama de madeiras através de parâmetros de reação ao fogo obtidos por meio do cone calorímetro por perda de massa (CCPM) e do fio incandescente.

Para se garantir a representatividade das madeiras, serão avaliadas uma espécie de cada grupo de madeiras naturais (uma dicotiledônea e uma conífera) e uma madeira industrializada. As madeiras serão tratadas superficialmente através de retardante de chamas à base de fósforo, por ser o método comumente empregado no Brasil.

Os parâmetros confrontados através de resultados obtidos pelo CCPM são: (i) a taxa de liberação de calor (*heat release rate* - HRR); (ii) o primeiro pico de taxa de liberação de calor (PHRR<sub>1</sub>); (iii) o segundo pico de taxa de liberação de calor (PHRR<sub>2</sub>), (iv) o tempo

de ignição (*time to ignition* - TTI), (v) o tempo para atingir o primeiro pico de taxa de liberação de calor (TPHRR<sub>1</sub>), (vi) o tempo para atingir o segundo pico de taxa de liberação de calor (TPHRR<sub>2</sub>), o calor total liberado após cinco minutos de ensaio (*total heat release 5 minutes* – THR<sub>5min</sub>) e o calor total liberado após dez minutos de ensaio (*total heat release 10 minutes* – THR<sub>10min</sub>). Já os parâmetros confrontados através dos resultados obtidos pelo fio incandescente são: (i) o tempo de ignição *glow-wire* (*glow-wire time of ignition* - GWTI) e o (ii) índice de inflamabilidade *glow-wire* (*glow-wire flammability index* – GWFI).

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado está em seis capítulos estruturada. No primeiro deles, foram apresentadas a introdução, motivação e a organização da pesquisa, onde a problemática da avaliação da retardância à chama das madeiras é restrita aos objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo engloba uma revisão bibliográfica sobre as propriedades das madeiras, o conceito de inflamabilidade, os estudos relacionados à liberação de calor e ignitabilidade das madeiras, as diversas classificações dos materiais quanto à reação ao fogo e os principais retardantes de chamas empregados em madeiras, incluindo o mecanismo de ação e as formas de aplicação dos compostos à base de fósforo.

O terceiro capítulo aborda todo o processo de preparação das amostras de madeira e os procedimentos empregados nos ensaios do cone calorímetro por perda de massa (CCPM) e no fio incandescente, seguindo o preconizado em normas internacionais. Além disso, justificam-se determinadas tomadas de decisão, como, *e.g.*, a escolha do fluxo de calor para o ensaio do CCPM.

Os resultados são discutidos no capítulo 4, onde são confrontados os parâmetros de reação ao fogo das amostras tratadas com retardantes de chamas e não tratadas. As principais considerações e apontamentos da pesquisa estão no capítulo Conclusão, bem como as sugestões para trabalhos futuros. Já as referências bibliográficas estão no último capítulo.

# 2

## ***REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

---

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento dos ensaios a serem realizados, bem como da análise e discussão dos resultados.

Além de propriedades gerais das madeiras, serão apresentadas características e aplicações específicas de um exemplar de cada grupo de madeiras: o *Pinus elliottii*, o *Eucalyptus dunnii* e o MDF, que representam, respectivamente, uma conífera, uma dicotiledônea e um compósito à base de madeira comumente empregados como materiais de acabamento e revestimento em edificações.

### **2.1 MADEIRAS**

O termo madeira é genérico e designa uma ampla gama de materiais cujo componente principal tem origem vegetal, podendo ser naturais (também chamadas de madeiras maciças) ou sintéticas (também chamadas de madeiras industrializadas, ou de materiais à base de madeiras, ou compósitos à base de madeiras) [16].

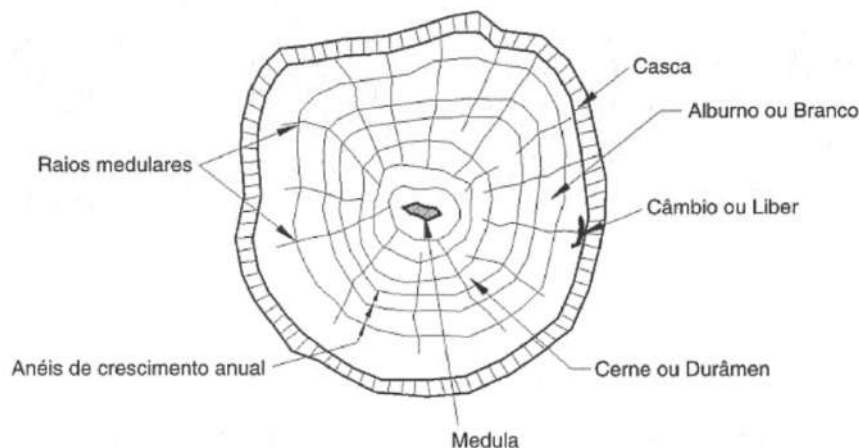
As madeiras naturais são classificadas de acordo com as árvores que foram obtidas. As madeiras duras são obtidas de árvores dicotiledôneas, enquanto as macias, das coníferas, havendo diferenças anatômicas e biológicas entre elas [18]. As madeiras naturais são compostas por celulose, lignina, hemicelulose e uma menor porção de outros materiais presentes em sua estrutura celular. De maneira geral, as diferenças nas proporções e características desses componentes e de sua estrutura celular resultarão nas peculiaridades anatômicas e físicas das madeiras [9].

Já os compósitos à base de madeira são o resultado de madeiras que foram processadas e convertidas em finas camadas, partículas ou polpas para produzir painéis projetados, como compensados, aglomerados e laminados [9].

### 2.1.1 Anatomia, aplicações e propriedades físicas das madeiras

As árvores podem ser cortadas em sua seção transversal ou em sua seção longitudinal, ou seja, perpendicularmente ou paralelamente às suas fibras, respectivamente. O corte transversal revela quatro regiões da madeira: (i) a medula, (ii) o cerne, (iii) o albarno e (iv) a casca, como pode ser evidenciado na Figura 2-1 [18].

A casca é a região mais externa da madeira e tem a função de proteção do vegetal. O albarno é a região formada por células vivas que conduzem a seiva das raízes para as folhas. O cerne representa as células do albarno que se tornaram inativas e possuem apenas a função de sustentação (geralmente apresenta coloração mais escura). Já a medula é o tecido onde se verifica o crescimento de novos ramos. Por fim, os anéis de crescimento podem ser correlacionados à idade das árvores [18].



**Figura 2-1:** Seção transversal da madeira [18].

As coníferas possuem fibras longitudinais com extremidades permeáveis e perfurações laterais para a passagem de líquidos. Já nas dicotiledôneas, as fibras longitudinais são fechadas e a seiva é conduzida através de vasos longitudinais [9][18]. Há uma série de propriedades físicas das madeiras que serão discutidas a seguir.

A densidade é uma das propriedades mais estudadas no mundo por apresentar boa correlação com as propriedades mecânicas da madeira [19]. O parâmetro densidade básica da madeira é a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado [20]. Na mesma linha, a densidade superficial é o quociente da massa pela unidade de área ou o produto da densidade pela espessura, sendo um parâmetro considerado efetivo para analisar as propriedades superficiais da madeira. Subyakto *et al.* [21] obtiveram correlações positivas entre a densidade superficial da madeira e o tempo para que a face oposta ao fluxo de calor material atingisse 260° C (temperatura aproximada do início da degradação da celulose).

A retrabilidade é a retração da madeira provocada pela redução do seu teor de umidade [19]. Já a porosidade é a fração de volume vazio na madeira e apresenta correlação negativa com a densidade [22]. Por fim, a permeabilidade é a medida da facilidade na qual um fluido passa por um meio poroso quando submetido a um gradiente de pressão [23].

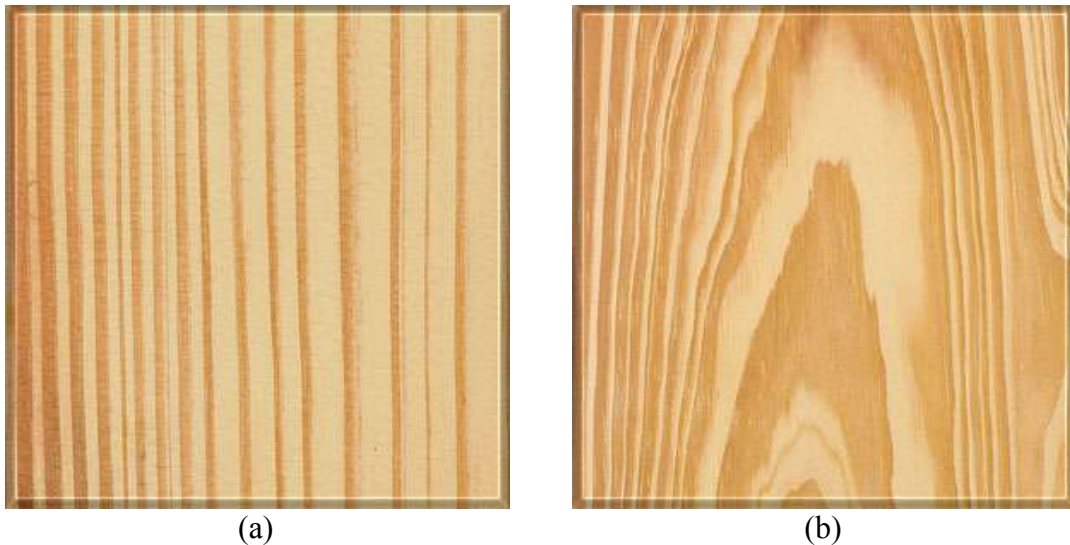
Nas madeiras, a permeabilidade aos líquidos tem um papel importante em seus processos de secagem e tratamento [24], havendo uma correlação positiva entre a permeabilidade das madeiras e sua suscetibilidade a tratamentos químicos [25]. Silva [22], por sua vez, verificou que a densidade não é fator determinante da permeabilidade das madeiras e que esta propriedade está relacionada à particularidade anatômica de cada espécie, à parte específica do lenho que foi retirado o corpo de prova e à idade das madeiras.

#### **2.1.1.1 O *Pinus elliottii***

O *Pinus elliottii*, conhecido nos EUA como *slash pine*, é parte de um grupo de coníferas encontradas no sul dos EUA que apresenta anatomia e propriedades físicas semelhantes. Trata-se de uma madeira introduzida no Brasil, sendo considerada uma madeira de reflorestamento. Seu uso engloba partes secundárias de estruturas de construção civil, usos temporários (como formas para concreto), materiais de acabamento e revestimento (como forros, rodapés e lambris), bem como mobiliários [26].

Apresenta alburno na cor branca-amarelada e cerne na cor marrom-avermelhada. Seus cortes transversal e longitudinal são apresentados na Figura 2-2(a) e Figura 2-2(b), respectivamente.





**Figura 2-2:** Corte transversal (a) e corte longitudinal (b) do *Pinus elliottii* [26].

Quando da redução de seu teor de umidade, apresenta retração moderadamente alta [9]. Trata-se de uma madeira fácil de ser tratada e de fácil secagem e suas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 2-1.[26]

**Tabela 2-1:** Propriedades físicas do *Pinus elliottii* [26].

<b>Densidade de massa</b>	<b>Valor (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Aparente a 15% de umidade	480 kg/m <sup>3</sup>
Básica	400 kg/m <sup>3</sup>
<b>Contração</b>	<b>Valor (%)</b>
Radial	3,4 %
Tangencial	6,3 %
Volumétrica	10,5 %

### 2.1.1.2 O *Eucalyptus dunnii*

O gênero *Eucalyptus* foi introduzido no Brasil no início do século XX e, atualmente, representa o gênero florestal exótico mais importante, em virtude da sua imensa área plantada e da sua utilização na indústria como matéria-prima [27].

O *Eucalyptus dunnii* é uma dicotiledônea natural da Austrália, tendo sido introduzida no Brasil como madeira de reflorestamento e seus plantios estão localizados nos estados de Santa Catarina e Paraná. Esta espécie apresenta densidade básica de 0,8 kg/m<sup>3</sup> [28] e, no

gênero *Eucalyptus*, destaca-se pelo crescimento rápido e retidão do tronco da árvore, características desejáveis à indústria madeireira [29].

Trata-se de uma espécie muito semelhante ao *Eucalyptus grandis*, podendo ter as mesmas aplicações [30], ou seja, ripas, partes secundárias de estruturas, usos temporários (como andaimes e pontalotes), materiais de acabamento e revestimento (como forros, rodapés e lambris), bem como mobiliários [26]. Entretanto, a espécie é mais empregada para usos que requerem maiores resistências mecânicas, tais como materiais de acabamento de pisos [31].

### **2.1.1.3 O MDF**

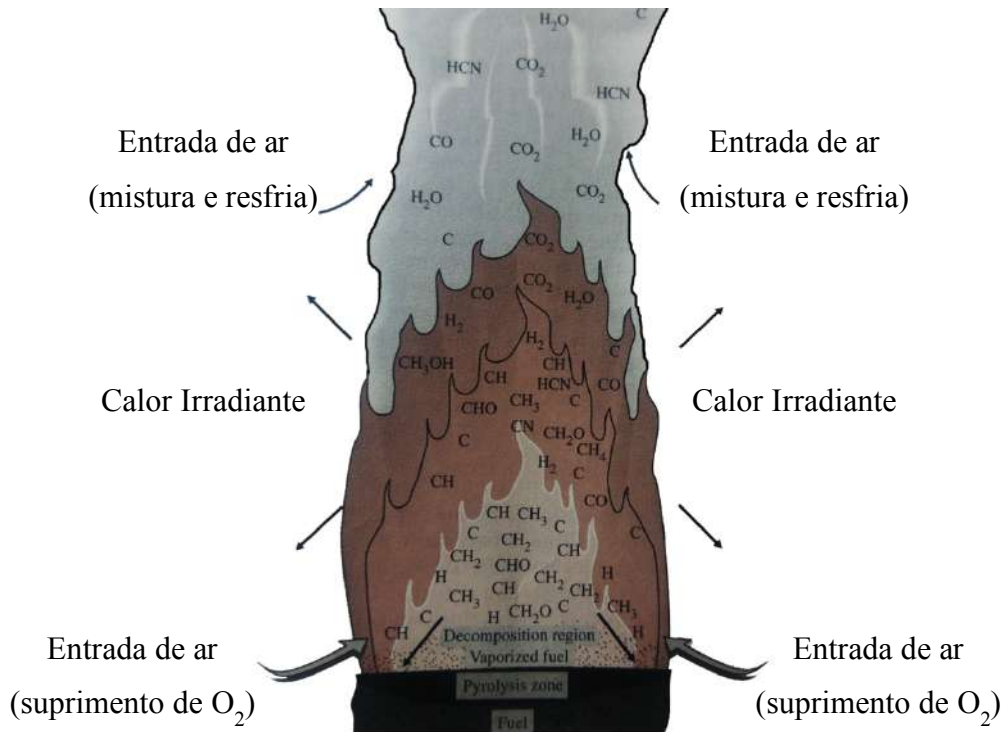
O MDF (*medium-density fiberboard*) ou painel de fibras de média densidade é um material à base de madeira produzido por meio da aglutinação das fibras de madeira. Este processo se dá através da prensagem a quente de placas muito finas de madeira com resinas sintéticas e aditivos, resultando em painéis com densidade que variam de 0,5 kg/m<sup>3</sup> a 0,8 kg/m<sup>3</sup> [32]. As resinas mais empregadas são o fenol-formaldeído, o ureia-formaldeído e o isocianato [9].

Trata-se de um composto à base de madeira comumente empregado como mobiliário e material de acabamento e revestimento das edificações. A norma americana ANSI A208.2 [33] classifica o MDF de acordo com as propriedades físicas e mecânicas e os limites de liberação de formaldeído [9]. Dentre os tipos de MDF, destaca-se o *fire retardant* (FR-MDF), que é um MDF prensado com aditivos retardantes de chamas que lhe conferem melhores parâmetros de reação ao fogo [34].

## **2.2 A NATUREZA E O COMPORTAMENTO DO FOGO**

O fogo (ou a combustão) é uma reação de oxidação exotérmica caracterizada pela liberação de calor e luz. Há dois tipos de combustão: a com chamas e a sem chamas (em brasas). O primeiro é o tipo mais comum, onde a chama é o resultado da queima de um gás ou vapor. Portanto, a combustão com chamas pode ocorrer num combustível gasoso sem exigir qualquer processo químico ou físico prévio, o que não acontece nos combustíveis líquidos e sólidos [16].

Nos combustíveis líquidos e sólidos, o calor das chamas é irradiado para a superfície do material, levando à evaporação dos líquidos ou à pirólise nos sólidos. Os vapores são liberados na zona de decomposição, onde produtos intermediários são formados antes da combustão. A pluma de gases quentes e demais produtos da combustão incompleta (incluindo aerossóis e fuligem) sobem para as camadas superiores por convecção. A Figura 2-3 ilustra este processo de combustão com chamas em um sólido [16].



**Figura 2-3:** Típica combustão em chamas [16].

A combustão em brasas ocorre em materiais sólidos cuja superfície está muito quente, mas que, em virtude da baixa liberação de voláteis ou da baixa concentração de oxigênio, a combustão em chamas não tenha sido atingida. Este tipo de combustão envolve o contato do oxigênio (fase gasosa) com o material (fase sólida) e pode ocorrer desde o estágio inicial do incêndio até seu decaimento. Nos casos de baixa concentração de oxigênio, há produção de altas concentrações de monóxido de carbono, em virtude da combustão incompleta [16].

### 2.2.1 Processo de ignição e combustão das madeiras

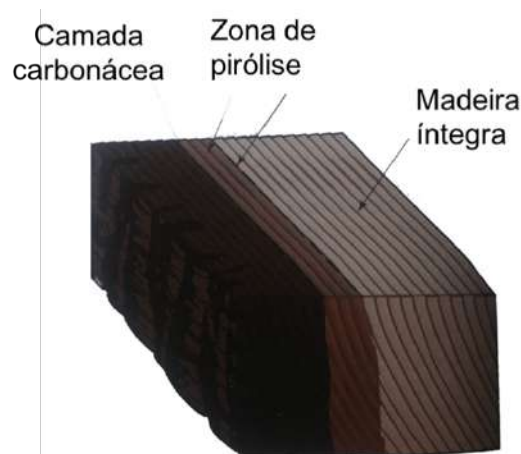
Apesar das diferenças na composição das madeiras, há três fases comuns no seu processo de ignição e combustão: (i) preliminar; (ii) principal e (iii) final [10].

A fase preliminar é uma fase onde não há a presença de chamas, caracterizada pelo processo de secagem e pela pirólise do material. Até a temperatura de 105° C ocorre a evaporação da água. Em seguida, com cerca de 160° C, começa a decomposição da lignina, dando início à formação da camada carbonácea. A maior parte do carbono fixo na camada carbonácea formada é oriunda da decomposição da lignina [35]. A decomposição da hemicelulose ocorre a, aproximadamente, 180°C. Entre 200° e 260° C, há um aumento da liberação de vapores e hidrocarbonetos com baixo ponto de ebulição. A celulose se decompõe numa temperatura compreendida entre 260° e 300° C, sendo o principal responsável pela liberação dos voláteis [10].

A fase principal se inicia com a ignição (combustão em chamas), numa faixa de temperatura que varia entre 260° e 450° C. Nesta fase há aumento intenso da taxa de liberação de calor e de perda de massa, bem como a intensificação da formação da camada carbonácea [10]. De maneira geral, a temperatura de ignição das coníferas varia de 350° C a 365° C, sendo cerca de 50° C maior que a das dicotiledôneas, em virtude da maior concentração de lignina naquelas espécies [36].

A fase final ocorre quando as temperaturas da madeira atingem valores superiores a 500°C, onde prevalece a formação da camada carbonácea em relação à liberação de vapores. Nesta fase há a oxidação da camada carbonácea, ou seja, a combustão em brasas [10].

O processo de combustão depende de uma série de fatores, incluindo a taxa de transferência de calor para o material, sua densidade, umidade, condutividade e capacidade térmica, por exemplo. Em se tratando das madeiras, a formação da camada carbonácea (caracterizada por uma condutividade térmica diversas vezes menor que a madeira) em sua superfície no processo de combustão representa um isolamento térmico temporário, reduzindo a taxa de liberação de voláteis, conforme Figura 2-4.



**Figura 2-4:** Camada carbonácea das madeiras [19].

A camada carbonácea na superfície da madeira é resultado da combinação de dois grupos de reações: o primeiro se dá na fase inicial, oriundos das reações de pirólise da madeira; já o segundo grupo inclui reações secundárias de formação de carbono envolvendo os produtos voláteis das primeiras reações de pirólise. Este segundo grupo ocorre quando os voláteis migram para a superfície da madeira [37]. Quando a camada carbonácea apresenta espessura suficiente para a manutenção da alta temperatura no interior da madeira, sua eventual quebra / trinca pode permitir o contato direto do oxigênio e promover a combustão em chamas [16].

A espessura da camada carbonácea depende da taxa de carbonização. Estudos constataram a ausência de correlação entre esta propriedade e a densidade, o teor de umidade e a permeabilidade das madeiras [37][38]. No ensaio do índice limite de oxigênio (LOI)<sup>3</sup>, Jiang *et al.* [39] observaram que as amostras de madeira tratadas com retardante à base de fósforo apresentaram camada carbonácea após a queima, enquanto as não tratadas, cinzas.

### 2.3 INFLAMABILIDADE DOS MATERIAIS COM ÊNFASE NAS MADEIRAS

A inflamabilidade (ou reação ao fogo) é um conjunto de propriedades dos materiais que incluem (i) a facilidade na qual ele entra em ignição, (ii) a intensidade na qual ele queima

---

<sup>3</sup> O índice limite de oxigênio (LOI) é a porcentagem mínima de oxigênio no ar capaz de sustentar a combustão em chamas.

e libera calor, *(iii)* a propensão que ele tem de propagar chamas e *(iv)* a taxa na qual ele produz fumaça e produtos tóxicos de combustão. O presente estudo, como apresentado em seus objetivos, abordará as duas primeiras propriedades mencionadas, ou seja, a ignitabilidade e a liberação de calor.

### **2.3.1 Ignitabilidade**

A resistência de um material entrar em ignição é uma importante propriedade pois, exceto nos casos onde ocorre a combustão em brasas, a severidade do incêndio será nula se não houver ignição [40]. Neste contexto é importante destacar as diferentes formas de ignição de um material.

Há basicamente duas formas de medir a ignitabilidade dos materiais: *(i)* a ignição sem piloto (chamada de autoignição) e a *(ii)* ignição com piloto. A mensuração da autoignição é pouco conservativa, pois depende intensamente das condições geométricas e ambientais do ensaio. Por este motivo, a maior parte dos ensaios se vale de pilotos para induzir a ignição dos materiais, que podem ser centelhamentos (faíscas), chamas abertas ou fios quentes [40].

O processo de ignição com piloto ocorre em três fases: *(i)* primeiro há o aquecimento inerte, onde o a taxa de aumento da temperatura depende do fluxo calor, da perda de calor para o entorno e das propriedades termofísicas do combustível; *(ii)* em seguida, há a decomposição térmica (pirólise), cuja taxa é dependente da cinética e da natureza endotérmica ou exotérmica da reação; *(iii)* por fim, há o fluxo dos vapores da zona condensada para a zona gasosa formando uma mistura com o oxigênio. Quando esta mistura estiver acima do limite inferior de inflamabilidade, o aquecimento do piloto irá promover a ignição.

A partir da ignição, há três possibilidades: *(i)* a chama não terá energia para se sustentar em virtude da intensa perda de calor para superfície sólida, resultando num *flash*; *(ii)* a chama não tem energia suficiente para superar as perdas, em virtude da taxa de queima dos gases ser maior que a taxa de pirólise, resultando num *flash*; e *(iii)* a chama terá energia suficiente e a taxa de pirólise será contínua, resultando numa chama estável e sustentável, sendo considerado o momento da ignição [41].

Os processos de ignição dos materiais sólidos com piloto são classificados em dois grupos: *(i)* os que utilizam propriedades da fase sólida, como a temperatura da superfície e o fluxo de massa dos gases liberados e *(ii)* os modelos que utilizam propriedades das chamas, como temperatura da chama e estequiometria como um critério para ignição ou extinção [41]. Em virtude das dificuldades em se determinar a ignição na zona gasosa ou a taxa de composição crítica para ignição, a maior parte das análises teóricas relacionam o momento de ignição com a temperatura crítica da superfície do material, ou seja, estabelecem como medida da ignitabilidade a temperatura de combustão / ignição<sup>4</sup> [40].

Apesar da temperatura de ignição ser uma variável aparentemente constante, ela dependerá de uma série fatores. O modo de ignição (com ou sem chama piloto) e o fluxo de calor irão influenciar não só a temperatura de ignição, mas o regime de ignição das madeiras [42].

Há três regimes de ignição das madeiras: *(i)* a ignição incandescente, que apresenta combustão em brasa (não autossustentável), *(ii)* a ignição em dois estágios, onde primeiro ocorre a ignição incandescente e, em seguida, a ignição com chamas e *(iii)* a ignição com chamas direta. O primeiro regime ocorre em fluxos mínimos de calor, enquanto o segundo, em fluxos baixos. Já a ignição com chamas ocorre em madeiras com fluxo médio, ou seja, valores de 22 kW/m<sup>2</sup> para ensaios com piloto e 33 kW/m<sup>2</sup> para ensaios de autoignição [42].

Os métodos de obtenção da temperatura de ignição podem ser *(i)* temperatura da superfície no momento da ignição ou *(ii)* temperatura mínima do forno suficiente para que a ignição ocorra e se sustente. A partir da análise de equipamentos como o fio incandescente, é possível a identificação de um terceiro método de obtenção da temperatura, no qual se avalia a temperatura mínima do piloto (no caso o material metálico aquecido) suficiente para que a ignição ocorra e se sustente. As diferenças entre o método *i* e *ii*, em se tratando de madeiras, são pequenas, sendo obscurecidas pela dispersão dos dados experimentais [42].

---

<sup>4</sup> A temperatura de ignição está relacionada à temperatura da superfície na autoignição, enquanto a temperatura de combustão está relacionada à ignição com piloto [8].

### 2.3.2 Liberação de calor

O calor está envolvido em todo o processo de ignição e propagação de um incêndio. Ao passo que a taxa de reação de combustão aumenta, mais calor é liberado, como consequência, mais calor implica num aumento da taxa de reação de combustão. Está é a chave para que o fogo se mantenha, ou seja, da reação em cadeia [16].

Dentre os parâmetros relacionados à liberação de calor, a taxa de liberação de calor (HRR) pode ser entendida como a taxa de energia produzida por um incêndio ou por uma fonte de calor. Esse valor é geralmente medido em watts (W), podendo o HRR por unidade de área (HRR'') ser calculado através do produto do calor de combustão ( $\Delta H_c$ ) pela taxa de perda de massa (MLR) [16], conforme a equação 2-1.

$$\text{HRR}'' = \text{MLR} \cdot \Delta H_c \quad (\text{Eq. 2-1})$$

Desta forma, a taxa de perda de massa, definida como a massa de produtos sólidos pirolisada por unidade de área e unidade de tempo, é encarada como um parâmetro intimamente relacionado à taxa de liberação de calor [40].

Diversos autores revelaram a importância da liberação de calor para o entendimento da reação ao fogo dos materiais. DeHaan [16] considera o HRR como o parâmetro que caracteriza o tamanho do incêndio, sendo a maneira mais útil para comparar e prever o comportamento dos incêndios. Babrauskas e Peacock [15] e Hirschler [4] por sua vez, entendem que o HRR é a mais importante variável que influencia a severidade dos incêndios e que o pico de HRR (PHRR) é o indicador numérico da sua intensidade.

O HRR é um importante preditor da severidade dos incêndios por determinar a sua taxa de crescimento. Já o calor total liberado (THR) pode ser diretamente relacionado a outras propriedades de reação ao fogo (como a produção de fumaça e a propagação de chamas), às temperaturas das chamas e se o incêndio atingirá seu desenvolvimento completo [40].

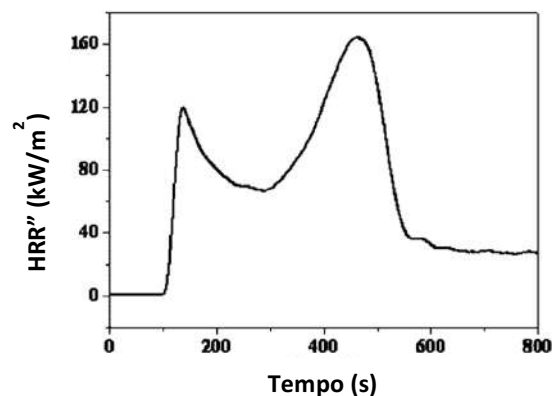
Dentre os estudos realizados para chegar às afirmações acima, podem ser citadas as quatro simulações computacionais executadas por Babrauskas e Peacock [15]: (i) na primeira havia uma cadeira em chamas num quarto, (ii) na segunda, a mesma cadeira com tempo de ignição reduzido; (iii) na terceira, a mesma cadeira com aumento da produção de fumaça e (iv) na quarta, a mesma cadeira aumentando a taxa de liberação de calor. Como



resultado da simulação ficou evidenciado que o aumento do HRR representou uma redução de cerca de um terço no tempo de letalidade do incêndio em relação ao primeiro caso, enquanto as variações da produção de fumaça e liberação de calor representaram reduções insignificantes no tempo de letalidade do incêndio apontado no primeiro caso [15].

Em se tratando da avaliação da taxa de liberação de calor em madeiras, estudos foram desenvolvidos buscando uma correlação entre os valores de HRR e o fluxo de calor, a densidade e a orientação das amostras. White [43] encontrou correlação positiva entre o calor de combustão e a porcentagem de lignina nas amostras. Janssens [44] analisou vinte e duas madeiras (englobando naturais e industrializadas), encontrando uma correlação positiva entre o pico de HRR e a densidade das amostras de madeira.

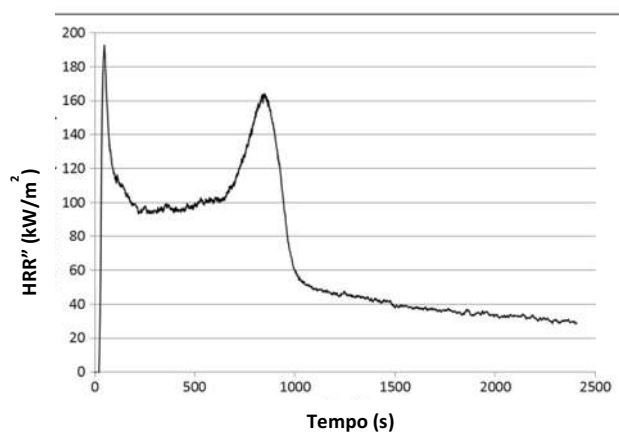
Chung e Spearpoint [45] estudaram o comportamento do HRR ao longo do tempo em quatro espécies de madeiras naturais (nativas da Coreia do Sul) submetidas a um fluxo de calor de 50 kW/m<sup>2</sup> no cone calorímetro por consumo de oxigênio, tendo sido observado em todas as espécies: (i) inicialmente, um primeiro pico de HRR assim que a superfície da madeira ignitou, (ii) seguido por uma redução do HRR provocada pelo efeito isolante da camada carbonácea depositada, que reduz a taxa de pirólise das madeiras e (iii) um aumento do HRR próximo ao fim do ensaio (um segundo pico de HRR), provocado pela reflexão da onda eletromagnética no lado posterior da amostra. Por fim, a combustão em chamas cessa, em virtude da redução da liberação de voláteis liberados, implicando na redução da taxa de liberação de calor. O comportamento mencionado pode ser verificado na curva da Figura 2-5.



**Figura 2-5:** Curva típica de liberação de calor de madeiras [6].

O comportamento da curva típica de liberação de calor em madeiras, chamada de pico duplo, é característica de materiais que formam camada carbonácea e são termicamente espessos<sup>5</sup> [46]. Tal comportamento também foi observado por Lee *et al.* [47] e por Grexa e Lübke [48]. No entanto, os últimos explicam o segundo pico de HRR em virtude do aumento da taxa de liberação de voláteis na fina camada de madeira íntegra (não queimada) antes do final da combustão em chamas (e decorrente início da combustão em brasas). Na mesma linha de pensamento, Spearpoint e Quintiere [49] explicam o comportamento de pico duplo em virtude da quebra e contração da camada carbonácea, que resulta num aumento da taxa de pirólise e, conseqüentemente, num aumento da liberação de voláteis.

Ainda sobre o comportamento de pico duplo das curvas de liberação de calor, o mesmo foi registrado em madeiras compensadas cuja matéria prima foi o *Eucalyptus dunnii* [5] e no pinheiro escocês (conífera), conforme Figura 2-6 [14].



**Figura 2-6:** Curva de liberação de calor do pinheiro escocês não tratado no cone calorímetro com piloto a 50 kW/m<sup>2</sup> [14].

---

<sup>5</sup> Um material termicamente espesso é aquele que apresenta taxa de resistência à transferência de calor, *i.e.*, número de Biot superior a 0,1, indicando que não se pode assumir que sua temperatura seja constante ao longo do volume do material e que equações mais sofisticadas serão necessárias para descrever transferência de calor no mesmo.

### 2.3.3 Tipos de Ensaio

As propriedades de reação ao fogo dos materiais podem ser avaliadas através de ensaios de bancada e ensaios de escala real. Os ensaios de bancada são os mais empregados, pois os custos para aquisição, manutenção e instalação dos equipamentos e preparação das amostras são menores. Seus resultados são úteis para, sobretudo, desenvolver previsões do comportamento do incêndio em escala real [40]. Dentre os equipamentos / métodos de ensaio de bancada, destaca-se: (i) o cone calorímetro, (ii) o painel radiante e (iii) o ensaio de ignitabilidade (apresentado na Figura 2-7).

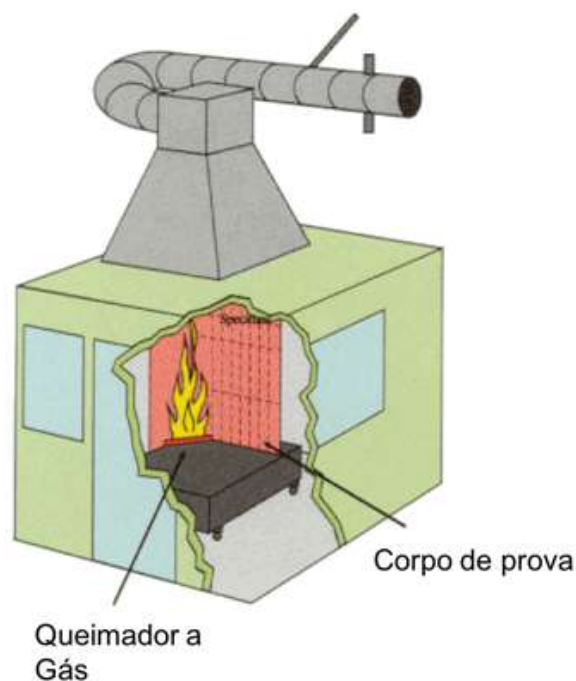


**Figura 2-7:** Fotografia do aparato do *Ignitability Test* (Ensaio de ignitabilidade).<sup>6</sup>

No entanto, se as extrapolações dos dados do ensaio de bancada não são capazes de prever satisfatoriamente o comportamento dos incêndios reais, faz-se necessária a realização de ensaios de escala real. As principais causas das divergências dos resultados estão na diferença entre o comportamento das chamas (tempo de residência e tamanho) nos ensaios de bancada e os de escala real e, conseqüentemente, sua influência na transferência de calor por irradiação para os combustíveis [40]. O *Single Burning Item* (apresentado na Figura 2-8) e o *Room/Corner Test* são exemplos de ensaios de escala real.

---

<sup>6</sup> <[http://ss1.spletnik.si/4\\_4/000/000/31a/ba4/Screen-Shot-2012-10-04-at-9.35.59-AM.png](http://ss1.spletnik.si/4_4/000/000/31a/ba4/Screen-Shot-2012-10-04-at-9.35.59-AM.png)>.



**Figura 2-8:** Desenho esquemático do *Single Burning Item (SBI)*<sup>7</sup>.

### 2.3.4 Classificação da inflamabilidade dos materiais

A classificação da reação ao fogo dos materiais leva em consideração uma gama de ensaios que devem ser realizados para enquadrá-los em determinada classe. Esta classificação do material é regulada por normas que, em regra, variam de acordo com o país, ou até mesmo com o estado ou província.

Os EUA possuem critérios para definir e classificar uma “madeira tratada com retardante de chamas” (*fire retardant-treated wood - FRT Wood*), assim como os retardantes de chamas de aplicação superficial em madeiras, em termos de redução de índices de propagação de chamas e de produção de fumaça. Os valores dos parâmetros mencionados são encontrados em normas como a NFPA 703 [50].

O Japão, através do *Building Standards Law* (código nacional de normas para as construções), tem como principal propriedade para classificação dos materiais de revestimento a liberação de calor, através do cone calorímetro [51]. Os materiais são

---

<sup>7</sup><[https://www.sp.se/sv/index/services/firetest\\_building/firetest\\_bu%C3%ADlding/EN\\_13823\\_SBI/Sidor/default.aspx](https://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/EN_13823_SBI/Sidor/default.aspx)>.

submetidos ao ensaio do cone calorímetro com um fluxo de calor de 50 kW/m<sup>2</sup>. Para ser enquadrado como não combustível (*noncombustible*), quase não combustível (*quasi-noncombustible*) e retardante de chamas (*fire retardant*) o material deve atender aos requisitos da Tabela 2-2, ou seja, calor total liberado máximo de 8 MJ/m<sup>2</sup> e pico de liberação de calor por unidade de área de 200 kW/m<sup>2</sup> no ensaio de 20, 10 e 5 minutos, respectivamente, além de não apresentar trincas na face oposta do material durante a fase de aquecimento [51][52].

**Tabela 2-2:** Classificação de Materiais no Japão [12].

Classe	Duração do ensaio [min]	Pico de HRR [kW/m <sup>2</sup> ]	THR [MJ/m <sup>2</sup> ]
Não combustível	20	200	8
Quase não combustível	10	200	8
Retardante de chamas	5	200	8

Na Europa, a classificação dos materiais de construção é denominada Sistema *Euroclass*. Este sistema é empregado através da avaliação das propriedades de inflamabilidade dos materiais mencionadas no presente capítulo, associada à ocorrência de partículas ou gotas em chamas. Para os materiais empregados no piso, são realizados os seguintes métodos de ensaios (sendo os dois primeiros apenas aplicados para classificar os materiais como incombustíveis) [53]:

- (i) EN ISO 1182 [54]: ensaio de não combustibilidade;
- (ii) EN ISO 1716 [55] : ensaio de potencial calorífico bruto;
- (iii) EN ISO 9239-1 [56]: ensaio do painel radiante;
- (iv) EN ISO 11925-2 [57]: ensaio de ignitabilidade.

Já para os demais materiais e elementos construtivos, são empregados os mesmos métodos, excetuando-se o EN ISO 9239-1 [56], que é substituído pelo EN 13823 [58]: ensaio do SBI (*single burning item*), considerado o principal ensaio da norma [51]. Destaca-se que se trata de um ensaio de escala real bem completo, pois permite avaliar:

- (i) a liberação de calor, através do FIGRA – Taxa de Desenvolvimento do Incêndio (que corresponde ao quociente máximo do  $\frac{PHRR(t)}{t}$ ) e do THR<sub>10min</sub>;
- (ii) a produção de fumaça, através do SMOGRA – Taxa de desenvolvimento de fumaça (correspondendo ao máximo do quociente de produção de fumaça do corpo de prova e o tempo de sua ocorrência) e do TSP<sub>600s</sub> - Produção total da fumaça do corpo de prova nos primeiros 10 minutos de exposição às chamas;
- (iii) a propagação de chamas, através do LFS – *Lateral Flame Spread* (propagação lateral de chama).

Segundo a norma europeia, a classificação possui três classes:

- (i) a classe principal que engloba sete níveis: A1, A2, B, C, D, E, F, sendo A1 os materiais incombustíveis e F os materiais não classificados;
- (ii) a classe relacionada à produção de fumaça que engloba três níveis: s1, s2 e s3, sendo s1 a melhor; e
- (iii) a classe relacionada à ocorrência de gota ou partículas em chamas que engloba três níveis: d0, d1 e d2, sendo d0 a melhor.

Um ponto que merece destaque na norma europeia é a previsão de um procedimento de classificação sem teste adicional, conhecido como CWFT – *Classification Without Further Testing*. Trata-se de uma classificação aprovada pelo Comitê Europeu Permanente de Construção, contendo uma lista de materiais com reação ao fogo estável e suas classes de inflamabilidade, como a apresentada na Tabela 2-3. Evitar ensaios desnecessários e facilidade na escolha dos materiais são vantagens apontadas no uso do CWFT [59][60].

**Tabela 2-3:** Classificação de inflamabilidade de painéis à base de madeira aprovados por comissão europeia do CWFT [61].

<b>Madeira industrializada</b>	<b>Norma de referência da madeira</b>	<b>Densidade mínima (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>	<b>Classe (exceto pisos)</b>	<b>Classe de pisos</b>
<i>Particleboards (painéis de partículas)</i>	EN 312	600	9	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
<i>Fibreboards (painéis de fibras)</i>	EN 622-2	900	6	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
<i>Fibreboards, Medium</i>	EN 622-3	600	9	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
		400	9	E, pass	E <sub>FL</sub>
<i>Fibreboards, Soft</i>	EN 622-4	250	9	E, pass	E <sub>FL</sub>
<i>Fibreboards, MDF</i>	EN 622-5	600	9	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
<i>Particleboard cimentado</i>	EN 634-2	1.000	10	B-s1, d0	B <sub>FL</sub> -s1
<i>OSB</i>	EN 300	600	9	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
<i>Plywood (madeira compensada)</i>	EN 636	400	9	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1
<i>Painéis de Madeira sólida</i>	EN 13353	400	12	D-s2, d0	D <sub>FL</sub> -s1

No Brasil, o marco na avaliação do desempenho de reação ao fogo dos materiais se deu com a Instrução Técnica nº 10 / 2004 do CBPMESP [62]. Inicialmente, tratou-se de uma classificação que abrangia apenas os ensaios de não combustibilidade, propagação das chamas e a produção de fumaça. Já em sua revisão, ocorrida em 2011, a norma paulista passou a diferenciar os ensaios empregados em materiais de forros e paredes (que permaneceram os mesmos) dos ensaios de piso, como pode ser verificado na Tabela 2-4 e na Tabela 2-5.

**Tabela 2-4:** Classificação dos materiais de revestimento de piso [63].

Método de ensaio		ISO 1182	NBR 8660	EN ISO 11925-2 (exposição = 15 s)	ASTM E 662
Classe					
<b>I</b>		Incombustível $\Delta T \leq 30^\circ\text{C}$ ; $\Delta m \leq 50\%$ ; $t_f \leq 10 \text{ s}$	-	-	-
	A	Combustível	Fluxo crítico $\geq 8,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $\leq 450$
<b>II</b>	B	Combustível	Fluxo crítico $\geq 8,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $> 450$
	A	Combustível	Fluxo crítico $\geq 4,5 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $\leq 450$
<b>III</b>	B	Combustível	Fluxo crítico $\geq 4,5 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $> 450$
	A	Combustível	Fluxo crítico $\geq 3,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $\leq 450$
<b>IV</b>	B	Combustível	Fluxo crítico $\geq 3,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $> 450$
	A	Combustível	Fluxo crítico $\geq 3,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $\leq 450$
<b>V</b>	B	Combustível	Fluxo crítico $\geq 3,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $> 450$
	A	Combustível	Fluxo crítico $\geq 3,0 \text{ kW/m}^2$	FS $\leq 150 \text{ mm}$ em 20 s	Dm $\leq 450$

**Notas:**

Fluxo crítico - Fluxo de energia radiante necessário à manutenção da frente da chama no corpo de prova.

FS - Tempo que a frente da chama leva para atingir a marca de 150 mm indicada na face do material ensaiado.

Dm - Densidade ótica específica máxima corrigida.

$\Delta t$  - Variação da temperatura no interior do forno.

$\Delta m$  - Variação da massa do corpo de prova.

$t_f$  - Tempo de flamejamento do corpo de prova.



**Tabela 2-5:** Classificação dos materiais exceto revestimento de piso [63].

Método de ensaio		ISO 1182	NBR 9442	ASTM E 662
Classe				
<b>I</b>		Incombustível $\Delta T \leq 30^{\circ}\text{C};$ $\Delta m \leq 50\%;$ $t_f \leq 10 \text{ s}$	-	-
	<b>II</b>			
	A	Combustível	$I_p \leq 25$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível	$I_p \leq 25$	$D_m > 450$
<b>III</b>	A	Combustível	$25 < I_p \leq 75$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível	$25 < I_p \leq 75$	$D_m > 450$
<b>IV</b>	A	Combustível	$75 < I_p \leq 150$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível	$75 < I_p \leq 150$	$D_m > 450$
<b>V</b>	A	Combustível	$150 < I_p \leq 400$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível	$150 < I_p \leq 400$	$D_m > 450$
<b>VI</b>		Combustível	$I_p > 400$	-

**Notas:**

$I_p$  - Índice de propagação superficial de chama.

$D_m$  - Densidade óptica específica máxima.

$\Delta t$  - Variação da temperatura no interior do forno.

$\Delta m$  - Variação da massa do corpo de prova.

$t_f$  - Tempo de flamejamento do corpo de prova.

Por terem sido os precursores do tema no Brasil, muitos estados seguiram o padrão de classificação de reação ao fogo dos materiais adotada por São Paulo. Tal tendência foi ratificada quando a Norma Brasileira de Desempenho, publicada pela primeira vez em 2013, que seguiu a mesma classificação estabelecida na Instrução Técnica nº 10 / 2011 [63].

Desta forma, a classificação de reação ao fogo dos materiais no Brasil (exceto revestimentos de piso), em regra, não avalia parâmetros relacionados à liberação do calor, ficando restrita a avaliar (i) se o material é classificado como não combustível, através da ISO 1182 [54] (ensaio de não combustibilidade), (ii) a propagação de chamas, através da NBR 9442 [64] (determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante) e (iii) a produção de fumaça, através da ASTM E 662 [65] (ensaio para densidade óptica específica de fumaça para sólidos). Somente na impossibilidade da aplicação do método de ensaio da NBR 9442 [64] é que a classificação engloba as quatro

propriedades apresentadas no presente capítulo, sendo classificado através dos métodos de ensaio EN 13823 [58] e EN 11925-2 [57] (os mesmos previstos na *Euroclass*).

## 2.4 RETARDANTES DE CHAMA

Os retardantes de chamas são substâncias químicas aplicadas aos materiais para reduzir sua inflamabilidade por interferir na química e/ou física do processo de pirólise e combustão. Tal interferência tem, em sua essência, a função de excluir uma das faces do chamado tetraedro do fogo, ou seja, o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia [3].

Os principais mecanismos de ação física dos retardantes de chama são [3][66]:

- (i) o resfriamento: através da promoção de processos endotérmicos que resfriam a superfície do material abaixo da temperatura suficiente para que a pirólise ocorra;
- (ii) a diluição: através da liberação de gases e vapores inertes para a zona de decomposição que resulta na redução da concentração de oxigênio na superfície do material;
- (iii) a formação da camada protetora que apresenta duas funções principais:
  - a redução da transferência de calor radiante da chama para a superfície do material, implicando numa redução da taxa de pirólise;
  - a redução do escape de gases e vapores combustíveis da zona de pirólise para a fase gasosa, inibindo a reação de combustão.

Por outro lado, os principais mecanismos de ação químicos são [3][66]:

- (i) inibição de reações de oxidação: através da reação de radicais liberados pelos retardantes de chamas com radicais livres (especialmente  $H\bullet$  e  $OH\bullet$ ) na fase gasosa, dificultando a reação em cadeia que propaga a combustão do combustível ( $H\bullet + O_2 \rightarrow OH\bullet + O\bullet$ ) e libera a hidroxila que é a reação de decomposição mais exotérmica ( $OH\bullet + CO \rightarrow H\bullet + CO_2$ ), responsável pela maior parte da energia necessária para a preservação das chamas;

- (ii) formação de uma camada carbonácea na superfície do material: através da promoção de reações de baixa energia no combustível que levam a um aumento da formação da camada de carbono em relação à zona de pirólise. Esta barreira física entre a zona de pirólise e a zona de decomposição age da mesma forma que uma camada protetora.

Em virtude das pesquisas que apontam para características tóxicas de compostos à base de halogêneos associadas à restrição do seu uso em determinados países, os retardantes são divididos em compostos à base de halogenados e compostos livres de halogêneos. O principal mecanismo de ação dos compostos halogenados está na captura dos radicais livres e na decorrente quebra da reação em cadeia. Já os retardantes de chamas não halogenados apresentam seis subgrupos, cada um deles apresentando mecanismos específicos de ação [3]:

- (i) compostos à base de fósforo;
- (ii) compostos à base de nitrogênio;
- (iii) retardantes de chamas minerais (hidróxidos metálicos e boro);
- (iv) sistemas intumescentes;
- (v) aditivos à base de silicone; e
- (vi) nanopartículas.

Cumprir destacar dois pontos. Primeiramente, que os sistemas intumescentes, apesar de geralmente conter fósforo e nitrogênio em sua formulação, possuem outros componentes que lhe conferem mecanismos de pirólise e combustão diferenciados aos materiais, merecendo, portanto, classificação especial. O segundo ponto está no fato de que combinar retardantes de chama pode produzir efeitos complementares e até mesmo sinérgicos na redução da inflamabilidade dos materiais [66].

O consumo de retardantes de chamas no mundo é dividido em cinco aplicações: (i) plásticos, (ii) borracha, (iii) têxteis, (iv) colas e (v) madeiras [67]. Por ser objeto do presente estudo, a aplicação em madeiras será detalhada no item a seguir.

### 2.4.1 Retardantes de chamas para madeiras

A aplicação do retardante de chamas em madeiras pode ser realizada em quatro modos: (i) impregnando toda a madeira com o retardante de chama, (ii) misturando o retardante de chamas à mistura adesiva (cola), (iii) misturando o retardante de chamas nas partículas de madeira antes do processo de colagem e (iv) aplicando o retardante de chamas na superfície do produto [48]. Há compósitos à base de madeira que já saem de fábrica tratados com retardantes de chama e se enquadram como uma *fire retardant-treated wood FRT Wood* [68]. Entretanto, em se tratando madeiras naturais, apenas o primeiro e o quarto modo são viáveis, ou seja, o tratamento por impregnação e por aplicação superficial.

O tratamento por impregnação consiste na injeção do retardante sob diferentes condições de pressão, podendo ser por pressão (geralmente adotada para peças espessas de madeira) ou por imersão (empregada em peças finas) [68]. Sua principal vantagem em relação à aplicação superficial está no fato de que, como o retardante estará no interior do material, mesmo após a destruição da sua camada superficial, permanecerá em seu interior.

Já o tratamento por aplicação superficial consiste na aplicação do retardante na superfície do material através de pincéis, rolos ou sprays (pulverização), sendo a forma mais simples e econômica de aplicação. Entretanto, ela apresenta pontos negativos, como a possibilidade da formação de trincas na camada superficial do retardante de chamas e a suscetibilidade à abrasão, que podem resultar numa piora da reação ao fogo do produto tratado [10]. Além disso, apesar desta forma de aplicação servir para melhorar propriedades de reação ao fogo inerentes à superfície das madeiras, em regra, uma madeira tratada superficialmente com retardante de chamas não atende às características de uma *FRT Wood* preconizadas na NFPA 703 [9].

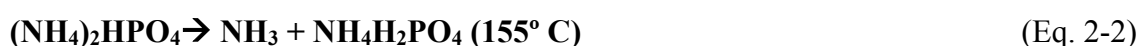
A aplicação superficial de retardantes se apresenta através de produtos intumescentes e não intumescentes. Os intumescentes são aqueles que formam uma camada de carbonácea expandida de baixa densidade sobre a madeira quando exposta ao fogo, isolando a superfície do material das altas temperaturas. Os agentes intumescentes incluem um agente desidratante (como o fosfato poliamônico), um formador de camada carbonácea (como amido e glicose) e um agente de expansão (como uréia, melamina e parafinas cloradas). Já os produtos não intumescentes se apresentam, sobretudo, através de sais

solúveis em água, como fosfatos de monoamônio (*MAP*), fosfatos de diamônio (*DAP*), sulfato de amônio e borato de sódio (bórax) [9].

Os compostos à base de fósforo representaram 20% do percentual de consumo total de retardantes na Europa em 2006 [69]. Há uma série de retardantes de chamas à base de fósforo, em virtude de seus estados de oxidação e do decorrente número elevado de estruturas que podem se unir a ele.

Nas madeiras, os retardantes de chamas à base de fósforo são empregados, sobretudo, na forma inorgânica, cujo principal mecanismo de ação está na formação da camada protetora, ou seja, na fase condensada. Nesta fase, a decomposição destes compostos inorgânicos, libera ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) que reage com grupos de hidroxila reativos da madeira, sobretudo da lignina, catalisando a formação da camada carbonácea [70]. Esta reação resulta na liberação de vapor d'água e pirofosfato que agem, de modo secundário, por diluição, reduzindo a concentração de vapores combustíveis na fase gasosa [66].

Os compostos retardantes de chamas à base de fósforos aplicados em madeiras geralmente são combinados a grupos nitrogenados, em virtude da sinergia evidenciada na retardância das chamas [39]. Esta sinergia pode ser explicada, em parte, pelo aumento da diluição na fase gasosa, devido à liberação do gás amônio na reação de decomposição térmica do fosfato de diamônio (*DAP*) abaixo [14].



Dentre os compostos combinados, o *MAP* e o *DAP* são comumente empregados para tratamento de madeiras [9][10]. No entanto, verificou-se que suas aplicações aumentam a umidade da madeira, o que pode concorrer para o ataque de micro-organismos e, conseqüentemente, no apodrecimento das madeiras [5][6]. Além disso, sua decomposição leva ao aumento na produção de fumaça, aumento da concentração de monóxido de

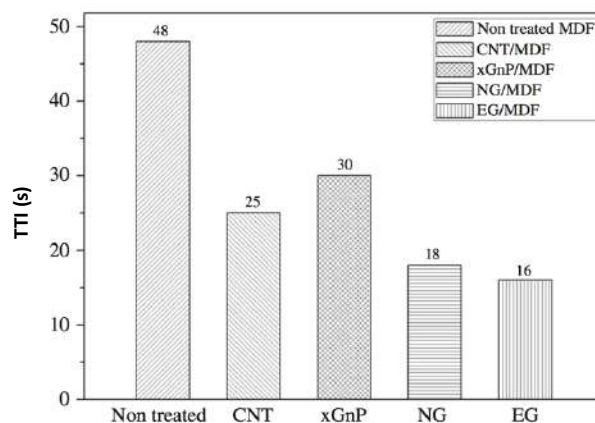
carbono e redução no dióxido de carbono [10]. Outro problema encontrado foi a redução da resistência da madeira após tratamento quando exposta ao calor solar [14].

É reconhecida a eficiência dos retardantes de chamas à base de compostos halogenados na retardância à chama em madeiras. No entanto, verificou-se que os halogêneos, ao serem decompostos, liberam uma série de produtos corrosivos e tóxicos [71], tendo o uso dos bromados, inclusive, sido restrito na União Europeia [72].

#### **2.4.2 Avaliação da retardância à chama em madeiras**

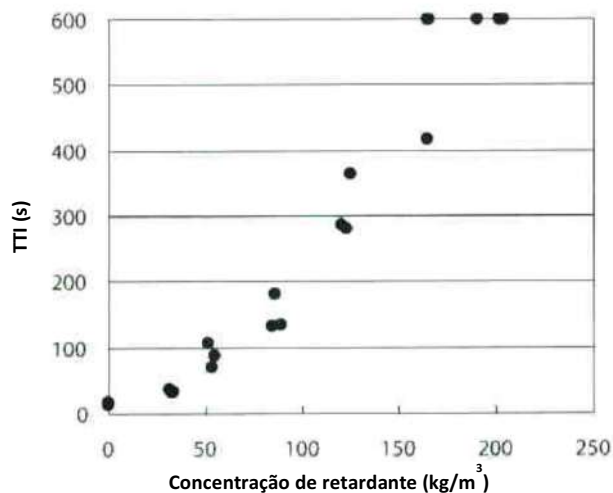
Para avaliar a variação da inflamabilidade das madeiras tratadas têm se destacado a comparação de parâmetros de tempo de ignição, taxa de liberação do calor e calor total liberado, através do cone calorímetro [5][6][21][48]. Quanto ao uso do equipamento fio incandescente, verificou-se que os ensaios do GWIT (temperatura de ignição *glow-wire*) e do GWIF (índice de inflamabilidade *glow-wire*) têm sido empregados para avaliação da retardância à chama em polímeros [73][74], entretanto, não foram encontrados estudos específicos para madeiras. Em relação à avaliação da retardância à chama por meio de ensaios no equipamento cone calorímetro, alguns estudos foram encontrados na literatura e serão descritos a seguir.

Abordando inicialmente o tempo de ignição, o tratamento por aplicação superficial de formulações à base de carbono (CNT, xGnP, NG e EG) no MDF implicou numa redução no TTI, como demonstrado na Figura 2-9 [75]. Outrossim, estudo envolvendo madeira compensada de *E. dunnii* tratada com retardante de chamas à base de fósforo e nitrogênio por impregnação constatou redução no TTI em 8,69% [5].



**Figura 2-9:** TTI do MDF não tratado (*non treated*) e dos tratados superficialmente com retardante de chama à base de carbono [75].

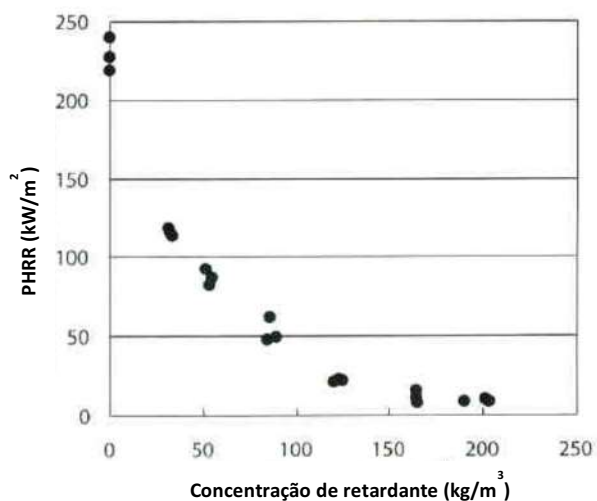
Em contrapartida, a aplicação por impregnação de retardante à base de fósforo no *Pinus radiata* implicou num aumento de 29,59% no TTI [6]. Ademais, estudo envolvendo o tratamento do *Pinus desinflora* com formulação contendo carbamato polifosfórico, identificou que o percentual de redução do TTI foi crescente em relação à concentração do retardante, como pode ser observado na Figura 2-10 [76].



**Figura 2-10:** Concentração do retardante contendo carbamato polifosfórico impregnada no *Pinus desinflora* versus TTI [76].

No que tange às propriedades relacionadas à liberação de calor, Marney *et al.* [6] identificaram uma redução do PHRR<sub>1</sub> do *Pinus radiata* em 26,38% através da impregnação de retardante à base de fósforo. Na mesma linha, Harada *et al.* [76]

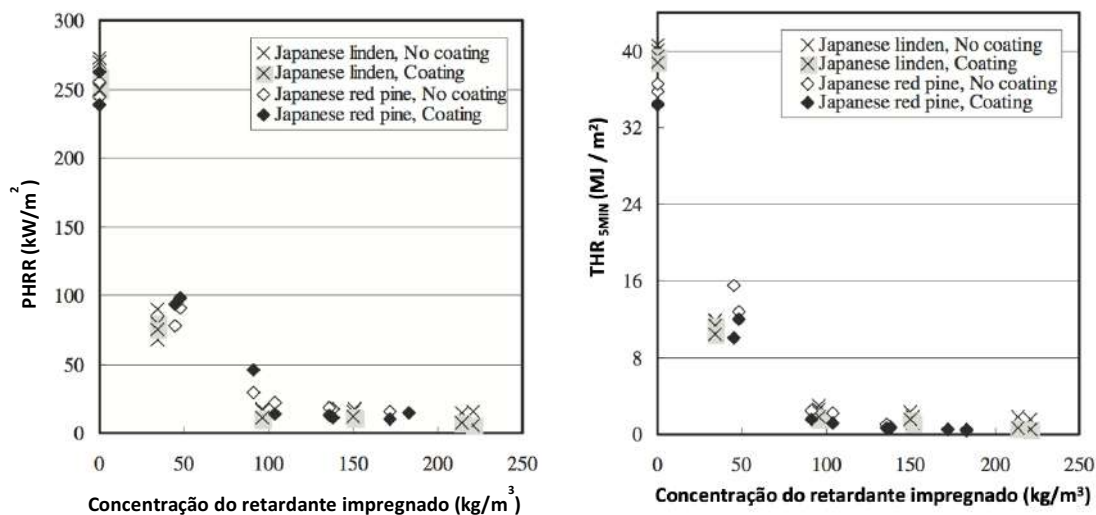
registraram porcentagem de redução do PHRR crescente em relação à concentração de retardante impregnado no *Pinus desinflora*, conforme Figura 2-11.



**Figura 2-11:** Concentração do retardante à base de polifosfato de carbamato impregnada no *Pinus desinflora* versus PHRR [76].

Corroborando Harada *et al.* [76], os resultados do estudo dos efeitos sinérgicos da impregnação do retardante contendo carbamato polifosfórico e a aplicação superficial de retardante cerâmico (*coating*) no *Pinus desinflora* (*Japanese Red Pine* - dicotiledônea) e na *Tilia japonica* (*Japanese linden* - conífera) revelaram que (i) a impregnação promoveu redução impactante do PHRR e do  $THR_{5min}$  e (ii) a aplicação superficial (*coating*) implicou em redução insignificante do PHRR e do  $THR_{5min}$  das madeiras ensaiadas, tudo conforme Figura 2-12(a) e na Figura 2-12(b) [52]. Ademais, pode-se afirmar que as madeiras tratadas por impregnação com retardante em concentrações superiores a 100 kg/m<sup>3</sup> se enquadraram como um material retardante de chamas, nos termos da BSL do Japão [51].



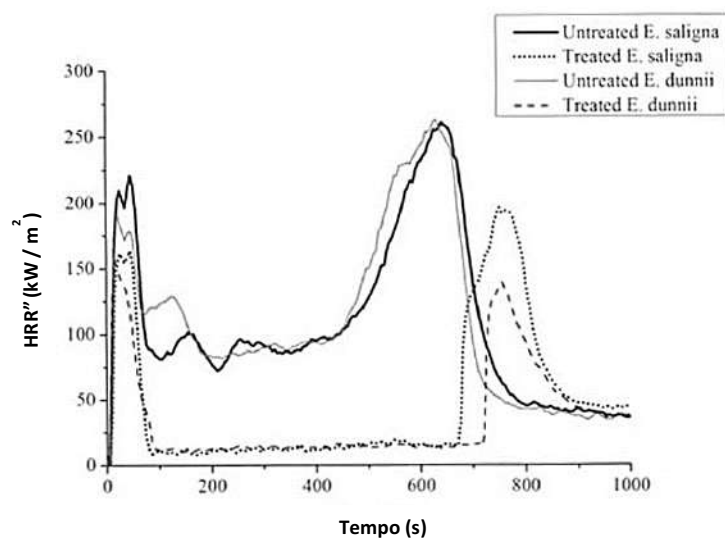


**Figura 2-12:** Avaliação dos efeitos sinérgicos da impregnação de retardante de chamas à base de fósforo com a aplicação superficial de retardante de chama cerâmico no *Japanese Linden* e no *Japanese Red Pine*: (a) PHRR, (b) THR<sub>5min</sub> [52].

A aplicação por impregnação de retardante de chamas à base de fósforo e nitrogênio em madeira compensada de *E. dunnii* promoveu as seguintes alterações nos parâmetros relacionados à liberação de calor e perda de massa [5]:

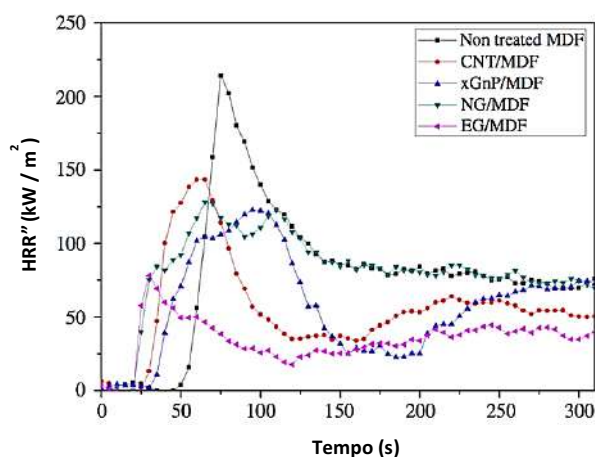
- (i) redução de 51,02% no PHRR<sub>1</sub> e de 84,83% no PHRR<sub>2</sub>;
- (ii) redução de 264% no THR<sub>5min</sub> e de 463,3% no THR<sub>10min</sub>;
- (iii) redução de 28,88% da MLR;
- (iv) redução de 180% no TPHRR<sub>1</sub> e aumento de 20,33% no TPHRR<sub>2</sub>.

As alterações nas propriedades de reação ao fogo mencionadas no parágrafo anterior são destacadas graficamente através da Figura 2-13.



**Figura 2-13:** Curva de liberação de calor observada no estudo [5].

Rocha [13], ao determinar propriedades de reação ao fogo do MDF não tratado com teor de umidade 0%, identificou ignição e média de PHRR'' de 148,37 kW/m<sup>2</sup>. Comportamento semelhante foi observado no MDF não tratado (*non treated MDF*) por Seo *et al.* [75], além da redução do pico de liberação de calor através da aplicação superficial de retardante de chamas à base de carbono, conforme Figura 2-14.



**Figura 2-14:** Curva de liberação de calor do MDF não tratado (*non treated*) e dos tratados superficialmente com retardantes de chama à base de carbono [75].

Por fim, pesquisa envolvendo diferentes madeiras (*albizia*, *gmelina* e *hinoki*) tratadas superficialmente com retardantes à base de fósforo reportou redução do MLR e prolongação no tempo necessário para atingir o secundo pico de perda de massa [21].

# 3

## ***METODOLOGIA DE ANÁLISE EXPERIMENTAL***

---

A ignitabilidade e a liberação de calor das amostras de madeira tratadas superficialmente com retardante de chamas à base de fósforo são medidas através de parâmetros do cone calorímetro por perda de massa (CCPM) e do fio incandescente.

As madeiras escolhidas para os ensaios foram o *Eucalyptus dunnii*, o *Pinus elliottii* e o MDF. Tal decisão se deu por dois motivos:

- (i) por representarem, respectivamente, uma espécie de madeira natural do tipo dicotiledônea, uma madeira natural do tipo conífera e uma madeira industrializada; e
- (ii) por serem madeiras comumente empregadas no mercado brasileiro como material de acabamento e mobiliário (como evidenciado no item 2.1).

Nos itens abaixo, são apresentados, primeiramente, o processo de aquisição e corte das amostras, bem como o método de aplicação do retardante de chamas e o acondicionamento das amostras. Em seguida, são apresentados os equipamentos, a calibração e os procedimentos de ensaio.

### **3.1 DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

Dentre as madeiras naturais, o *Eucalyptus dunnii* foi gentilmente cedido pela Embrapa – Setor Florestas. Este material foi obtido a partir de exemplares com idade aproximada de 17 anos e foi transportado em toretes de 100 centímetros de comprimento. Já o *Pinus elliottii*, foi comprado em madeireira da Região Oceânica de Niterói. A madeira sintética, por sua vez, foi comprada em madeireira do Centro de Niterói. Tratou-se de uma placa de 200 mm x 200 mm x 9 mm de MDF cru.

As amostras de *Eucalyptus dunnii* foram cortadas transversalmente no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, através de serras circulares de bancada, nas dimensões de  $100 \pm 3$  mm x  $100 \pm 3$  mm com espessura de  $10 \pm 1$  mm. As amostras de *Pinus elliottii* foram cortadas nas dimensões de  $100 \pm 3$  mm x  $100 \pm 3$  mm com espessura de  $9 \pm 1$  mm. Já a amostra de madeira sintética, foi cortada na dimensão de  $100 \pm 3$  mm x  $100 \pm 3$  mm com espessura de  $9 \pm 0,2$  mm (de fábrica). Tais dimensões seguem as recomendações da norma que regula o ensaio do CCPM [77].

Para o fio incandescente, as amostras de madeira descritas acima, incluindo as já tratadas com retardante de chamas, foram novamente cortadas nas dimensões de 100 mm x 65 mm, atendendo, na largura e comprimento, o preconizado na norma que regula o ensaio da temperatura de ignição *glow-wire* (GWIT) [78]. A espessura de 3,0 mm, maior espessura preferida pela norma, não pode ser atendida em virtude do risco e da dificuldade de se cortar, numa mesa de serra circular, madeira em espessura tão fina. No entanto, tal fato não inviabilizou os ensaios tampouco prejudicou os resultados, pois, além da espessura ser apenas uma “preferência” da norma, nosso estudo tem o caráter comparativo entre amostras que possuem as mesmas configurações.

Quanto ao acondicionamento antes do tratamento com retardante de chamas, todas as amostras permaneceram, ao menos trinta dias, em local submetido às mesmas condições ambientais: em local seco no interior de sala laboratorial, com umidade natural e isento de luz natural.

### **3.1.1 Tratamento dos corpos de prova com retardante de chamas**

Os corpos de prova foram tratados com o retardante de chamas: Retardante Antichamas CKC-2020 comprados da empresa CKC (ilustrados na Figura 3-1). De acordo com catálogo [79], trata-se de um retardante para madeira crua composto por sais, fósforo e água. Tentou-se maiores detalhes acerca da composição química do retardante junto ao fabricante, entretanto, o mesmo não os forneceu. Sendo assim, o mesmo foi classificado simplesmente como um retardante à base de fósforo. Contudo, como citado no item 2.4, é incomum empregar um retardante com essa formulação isoladamente, em virtude dos positivos efeitos sinérgicos evidenciados quando há outras bases em sua formulação.



**Figura 3-1:** Retardante de chamas CKC-2020.

De acordo com a CKC [79], o aludido produto foi testado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), de acordo com os seguintes métodos de ensaio:

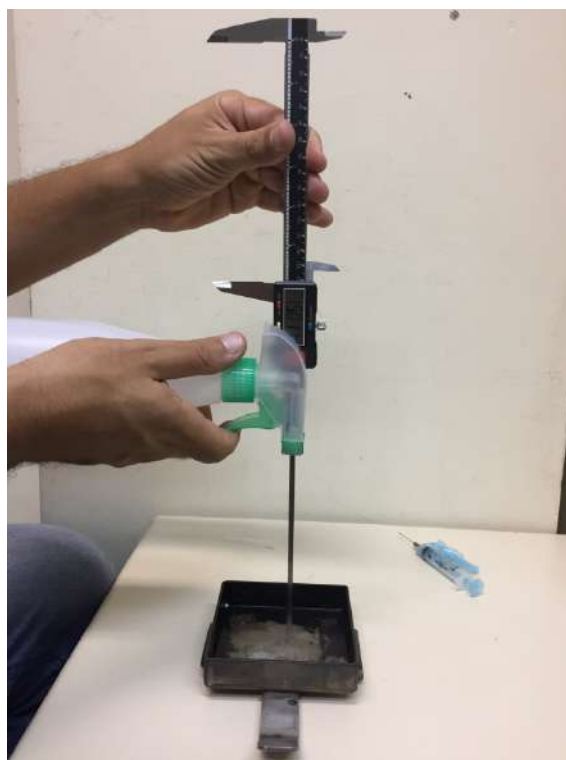
- (i) NBR 9442 [64], tendo obtido a classificação “A” (a melhor classe) no teste de propagação de chamas, ou seja, índice de propagação superficial de chamas inferior a 25;
- (ii) NBR 8660 [80], tendo obtido fluxo crítico maior ou igual a 8,0 kW/m<sup>2</sup>; e
- (iii) ASTM E 662 [65], tendo obtido densidade específica óptica máxima inferior a 450.

De acordo com a IT 10/2011 do CBPMESP, tais resultados enquadram a madeira crua ensaiada e tratada com o produto, quando empregada como material de acabamento e revestimento de paredes, tetos e coberturas, como material Classe II A (que é a melhor classe dos materiais combustíveis). Já quando o material é empregado como revestimento de piso, não é possível classificá-lo, em virtude da ausência do ensaio preconizado na EN ISO 11925-2 [57].

Cumprir destacar que foram solicitados, através de e-mail ao diretor comercial da empresa, os relatórios dos ensaios das madeiras tratadas, a fim de se obter informações relevantes para a análise dos resultados obtidos, como o método de aplicação do

retardante e o tipo de madeira empregada no ensaio. No entanto, os mesmos não foram fornecidos.

O método de aplicação do produto seguiu as recomendações do fabricante, *i. e.*, adotou-se a aplicação superficial. As amostras foram, inicialmente, limpas com um pano seco e isento de quaisquer produtos químicos. Para garantir o correto rendimento preconizado pelo fabricante, foi mensurado, através de uma seringa, o volume de retardante expelido por borrifada, no modo “jato neblinado”, pelo pulverizador manual da marca Guarany no interior de um recipiente medindo 100 mm x 100 mm, a uma altura de 150 mm (altura que garantia que o líquido fosse projetado em toda área superficial do recipiente), como apresentado na Figura 3-2. Desta forma, verificou-se que quatro borrifadas atendiam aos 150 ml/m<sup>2</sup> por demão, preconizados pelo fabricante do retardante de chamas.



**Figura 3-2:** Mensuração do volume expelido por borrifada do pulverizador manual.

O fabricante foi questionado sobre a necessidade de aplicação nas duas faces da amostra, tendo informado que poderia ser feita em uma face apenas. Optou-se pela aplicação em uma das faces, por representar a condição considerada mais usual, ou seja, do material de acabamento já fixado ao elemento construtivo. Desta forma, as amostras foram submetidas a uma primeira demão de 1,5 ml de retardante por face através do uso de um

pulverizador manual, como ilustrado na Figura 3-3.



**Figura 3-3:** Tratamento superficial com retardante de chamas

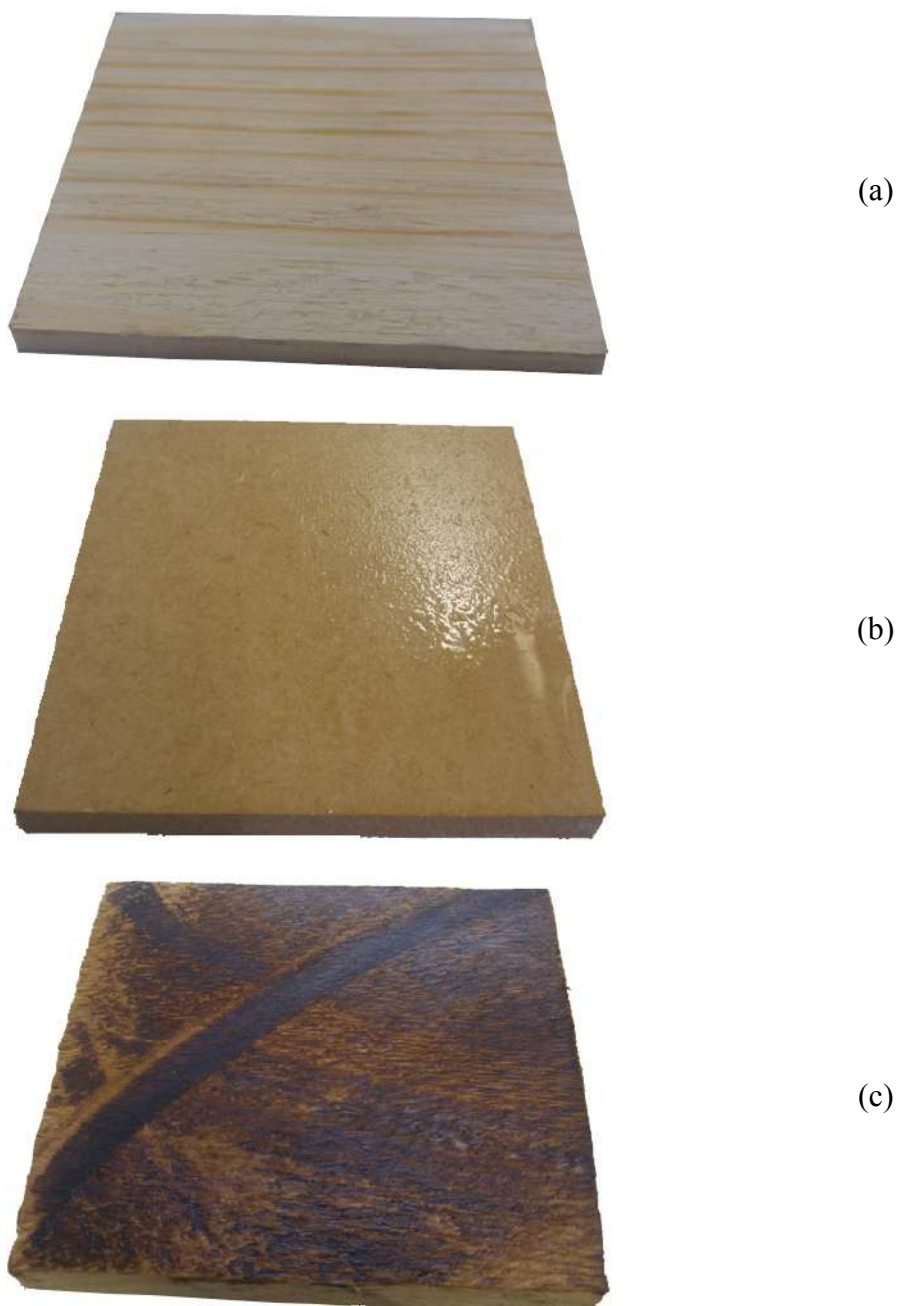
Após o tempo mínimo de uma hora, aplicou-se uma segunda demão de retardante de chamas nas amostras. A partir deste momento, elas foram acondicionadas em sala com umidade natural para o período de cura, que atendeu, para todos os ensaios, o tempo mínimo de 72 horas previsto no catálogo do fabricante, como pode ser observado na Figura 3-4.



**Figura 3-4:** Segunda demão do tratamento com o retardante de chamas.

Cabe destacar que, como pode ser observado na Figura 3-5(a), Figura 3-5(b) e Figura 3-5(c) registradas vinte minutos após a aplicação do retardante, o maior volume de retardante de chama permeado no material era do *Pinus elliottii* enquanto o MDF apresentava o maior percentual de líquido em sua superfície.





**Figura 3-5:** Fotografias registradas vinte minutos após a aplicação superficial do retardante de chamas: (a) *Pinus elliottii*; (b) MDF; (c) *Eucalyptus dunnii*.

### 3.1.2 Codificação e propriedades físicas dos corpos de prova

Para facilitar o entendimento dos resultados, adotou-se um código alfanumérico para identificação das amostras. As três primeiras letras representam o tipo de madeira, sendo: EUC para o *Eucalyptus dunnii*, PIN para o *Pinus elliottii* e MDF para o MDF. A quarta será um N ou um R, sendo o R para as amostras tratadas superficialmente com o retardante

de chamas e o N para as amostras não tratadas. Por fim, segue um algarismo que representa o número da amostra. No total, temos 06 (seis) materiais, ora apresentados na Tabela 3-1.

**Tabela 3-1:** Variações dos materiais.

CP	Madeira	Retardante
EUCN-	<i>Eucalyptus dunnii</i>	-
EUCR-	<i>Eucalyptus dunnii</i>	fosforado
PINN-	<i>Pinus elliottii</i>	-
PINR-	<i>Pinus elliottii</i>	fosforado
MDFN-	MDF	-
MDFR-	MDF	fosforado

As dimensões dos corpos de prova foram aferidas através do uso de um paquímetro digital, enquanto sua massa foi aferida através de uma balança digital, como poder ser verificado através das Figura 3-6 (a) e (b), respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 3-6:** Instrumentos de medição empregados: (a) paquímetro digital; (b) balança eletrônica.

**Por fim, as propriedades físicas dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 3-2.**

**Tabela 3-2: Propriedades físicas das amostras.**

<b>Material</b>	<b>CP</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Área Superf. (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
EUCN	1	82,3	10,9	94,8	0,80
	2	61,5	9,2	95,4	0,70
	3	72,3	9,2	94,6	0,83
	4	71,0	9,9	95,8	0,75
	Média	71,8	9,8	95,2	0,77
EUCR	1	69,6	9,1	95,7	0,80
	2	65,1	9,0	95,5	0,76
	3	77,0	10,9	96,3	0,73
	4	74,6	9,8	96,1	0,79
	Média	71,6	9,7	95,9	0,77
PINN	1	35,0	8,4	99,5	0,42
	2	37,7	8,4	98,1	0,46
	3	38,9	8,5	97,1	0,47
	4	39,2	8,2	96,8	0,49
	Média	37,7	8,4	97,9	0,46
PINR	1	37,2	8,4	98,7	0,45
	2	43,0	8,6	96,2	0,52
	3	38,8	8,7	96,0	0,47
	Média	39,7	8,6	97,0	0,48
MDFN	1	67,7	9,2	100,0	0,74
	2	67,8	9,2	100,0	0,74
	3	67,5	9,2	99,7	0,74
	4	67,7	9,2	99,8	0,74
	Média	67,7	9,2	99,9	0,74
MDFR	1	68,9	9,2	99,3	0,75
	2	67,8	9,2	99,2	0,74
	3	68,4	9,2	99,3	0,75
	4	67,7	9,2	99,6	0,74
	Média	68,2	9,2	99,4	0,75

### 3.2 CONE CALORÍMETRO DE PERDA DE MASSA - CCPM

O cone calorímetro é o equipamento mais empregado no mundo para avaliar a liberação do calor dos materiais. Além da liberação de calor, o cone calorímetro é capaz de mensurar a perda de massa, propriedades relacionadas à ignitabilidade (como o tempo de ignição) e, alguns modelos, até mesmo a produção de fumaça.

Trata-se de um equipamento para ensaios de bancada capaz de representar, de maneira bem satisfatória, a reação ao fogo em escala real de diversos materiais [4]. Outros autores consideram que a principal vantagem do equipamento está no fato dele prever o comportamento dos incêndios em diferentes fases, seja na incipiente, de desenvolvimento e de desenvolvimento generalizado, através do TTI, do HRR e do THR, respectivamente [3]. Dentre tais parâmetros, o pico de liberação de calor (PHRR) é o resultado mais usado do equipamento [81].

Os dados do cone calorímetro também podem ser empregados para prever, através de modelos matemáticos, os resultados de ensaios de escala real, como o SBI, o *Room/Corner Test* e o Ensaio do Túnel de Steiner, que avalia a propagação de chamas e a liberação de fumaça [82][83].

Há dois tipos de cone calorímetro: (i) o cone calorímetro por consumo de oxigênio - CCCO e (ii) o cone calorímetro por perda de massa (CCPM). O primeiro calcula o HRR através da taxa de consumo de oxigênio, relacionando-a com o calor de combustão da amostra, *i. e.*, com o calor total liberado na combustão completa do material [84][85][86]. Os métodos de calibração e ensaio do CCCO seguem, em regra, o preconizado na ASTM E1354-11B [87] e na ISO 5660-1 [88]. Além disso, através da taxa de consumo de oxigênio, também é possível quantificar a produção de fumaça.

Já o CPPM adota uma metodologia diferente para calcular o HRR. Este equipamento possui uma coluna com termopilhas (como apresentado na Figura 3-7 (a)). As termopilhas fornecem como saída valores em mV que são convertidos em HRR (kW) através de uma curva de calibração, que é obtida da através do procedimento apresentado no item 3.2.1[6].

As termopilhas capturam apenas uma fração do calor, principalmente aquele transferido por convecção pela fumaça, enquanto outra parte se perde para o entorno por irradiação.

Desta forma, o HRR medido pelo método da termopilha (CCPM) é menor que o medido pelo consumo de oxigênio (CCCO). Entretanto, como evidenciado na Seção X4 da ASTM E2102-08, os dados de HRR, a um fluxo de calor de 50 kW/m<sup>2</sup>, obtidos através do CCPM apresentaram correlação positiva com os obtidos através do CCCO. Além disso, no presente estudo, os resultados são empregados para fins comparativos. Portanto, fica evidente que o uso do CCPM não prejudicará as análises e conclusões da presente pesquisa [77].

Através do CCPM é possível quantificar parâmetros relacionados à liberação do calor, como: (i) o calor total liberado (*Total Heat Release – THR*), (ii) a taxa de liberação de calor por unidade de área (*Heat Release Rate - HRR*), à perda de massa, como (i) a taxa de perda de massa (*Mass Loss Rate – MLR*) e (iii) o total de massa perdida (*Total Mass Loss – TML*), e à ignitabilidade, como (i) o tempo de ignição (*Time to Ignition- TTI*) e o tempo de combustão (*Time of Combustion – TOC*).

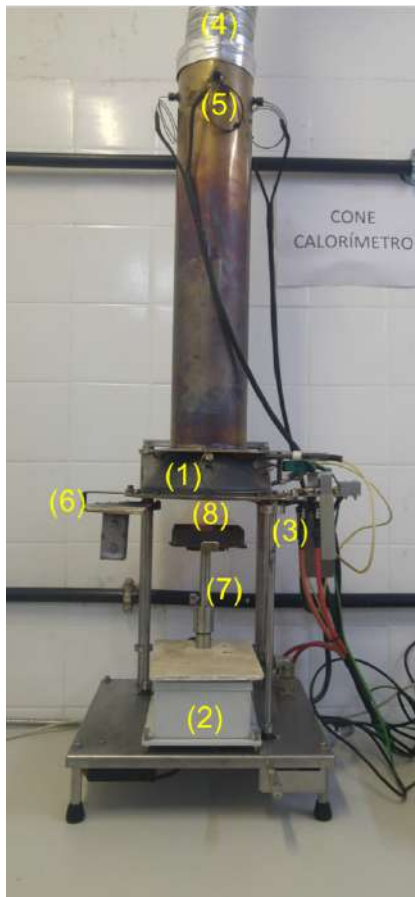
O equipamento é composto pelo conjunto do cone e pela unidade de controle [13]. O conjunto do cone é constituído pelos seguintes componentes, como pode ser evidenciado na Figura 3-7(a):

- (1) aquecedor cônico,
- (2) célula de carga,
- (3) piloto (vela de ignição),
- (4) tubo flexível para exaustão de fumaça,
- (5) termopares de controle de temperatura,
- (6) mecanismo de isolamento de calor,
- (7) suporte de montagem ajustável para amostras horizontais,
- (8) suporte para amostra (área interna de 106 mm x 106 mm e profundidade de 25 mm).

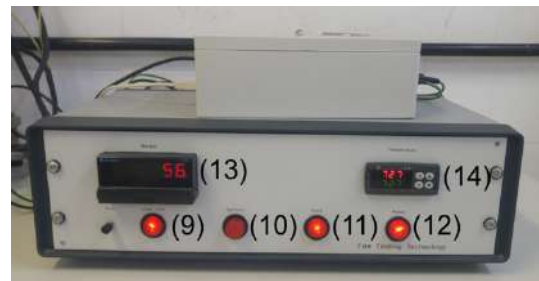
Já a unidade de controle é composta por, conforme Figura 3-7(b):

- (9) interruptor da célula de carga,
- (10) interruptor da vela de ignição,
- (11) interruptor do aquecedor cônico,
- (12) interruptor da unidade de controle

- (13) controlador da célula de carga com leitura digital e tara eletrônica,
- (14) controlador de temperatura com leitura digital.



(a)



(b)

**Figura 3-7:** Cone Calorímetro utilizado nos ensaios: (a) conjunto do cone; (b) unidade de controle.

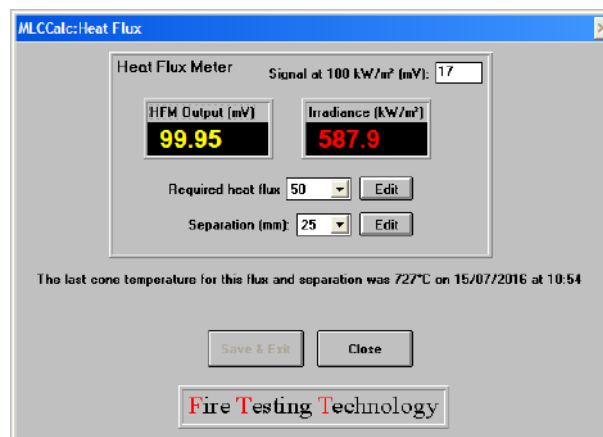
A unidade de controle possui um cabo USB que permite a transferência dos dados para outros dispositivos. O equipamento é acompanhado de um CD-ROM contendo o software da *Fire Testing Technology* (FTT) chamado MLCCalc. Através deste software é possível visualizar e tratar os dados do equipamento, bem como efetuar sua calibração.

O método de calibração e ensaio do CCPM segue o preconizado na ASTM E2102-08 [77], onde o procedimento para medição da liberação de calor encontra-se em seu anexo 2.

### 3.2.1 Calibração do equipamento

A calibração do equipamento englobou: (i) a calibração do medidor de fluxo de calor, (ii) a calibração das termopilhas e (iii) a calibração do sistema de medida de massa.

A calibração do medidor do fluxo de calor consistiu, inicialmente, na colocação do medidor de fluxo de calor na separação de 25 mm seguida da abertura do módulo *Heat Flux* no software MLCCalc. Dando prosseguimento, aumentou-se a temperatura do aquecedor cônico até que a saída estável de 50 kW/m<sup>2</sup> (fluxo adotado) fosse observada no software (Figura 3-8). Para finalizar a calibração, a temperatura de 727° C (que corresponde à temperatura que irradia o fluxo de calor de 50 kW/m<sup>2</sup> no material posicionado a 25 mm do aquecedor cônico) foi registrada e salva.



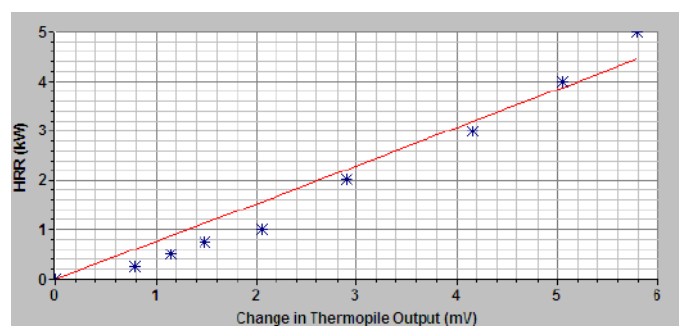
**Figura 3-8:** Tela do módulo de calibração da célula de carga do MLCCalc.

A calibração das termopilhas foi realizada para o fluxo de calor escolhido (50 kW/m<sup>2</sup>). Para tanto, o fluxímetro (1) teve seu registro aberto, permitindo o fluxo de metano a 99% de pureza pelo queimador de calibração (2), sendo, em seguida, ignitado pela faísca da vela de ignição (Figura 3-9).



**Figura 3-9:** Procedimento de calibração da termopilha.

Considerando o poder calorífico conhecido do metano (50 MJ/kg) e a decorrente relação que a taxa de liberação de calor de 1,67 l/min do gás é aproximadamente 1 kW, os dados de saída da termopilha foram gravados no MLCCalc para fluxos correspondentes a 5, 4, 3, 2, 1, 0,75, 0,5 e 0,25 quilowatts. Desta forma, o software construiu um gráfico correlacionando os dados de saída da termopilha com o calor liberado, ora chamada de curva de calibração (Figura 3-10).

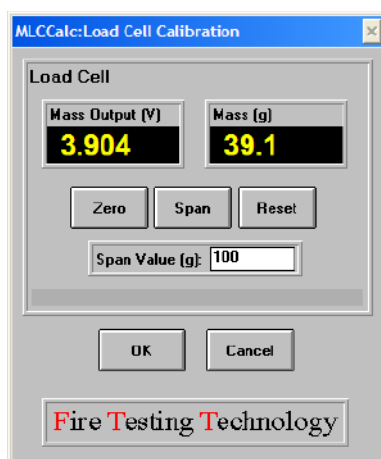


**Figura 3-10:** Curva de calibração da termopilha obtida no MLCCalc.

Por fim, a calibração do sistema de medida de massa consistiu na calibração da célula de carga através de uma massa previamente conhecida. Desta forma, antes de cada ensaio, a



massa dos corpos de prova foi comparada com o valor apresentado no software MLCCalc (Figura 3-11). Caso houvesse alguma divergência, o zero era ajustado (tara) e o valor conhecido era gravado.



**Figura 3-11:** Tela do módulo de calibração da célula de carga do MLCCalc.

### 3.2.2 Execução do ensaio

O ensaio foi realizado adotando-se as medidas de segurança contra perigos associados a altas temperaturas e dos produtos liberados na pirólise e na combustão, sejam eles: gases quentes, aerossóis e fuligem. Sendo assim, adotou-se sistema de exaustão da fumaça, bem como equipamento de proteção individual (EPI) adequado, incluindo luvas para altas temperaturas, jaleco, óculos de proteção e peça facial com elemento filtrante, conforme ilustrado na Figura 3-12.



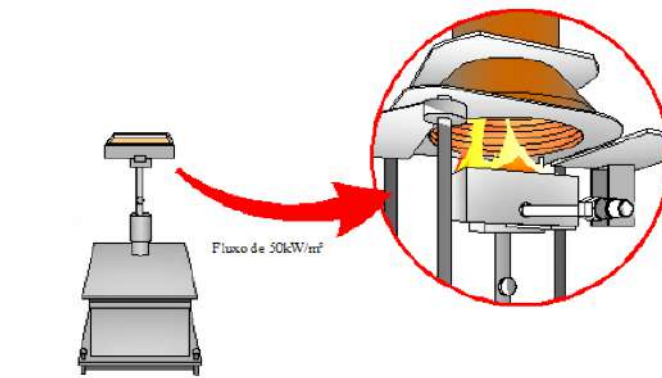
**Figura 3-12:** Equipamentos de Proteção Individual.

No equipamento, os materiais foram testados na orientação horizontal com fluxo de calor de  $50 \text{ kW/m}^2$ , por ser a mais empregada nos estudos e para representar condições do final da fase de desenvolvimento do incêndio em ambientes compartimentados, que antecedem o desenvolvimento generalizado [45][46].

Não foi adotada a faísca piloto para ignição das amostras, visto que este piloto não se enquadra nas formas mais comuns de propagação do incêndio em um ambiente compartimentado envolvendo a ignição de combustíveis sólidos, sejam elas: (i) a condução, através do contato de um material aquecido; (ii) a convecção, através do contato direto das chamas e (iii) a irradiação, sobretudo através de outros materiais em chamas. Esta decisão é corroborada pelo fato dos resultados obtidos utilizando o centelhamento (faísca) serem diferentes daqueles obtidos utilizando uma pequena chama [46].

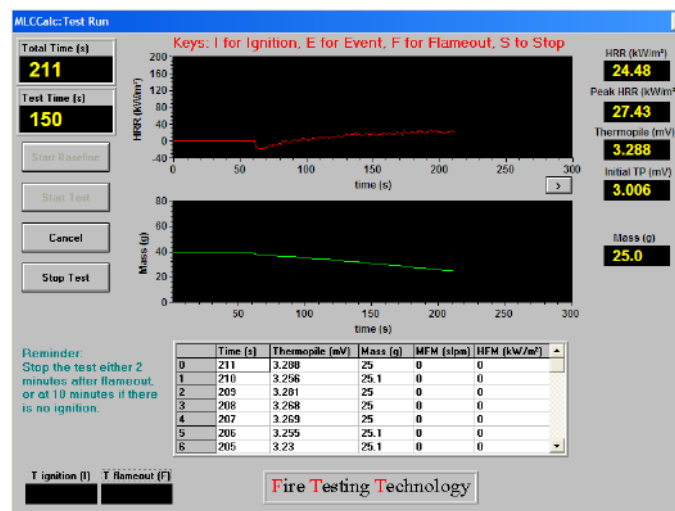
O ensaio foi conduzido de acordo com a norma ASTM E2102-08 [77]. Após ligar o aquecedor cônico, realizar a estabilização da temperatura correspondente à  $50 \text{ kW/m}^2$  e executar as devidas calibrações, foi adotado o seguinte procedimento para três corpos de prova de cada material [77]:

- (i) para se reduzir a perda de calor com o metal do suporte horizontal para amostra, os corpos de prova foram isolados em sua face inferior e faces laterais com papel alumínio;
- (ii) posicionou-se o corpo de prova no interior do suporte que foi colocado a 25 mm do aquecedor cônico;
- (iii) realizou-se a abertura do mecanismo de isolamento de calor e deu-se início ao ensaio;



**Figura 3-13:** Representação esquemática do ensaio do CCPM [89].

- (iv) registrou-se o tempo de ocorrência de chamas sustentáveis<sup>8</sup> e do cessar chamas no MLCCalc, conforme Figura 3-14;



**Figura 3-14:** Módulo de ensaio do MLCCalc.

- (v) encerrou-se o ensaio dois minutos após o cessar chamas. Nos casos onde não houve ignição, encerrou-se o ensaio após dez minutos [88];
- (vi) após a realização dos ensaios nos três corpos de prova, calculou-se a média aritmética do MLR<sub>180s</sub>. O critério de aceitação era o material apresentar no máximo 10% de diferença da média aritmética calculada. Caso contrário, novo corpo de prova era ensaiado, substituindo a amostra mais distante da média.

<sup>8</sup>Chamas sobre a superfície de um corpo de prova por um período superior a quatro segundos [77].

### 3.2.3 Procedimentos de Cálculo

#### 3.2.3.1 Média da Taxa de Perda de Massa (MLR)

A média da taxa de perda de massa (MLR) é expressa em grama por segundo e é obtida através da equação 3-1.

$$MLR = \frac{m_f - m_o}{t_f - t_o} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

Onde,

$m_o$  - massa no tempo inicial ( $t_o$ ),

$m_f$  - massa no tempo final ( $t_f$ ).

Em virtude do aumento da taxa de pirólise quando ocorre a ignição, identificou-se dois intervalos de MLR importantes:

- (i) a  $MLR_{180s}$ : representa o intervalo compreendido da ignição até 180 segundos após o evento. Como visto anteriormente, este parâmetro é empregado como critério de aceitação do corpo de prova;
- (ii) a  $MLR_{pir}$ : representa o intervalo compreendido do início do ensaio até a ignição, representando a massa perdida unicamente pelo processo de secagem e pirólise da madeira.

#### 3.2.3.2 Tempo de Ignição (TTI)

O TTI é um indicador da propensão do material entrar em ignição. No presente trabalho, trata-se do tempo compreendido entre o início do ensaio e a presença de uma chama sustentável sem presença de piloto [77].

#### 3.2.3.3 Tempos de pico de liberação de calor (TPHRR<sub>1</sub> e TPHRR<sub>2</sub>)

O tempo de pico de liberação do calor representa o tempo compreendido entre o início do ensaio e o tempo de maior HRR”. Em virtude de ter sido observado pico duplo na curva tempo x HRR” das madeiras [45][47][48], foram registrados os dois maiores picos de HRR” do corpo de prova, sendo o PHRR<sub>1</sub> o primeiro a ser observado, e o PHRR<sub>2</sub>, o

segundo.

### 3.2.3.4 Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR'')

A taxa de liberação de calor é calculada através dos valores registrados de saída da termopilha (p) em função do tempo (t). Para tanto, adota-se os coeficientes *a* e *b* da curva de calibração da termopilha (que é uma função linear crescente):

$$\mathbf{HRR(t) = a + b.p(t)} \quad (\text{Eq. 3-2})$$

A taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR'') é o quociente do HRR pela área superficial do corpo de prova (As):

$$\mathbf{HRR''(t) = \frac{HRR(t)}{A_s}} \quad (\text{Eq. 3-3})$$

O pico de liberação de calor unidade de área (PHRR'') é o maior valor da taxa de liberação de calor observado durante o ensaio. Também pode ser entendido como o maior valor entre o PHRR<sub>1</sub> e o PHRR<sub>2</sub>.

### 3.2.3.5 Calor total liberado por unidade de área (THR)

O THR é importante para compreender o potencial de propagação da chama quando o material é continuamente exposto ao fogo. O cálculo do calor total liberado foi realizado no período de 5min e 10 min de ensaio, em virtude da relevância desses períodos para a classificação de materiais adotada pela *Building Standards Law* do Japão [12]. Trata-se da integral da liberação de calor por unidade de área em função do tempo:

$$\mathbf{THR'' = \int_0^t HRR''(t) dt} \quad (\text{Eq. 3-4})$$

Como a função da curva tempo x HRR é desconhecida, o THR foi calculado através da área sob a curva tempo x HRR''. Para tanto, foram realizadas aproximações através do método do retângulo. As larguras dos retângulos são, em regra, de 5 segundos, pois são os intervalos das aferições da termopilha. Os intervalos só foram maiores nos casos onde o HRR'' foi negativo, sendo tais pares ordenados excluídos em virtude da impossibilidade física de um valor de liberação de calor abaixo de zero. Tal leitura negativa é considerada normal no início do ensaio em virtude da estabilização do equipamento, conforme

explicação fornecida pelo fabricante do equipamento.

### 3.2.3.6 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação é um parâmetro útil para se determinar a exatidão dos resultados experimentais, fornecendo uma ideia de precisão dos dados [90]. Esta variável é expressa em porcentagem e é calculada através da equação 3-5.

$$CV = \frac{S}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Onde:

S é o desvio padrão; e

M é a média.

Para classificar os coeficientes de variação, adotou-se os parâmetros da Tabela 3-3.

**Tabela 3-3:** Classificação do coeficiente de variação [91].

Coeficiente de Variação	Classificação
< 10%	Baixo
10% <= 20%	Médio
20% <= 30%	Alto
>30%	Muito alto

## 3.3 FIO INCANDESCENTE

O equipamento fio incandescente consiste num aparato dotado de uma ponta metálica aquecida por uma resistência elétrica variável e de um mecanismo que movimenta a amostra e a submete ao contato com a ponta metálica quente / incandescente com a força de 1 N [17]. No presente estudo, foi empregado o fio incandescente da marca Ceast modelo 6447A, apresentado na Figura 3-15.



**Figura 3-15:** Equipamento fio incandescente empregado no ensaio.

O fio incandescente permite a realização de dois ensaios: o *glow-wire flammability index* (GWFI) ou índice de inflamabilidade *glow-wire* e o *glow-wire ignition temperature* (GWIT) ou temperatura de ignição *glow-wire*. Em ambos ensaios, as amostras foram condicionadas à espessura de 10 mm, 9 mm e 9 mm, respectivamente, para o *Eucalyptus dunnii*, para o *Pinus elliottii* e para o MDF.

O procedimento geral dos ensaios seguiu o preconizado na IEC 60695-2-10 [92]. A norma prevê a aplicação do ensaio em materiais de revestimento de cabos elétricos ou em outros materiais sólidos. Tais ensaios simulam os efeitos do aquecimento provocado pelo mau funcionamento de um equipamento elétrico [17].

### 3.3.1 Execução do Ensaio GWFI

O ensaio GWFI seguiu os parâmetros da norma IEC 60695-2-12: 2000 [93]. Os corpos de prova foram submetidos ao contato, por 30 segundos, com o fio incandescente (ponta metálica aquecida) aplicando a força de 1 N. Inicialmente, a ponta metálica foi condicionada a 960° C e foram avaliados os seguintes parâmetros:

- (i) o tempo que o material levou para entrar em ignição a contar do contato com a ponta metálica ( $t_i$ );

- (ii) se houve o desprendimento de material incandescente (gotejamento) capaz de incendiar o algodão posicionado abaixo do corpo de prova (Got);
- (iii) o tempo necessário para a extinção das chamas a contar do contato com a ponta metálica (tf).

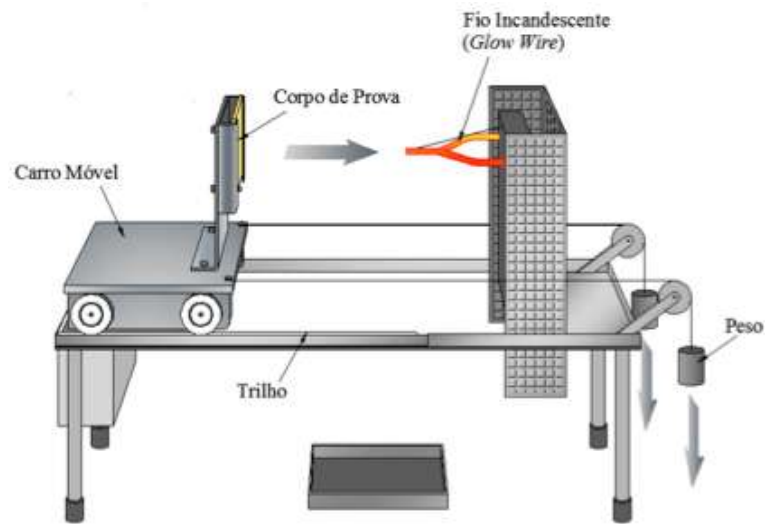
Os valores foram registrados e caso o tf fosse superior a 60 segundos ou houvesse a ignição do algodão posicionado abaixo do corpo de prova, a temperatura da ponta metálica era reduzida (primeira vez em 60° C, demais vezes em 50° C) e repetir-se-ia o ensaio até que fosse atingida a condição supracitada em três testes consecutivos, sendo esta temperatura, juntamente com a espessura do material em mm, as componentes do GWFI. Os resultados do ensaio são importantes para comparar a ignitabilidade no que concerne à capacidade dos materiais em se extinguir após a retirada do piloto [17].

### **3.3.2 Execução do Ensaio GWIT**

O ensaio GWIT seguiu os parâmetros da norma IEC 60695-2-13: 2000 [78]. Os corpos de prova foram submetidos ao contato, por 30 segundos, com o fio incandescente aplicando a força de 1 N. O GWIT foi a temperatura 25° C acima da temperatura máxima de teste na qual não ocorreu a ignição do corpo de prova em três ensaios consecutivos. Para tanto, considerou-se ignição a presença de chamas por mais de 05 segundos [78]. Os resultados são importantes para se comparar a temperatura do piloto (ponta metálica aquecida) necessária para incendiar os materiais.

A representação esquemática dos ensaios GWIT e GWFI estão na Figura 3-16.





**Figura 3-16:** Representação esquemática do ensaio [89].

# 4

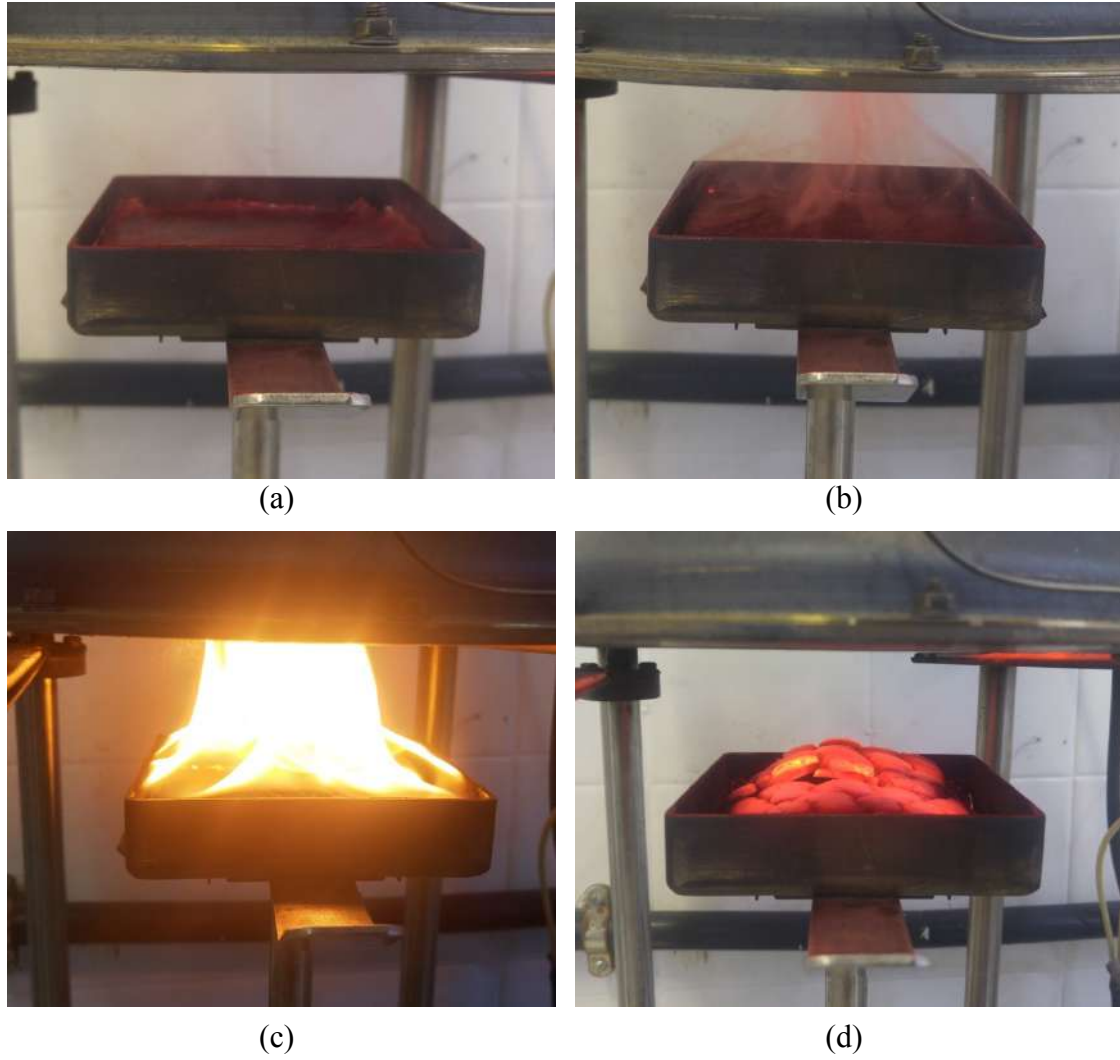
## ***ANÁLISE DOS RESULTADOS***

---

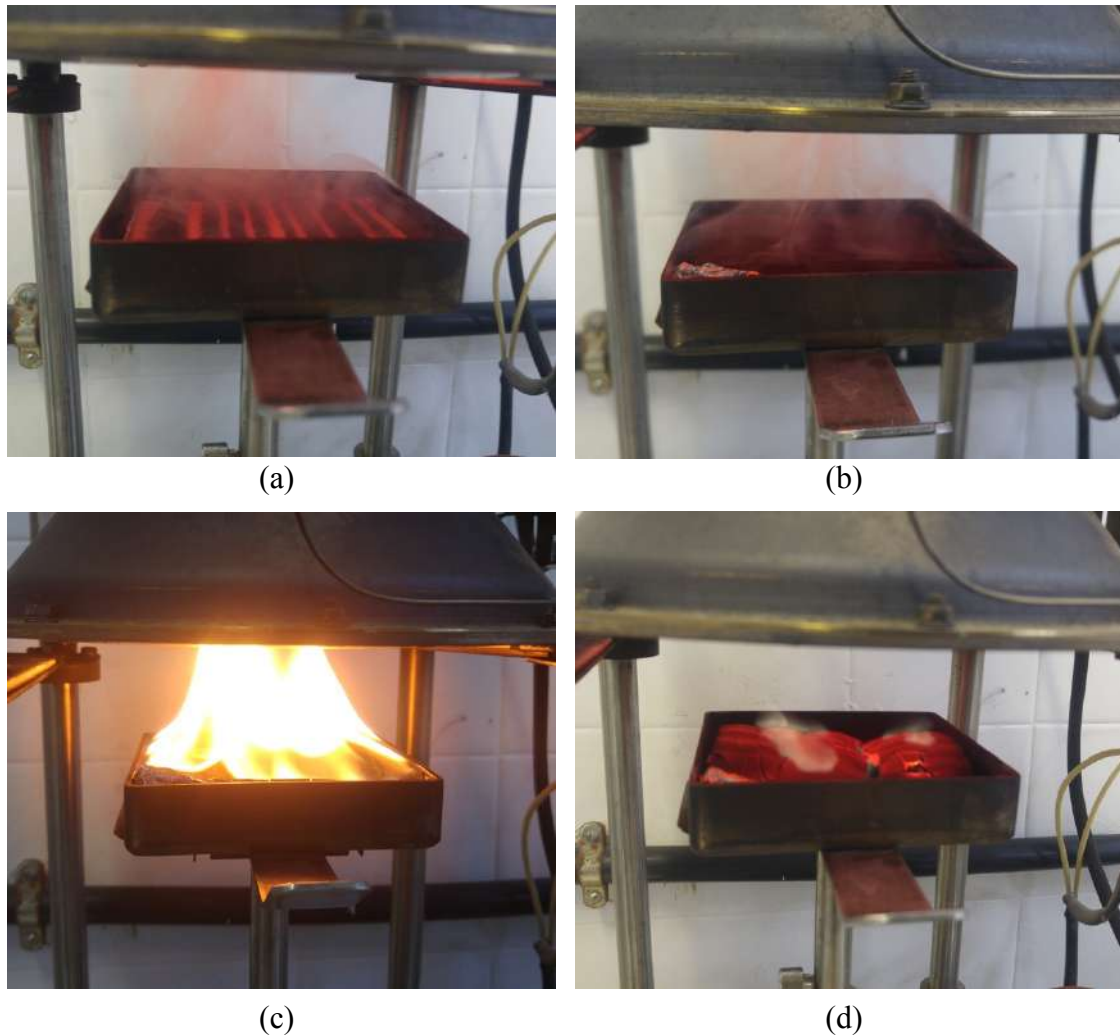
No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da metodologia experimental apresentada no capítulo anterior para os ensaios no fio incandescente e no cone calorímetro de perda de massa (CCPM). Ademais, os resultados são correlacionados com trabalhos de outros autores.

### **4.1 CONE CALORÍMETRO DE PERDA DE MASSA - CCPM**

As fases (i) preliminar, caracterizada pela secagem e pela pirólise, (ii) principal, iniciada pela combustão em chamas, e (iii) final, caracterizada pelo cessar chamas (combustão em brasas), foram observadas no processo de ignição e combustão do *Eucalyptus dunnii* e do *Pinus elliottii* tratados e não tratados. Tais fases da queima do EUCN e do PINR podem ser observadas na Figura 4-1 e na Figura 4-2, respectivamente.



**Figura 4-1:** Processo de ignição e combustão do EUCN: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em chamas; (d) cessar chamas (combustão em brasas).



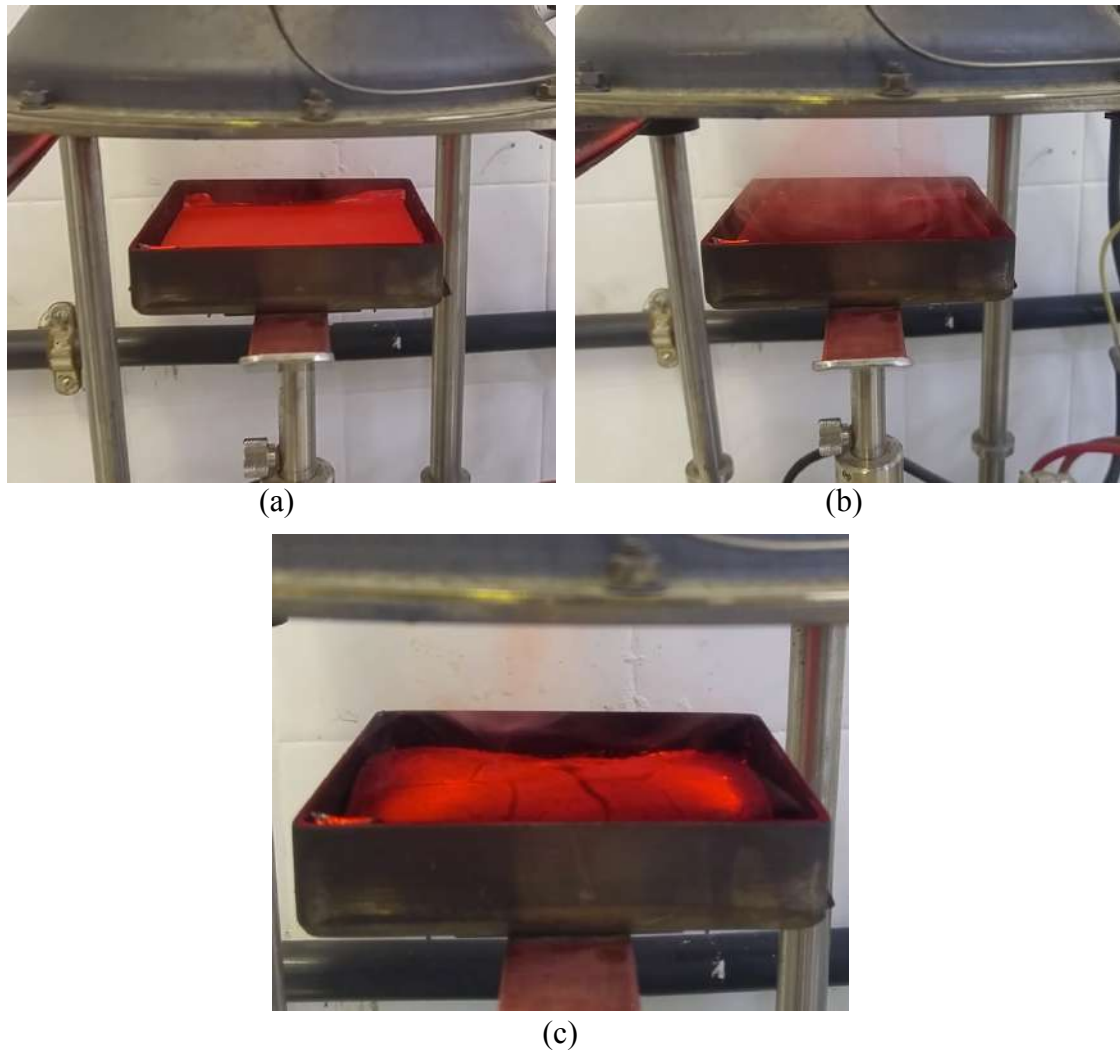
**Figura 4-2:** Processo de ignição e combustão do PINR: (a) secagem/pirólise; (b) pirólise; (c) combustão em chamas; (d) cessar chamas (combustão em brasas).

Cabe destacar que, tanto no PINN quanto no PINR, a formação da camada carbonácea apresentou taxas maiores e menores que se intercalaram entre / nos anéis de crescimento da madeira, como foi destacado na Figura 4-3 registrada na fase preliminar do PINR.



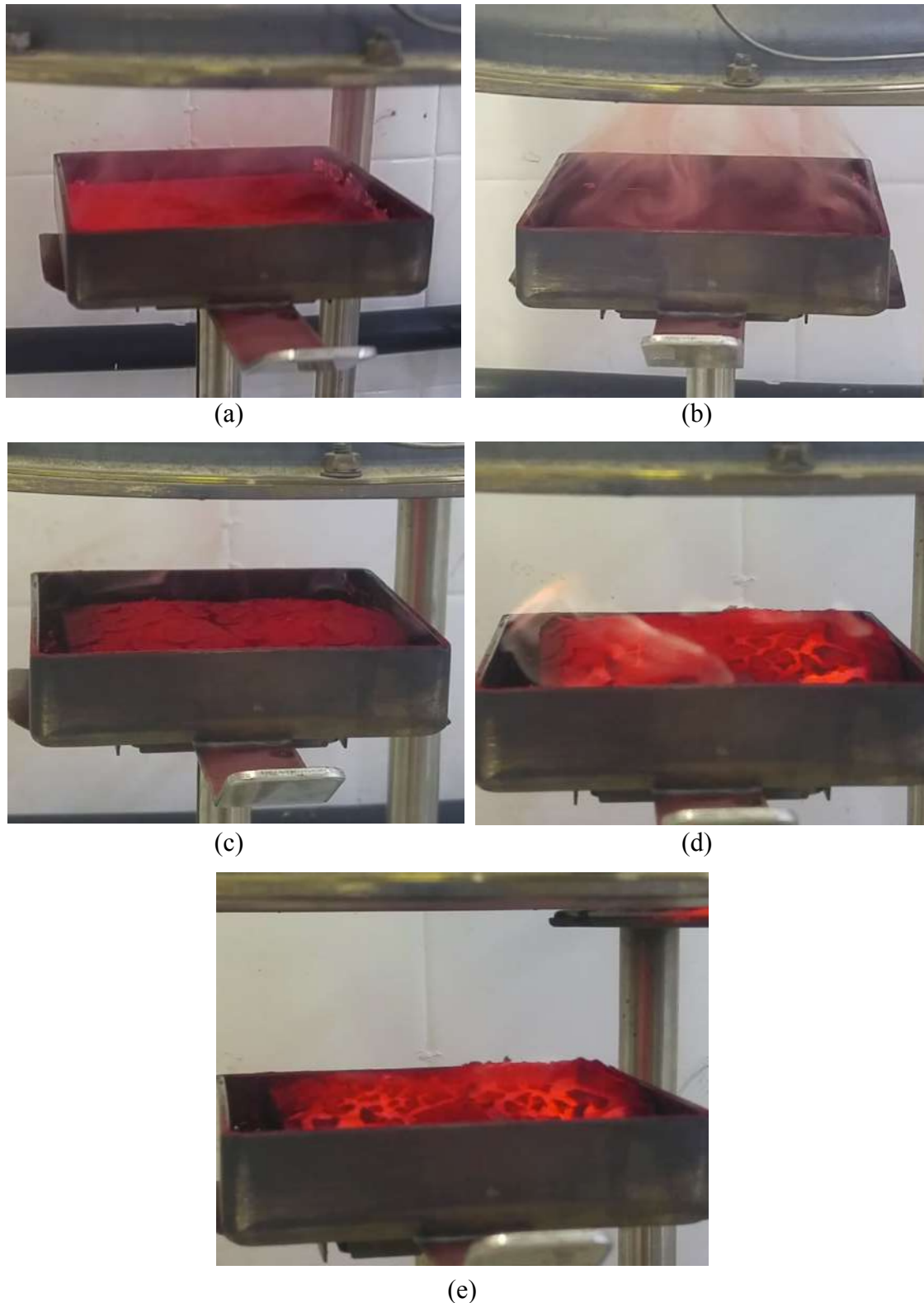
**Figura 4-3:** Taxas de carbonização diferentes no *Pinus elliottii*.

No MDF não tratado, contudo, não foi observada a combustão em chamas, conforme Figura 4-4.



**Figura 4-4:** Processo de combustão do MDFN: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em brasas.

Já no MDF tratado, observou-se um comportamento diferenciado. Depois de 500 segundos de ensaio, a madeira, que estava em combustão em brasas, ignitou, ou seja, iniciou-se uma combustão em chama, como apontado na Figura 4-5.















**Figura 4-5:** Processo de combustão/ignição do MDFR: (a) secagem; (b) pirólise; (c) combustão em brasas; (d) combustão em chamas; (e) cessar chamas.

Os estados das madeiras antes e após o ensaio no CCPM são retratados na Tabela 4-1, onde é possível observar que as madeiras tratadas (excetuando-se o MDFR, cujo tempo de ensaio foi maior que a amostra não tratada) apresentaram maior grau de carbonização.



**Tabela 4-1:** Madeiras antes e após o ensaio no CCPM.

MAT	ANTES DO ENSAIO	APÓS ENSAIO	
		Sem retardante	Com retardante
EUC			
			
PIN			
			
MDF			
			



Os resultados obtidos através do cone calorímetro, após os corpos de prova serem selecionados mediante o critério de aceitação e mediante o devido procedimento de cálculo, são consolidados na Tabela 4-2. Os relatórios de todos ensaios encontram-se no Apêndice 1. Cabe destacar que apenas o MDFR teve o critério de aceitação relaxado, em virtude dos valores de  $MLR_{180s}$  serem muito reduzidos.

**Tabela 4-2:** Dados obtidos a partir do CCPM.

CP	$MLR_{180s}$ [g/s]	$MLR_{pir}$ [g/s]	TTI [s]	$T_{PHRR}''_1$ [s]	$T_{PHRR}''_2$ [s]	$PHRR''_1$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$PHRR''_2$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$THR_{5min}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	$THR_{10min}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]
EUCN1	0,124	0,083	68	120	430	310,80	302,90	56,96	128,84
EUCN3	0,120	0,083	171	230	430	203,95	295,63	25,05	87,67
EUCN4	0,132	0,096	156	200	375	212,56	381,36	30,83	93,52
EUCR1	0,109	0,074	106	145	415	202,28	306,83	36,51	95,83
EUCR3	0,100	0,073	164	195	500	179,63	242,26	21,79	77,18
EUCR4	0,105	0,070	113	150	470	183,72	317,14	29,19	90,16
PINN1	0,117	0,084	95	190	-	350,64	-	49,02	-
PINN2	0,120	0,078	124	225	-	356,21	-	46,08	-
PINN3	0,106	0,077	166	250	-	353,91	-	39,25	-
PINR1	0,107	0,074	124	225	-	305,96	-	39,78	-
PINR2	0,104	0,087	184	265	-	337,21	-	38,18	-
PINR3	0,105	0,083	153	230	-	333,12	-	37,60	-
MDFN2	-	0,090	0	375	-	50,95	-	6,03	15,76
MDFN3	-	0,091	0	350	-	45,27	-	4,70	12,56
MDFN4	-	0,089	0	350	-	46,78	-	5,58	13,26
MDFR2	0,011	0,095	553	385	575	55,86	49,79	8,46	21,10
MDFR3	0,013	0,085	603	395	645	69,63	53,54	11,12	25,21
MDFR4	0,016	0,090	572	370	615	60,04	51,07	9,91	23,10

A médias dos resultados apresentados na Tabela 4-2 são consolidadas na Tabela 4-3, onde o coeficiente de variação (CV) encontra-se entre parênteses.

**Tabela 4-3:** Médias e coeficientes de variação dos resultados obtidos no CPPM.

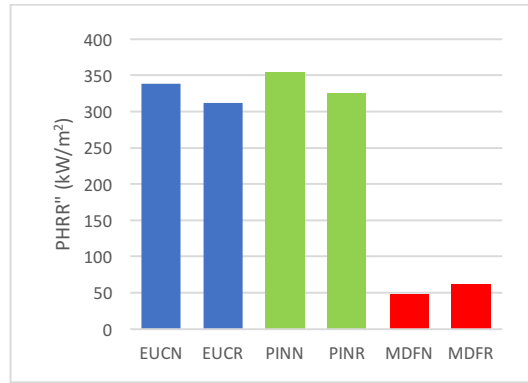
<b>MAT</b>	<b>MLR<sub>180s</sub></b> [g/s]	<b>MLR<sub>pir</sub></b> [g/s]	<b>TTI</b> [s]	<b>T<sub>PHRR”1</sub></b> [s]	<b>T<sub>PHRR”2</sub></b> [s]	<b>PHRR”<sub>1</sub></b> [kW/m <sup>2</sup> ]	<b>PHRR”<sub>2</sub></b> [kW/m <sup>2</sup> ]	<b>THR<sub>5min</sub></b> [MJ/m <sup>2</sup> ]	<b>THR<sub>10min</sub></b> [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>EUCN</b>	0,126	0,087	132	183	412	242,44	326,63	38,61	103,34
<b>(CV)</b>	(4,85%)	(8,59%)	(42,16%)	(31,07%)	(7,71%)	(24,48%)	(14,55%)	(44,04%)	(21,55%)
<b>EUCR</b>	0,105	0,072	128	163	462	188,54	288,74	29,16	87,72
<b>(CV)</b>	(4,31%)	(2,88%)	(24,73%)	(16,89%)	(9,33%)	(6,40%)	(14,06%)	(25,24%)	(10,90%)
<b>PINN</b>	0,114	0,080	128	222	-	353,59	-	44,78	-
<b>(CV)</b>	(6,45%)	(4,75%)	(27,89%)	(13,58%)	-	(0,79%)	-	(11,19%)	-
<b>PINR</b>	0,105	0,081	154	240	-	325,43	-	38,52	-
<b>(CV)</b>	(1,45%)	(8,19%)	(19,48%)	(9,08%)	-	(5,22%)	-	(2,93%)	-
<b>MDFN</b>	-	0,090	0	358	-	47,67	-	5,44	13,86
<b>(CV)</b>	-	(1,11%)	(0)	(4,03%)	-	(6,17%)	-	(12,44%)	(12,14%)
<b>MDFR</b>	0,013	0,090	576	383	612	61,84	51,47	9,83	23,14
<b>(CV)</b>	(18,87%)	(5,56%)	(4,38%)	(3,29%)	(5,74%)	(11,42%)	(3,70%)	(13,55%)	(8,88%)

Os materiais que apresentaram coeficientes de variação altos nos parâmetros relacionados à liberação de calor e que implicaram em alterações importantes na curva média de liberação de calor (*e. g.*, deformação do comportamento de pico simples ou pico duplo do material) foram tratados. Para tanto, excluiu-se da análise os corpos de prova EUCN1 e o EUCR3. O resultado final foi consolidado na Tabela 4-4:

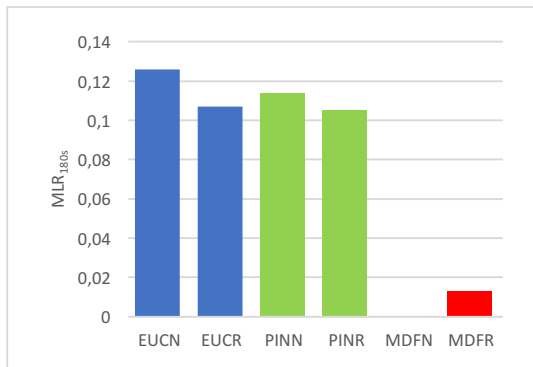
**Tabela 4-4:** Médias e coeficientes de variação dos resultados obtidos no CPPM (após tratamento dos dados).

<b>MAT</b>	<b>MLR<sub>180s</sub></b> [g/s]	<b>MLR<sub>pir</sub></b> [g/s]	<b>TTI</b> [s]	<b>T<sub>PHRR”1</sub></b> [s]	<b>T<sub>PHRR”2</sub></b> [s]	<b>PHRR”<sub>1</sub></b> [kW/m <sup>2</sup> ]	<b>PHRR”<sub>2</sub></b> [kW/m <sup>2</sup> ]	<b>THR<sub>5min</sub></b> [MJ/m <sup>2</sup> ]	<b>THR<sub>10min</sub></b> [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>EUCN</b>	0,126	0,090	163	215	402	208,25	338,49	27,94	90,59
<b>(CV)</b>	(6,73%)	(10,27%)	(6,49%)	(9,87%)	(9,66%)	(2,92%)	(17,91%)	(14,36%)	(4,57%)
<b>EUCR</b>	0,107	0,072	109	147	442	193,00	311,98	32,85	92,99
<b>(CV)</b>	(2,64%)	(3,93%)	(4,52%)	(2,40%)	(9,37%)	(6,49%)	(2,34%)	(15,76%)	(4,31%)
<b>PINN</b>	0,114	0,080	128	222	-	353,59	-	44,78	-
<b>(CV)</b>	(6,45%)	(4,75%)	(27,89%)	(13,58%)	-	(0,79%)	-	(11,19%)	-
<b>PINR</b>	0,105	0,081	154	240	-	325,43	-	38,52	-
<b>(CV)</b>	(1,45%)	(8,19%)	(19,48%)	(9,08%)	-	(5,22%)	-	(2,93%)	-
<b>MDFN</b>	-	0,090	0	358	-	47,67	-	5,44	13,86
<b>(CV)</b>	-	(1,11%)	(0)	(4,03%)	-	(6,17%)	-	(12,44%)	(12,14%)
<b>MDFR</b>	0,013	0,090	576	383	612	61,84	51,47	9,83	23,14
<b>(CV)</b>	(18,87%)	(5,56%)	(4,38%)	(3,29%)	(5,74%)	(11,42%)	(3,70%)	(13,55%)	(8,88%)

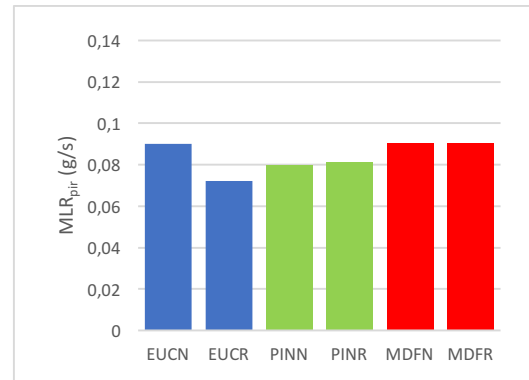
A Figura 4-6 confronta os resultados médios de PHRR”, MLR<sub>180s</sub>, MLR<sub>pir</sub>, TTI, THR<sub>5min</sub> e THR<sub>10min</sub> dos materiais tratados e não tratados reportados na Tabela 4-4.



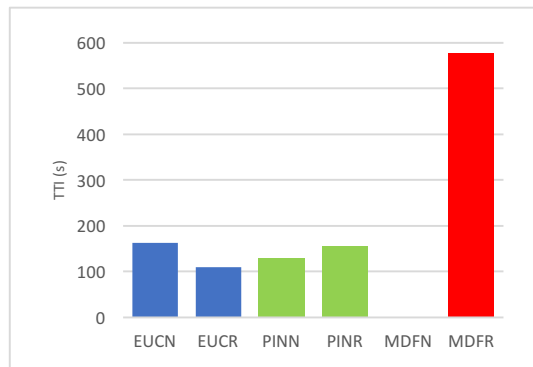
(a)



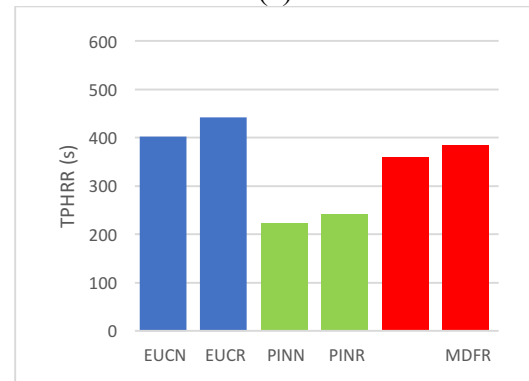
(b)



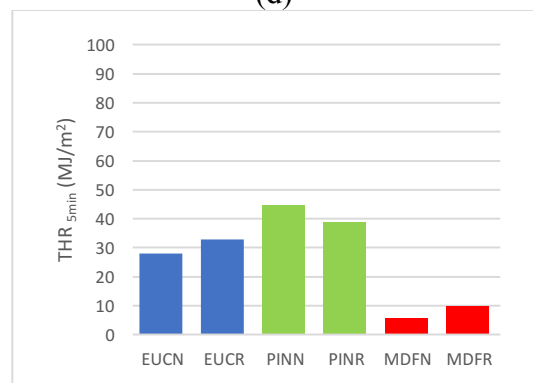
(c)



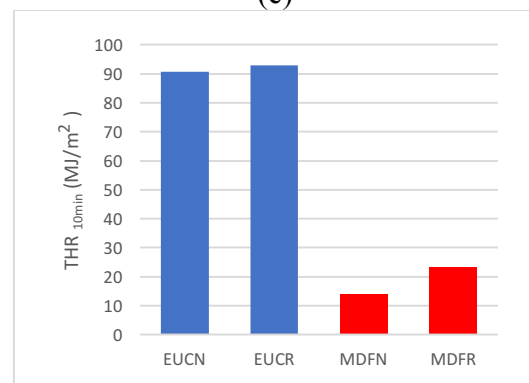
(d)



(e)



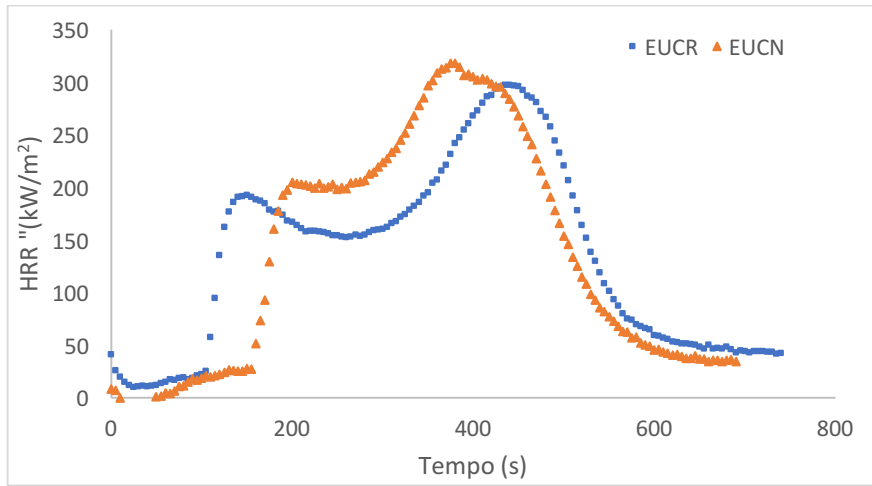
(f)



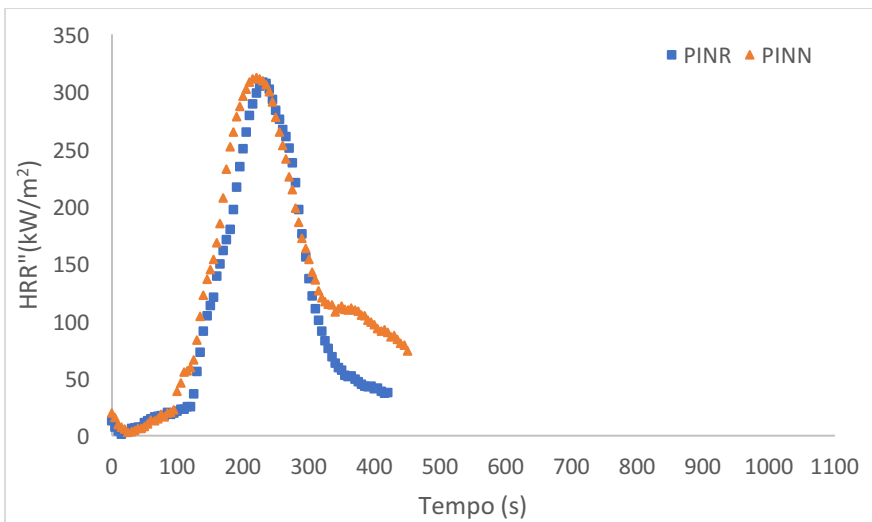
(g)

**Figura 4-6:** Representação gráfica do confronto de resultados: (a) PHRR'', (b) MLR<sub>180s</sub>, (c) MLR<sub>pir</sub>, (d) TTI, (e) TPHRR, (f) THR<sub>5min</sub> e (g) THR<sub>10min</sub>.

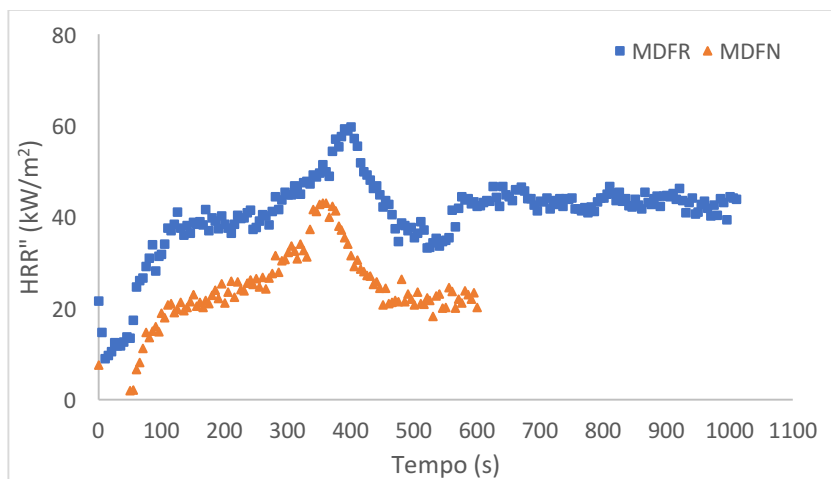
Na Figura 4-7, são expostas as curvas das médias de liberação de calor do *Eucalyptus dunnii*, do *Pinus elliottii* e do MDF, respectivamente, permitindo o confronto entre parâmetros relacionados a estas propriedades do material tratado e não tratado.



(a)



(b)



(c)

**Figura 4-7:** Confronto entre curvas Tempo x HRR'' dos materiais tratado e não tratado:

(a) *E. dunnii*, (b) *P. elliottii* e (c) MDF (escala vertical reduzida).

A partir do confronto do estado da arte com as curvas de liberação de calor (Figura 4-7 (a), (b) e (c)), das observações dos fenômenos durante o ensaio (Figura 4-1 à Figura 4-5), do estado do material pós ensaio (Tabela 4-1) e da análise dos dados da Tabela 4-4, verifica-se que:

**a. Sobre o *Eucalyptus dunnii***

- (i) O EUCN e o EUCR, inicialmente, apresentaram coeficientes de variação altos nos parâmetros relacionados à liberação de calor que implicaram em alterações importantes na curva média de liberação de calor, causando a deformação do comportamento de pico duplo do material. Sendo assim, para permitir a correta análise dos fenômenos ao longo da curva, excluiu-se os corpos de prova EUCN1 e o EUCR3 do cálculo das médias;
- (ii) as curvas de liberação de calor tanto do EUCR quanto do EUCN apresentaram comportamento de pico duplo, típico das madeiras [45]. Este comportamento também foi registrado em madeiras compensadas de *Eucalyptus dunnii* tratadas por impregnação com retardante à base de fósforo [5];
- (iii) houve redução da média dos TTI em 49,54% no EUCR. La *et al* [5] também reportaram redução deste parâmetro, porém em menores proporções: TTI 8,69% menor que a madeira compensada de *E. dunnii* não tratada. Reduções do TTI de madeiras tratadas maiores do que as observadas no presente estudo foram registradas no tratamento superficial do MDF com formulações à base de carbono [75];
- (iv) houve redução de 46,26% no TPHRR<sub>1</sub> e aumento de TPHRR<sub>2</sub> em 9,95% no EUCR, resultando num aumento da diferença entre o TPHRR<sub>1</sub> e o TPHRR<sub>2</sub> em 57,75% no EUCR. Cabe destacar que comportamento semelhante também foi observado por La *et al.* [5];
- (v) não houve alteração significativa no PHRR<sub>1</sub> e no PHRR<sub>2</sub>, sendo 7,90 % e 8,50% inferiores no EUCR, respectivamente. Entretanto, a aplicação de retardante de chamas à base de fósforo em madeira compensada de *E. dunnii* promoveu a redução de 51,02% no PHRR<sub>1</sub> e redução de 84,83% no PHRR<sub>2</sub> na madeira tratada [5]. Ademais, a aplicação de retardante à base de fósforo por impregnação em

dicotiledônea (*Japanese Linden*) implicou em reduções do PHRR e do THR<sub>5min</sub> que classificaram o material como retardante de chamas, nos termos da BSL do Japão [51];

- (vi) o THR<sub>5min</sub> foi 17,57% superior no EUCR, sobretudo em virtude do TTI ter sido inferior no EUCN. Em contrapartida, pela redução da liberação de calor evidenciada na curva do EUCR entre 200 e 400 segundos (entre os picos de liberação de calor), verificou-se que os THR<sub>10min</sub> do EUCN e do EUCR não apresentaram diferenças significativas. Em contrapartida, La *et al.* [5] identificaram redução de 264% no THR<sub>5min</sub> e de 463,3% no THR<sub>10min</sub> da madeira tratada;
- (vii) houve redução de 17,76% no MLR<sub>180s</sub> e 25% no MLR<sub>pir</sub> do EUCR. Na mesma ordem, La *et al.* [5] identificaram redução de 28,88% da MLR da madeira tratada. Ademais, estudo envolvendo diferentes madeiras tratadas superficialmente com retardantes à base de fósforo reportou redução do MLR e prolongação no tempo necessário para atingir o segundo pico de perda de massa [21];
- (viii) através de um exame visual, o EUCR apresentou menor concentração de cinzas em relação ao EUCN, como observado por Jiang *et al.* [39].

#### **b. Sobre o *Pinus elliottii***

- (i) a curva de liberação de calor tanto do PINR quanto do PINN apresenta comportamento de pico simples. Tal comportamento difere do comportamento de outros exemplares de coníferas [14][76]. É interessante que seja investigada, em trabalhos futuros, a possibilidade da taxa de carbonização não homogênea evidenciada na superfície do *Pinus elliottii* (Figura 4-3) ter contribuído para a característica da curva, fazendo com que a camada carbonácea apresentasse pontos com menores espessuras, retardando a proteção à transferência de calor [45];
- (ii) o TTI do PINR foi cerca de 20% inferior ao PINN. No entanto, em virtude do TTI do PINR e do PINN apresentarem coeficientes de variação altos, deve haver ressalva na análise deste dado. Este resultado seguiu a tendência do *Pinus radiata* tratado com retardante à base de fósforo por impregnação e do *Pinus desinflora*



tratado com formulação à base de fósforo, que apresentaram redução do TTI em 29,59% [6] e redução percentual crescente em relação à concentração do retardante [76], respectivamente;

- (iii) não houve alteração significativa do TPHRR<sub>1</sub>, sendo 8,11% inferior no PINR;
- (iv) não houve alteração significativa no pico de HRR, sendo 8,65% inferior no PINR. No entanto, Marney *et al* [6] identificaram uma redução do PHRR<sub>1</sub> do *Pinus radiata* em 26,38%;
- (v) na mesma linha, Harada *et al.* [52][76] registraram redução percentual crescente do PHRR em relação à concentração do retardante impregnado no *Pinus desinflora*. Ademais, esta conífera impregnada com retardante de chamas em concentração superior a 100 kg/m<sup>3</sup> se enquadrou como um material retardante de chamas, de acordo com o BSL do Japão [51];
- (vi) por outro lado, o retardante de chamas cerâmico aplicado superficialmente não promoveu uma redução significativa do PHRR e do THR<sub>5min</sub> do *Pinus desinflora* [52];
- (vii) houve redução da liberação de calor após os 300 segundos no PINR, que contribuiu para a redução de 16,25% do THRR<sub>5min</sub> e para a redução do tempo de combustão no PINR, como pode ser verificado através do confronto entre as fotografias registradas após o ensaio (materializadas na Tabela 4-1), onde o PINR encontra-se menos degradado;
- (viii) os ensaios, tanto do PINR quanto do PINN, foram cessados antes dos 10 minutos, devido ao cessar chamas ter ocorrido em torno de 350 e 300 segundos, respectivamente;
- (ix) não houve redução significativa do MLR<sub>180s</sub> e do MLR<sub>pir</sub> no PINR em relação PINN, resultando em 8,57% e 1,25% respectivamente.

### **c. Sobre o MDF**

- (i) o MDFN não ignitou, apresentou THR<sub>5min</sub> inferior a 8 MJ/m<sup>2</sup> e PHRR inferior a 200 kW/m<sup>2</sup>, sendo, portanto, enquadrado como um material retardante de chamas,

nos termos da BSL do Japão[51]. Entretanto, ignição e liberação de calor superior a  $200 \text{ kW/m}^2$  foram registradas ao se determinar propriedades de reação ao fogo do MDF sem tratamento [13][75];

- (ii) não houve alteração do  $\text{MLR}_{\text{pir}}$  entre o MDFN e o MDFR. O  $\text{MLR}_{180\text{s}}$  não foi registrado no MDFN por não ter entrado em ignição. Cabe destacar que o  $\text{MLR}_{180\text{s}}$  do MDFR foi 592,23% inferior ao  $\text{MLR}_{\text{pir}}$ , em virtude do tempo de ignição do MDFR ter sido tardio (posterior a 500 segundos), que permitiu que a maior parte da massa fosse perdida ainda na fase preliminar;
- (iii) além de ter entrado em combustão em chamas, a liberação de calor do MDFR foi, ao longo de todo ensaio, superior ao MDFN, tendo a diferença variado entre 10 e  $20 \text{ kW/m}^2$ , representando um aumento do  $\text{THR}_{5\text{min}}$  em 80,70% e do  $\text{THR}_{10\text{min}}$  em 66,95%. Na mesma perspectiva, o pico de liberação de calor do MDFR foi cerca de  $15 \text{ kW/m}^2$  superior ao MDFN, representando um aumento de 29,72%. Não foi encontrado na literatura registro e explicações para tal fenômeno;
- (iv) de outro modo, foi verificado no estudo realizado por Seo *et al.* [75], que analisaram a retardância à chama de MDF tratados superficialmente com retardante de chamas à base de carbono que, em todas as formulações empregadas, houve redução considerável do PHRR;
- (v) a aplicação superficial de retardante de chamas à base de carbono proporcionou a redução do TTI do MDF em todas as formulações empregadas na campanha experimental [75];
- (vi) não houve alteração significativa no TPHRR, sendo 6,98% superior no MDFR;
- (vii) a combustão em chamas observada depois dos 500 segundos de ensaio no MDFR (que sucedeu um longo período de combustão em brasas) pode ser explicada em razão da quebra da camada carbonácea que permitiu o contato do oxigênio do ambiente com os vapores liberados [16];
- (viii) o tempo de ensaio, cerca de 400 segundos superior no MDFR, justifica o estado de degradação do MDFR consideravelmente maior em relação ao material não tratado.

## 4.2 FIO INCANDESCENTE

Seguindo o procedimento de teste descrito no capítulo anterior, foi possível mensurar o GWFI e o GWIT. Os resultados completos do GWFI são apresentados na Tabela 4-5, onde os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação.

**Tabela 4-5:** Ensaio do GWFI.

CP	Got	T [°C]	t <sub>i</sub> [s]	t <sub>f</sub> [s]	t <sub>e</sub> [s]	t <sub>e<sub>m</sub></sub> [s]
EUCN1	NÃO	960	1	38	7	
EUCN2	NÃO	960	1	35	4	5,3 (28,82%)
EUCN3	NÃO	960	1	36	5	
EUCR1	NÃO	960	1	32	1	
EUCR2	NÃO	960	1	33	2	1,7 (33,96%)
EUCR3	NÃO	960	1	33	2	
PINN1	NÃO	960	1	59	28	
PINN2	NÃO	960	1	38	7	14 (86,60%)
PINN3	NÃO	960	1	38	7	
PINR1	NÃO	960	1	33	2	
PINR2	NÃO	960	1	32	1	1,3 (44,41%)
PINR3	NÃO	960	1	32	1	
MDFN1	NÃO	960	1	34	3	
MDFN2	NÃO	960	1	35	4	3,7 (15,60%)
MDFN3	NÃO	960	1	35	4	
MDFR1	NÃO	960	1	32	1	
MDFR2	NÃO	960	1	33	2	1,3 (44,41%)
MDFR3	NÃO	960	1	32	1	

Onde:

Got - variável booleana que indica se houve não gotejamento / queda de material incandescente.

T - temperatura da ponta metálica no ensaio.

t<sub>i</sub> - tempo de ignição (após contato com a ponta metálica).

t<sub>f</sub> - tempo do contato até a extinção da chama.

t<sub>e</sub> - tempo de extinção após a retirada da ponta aquecida.

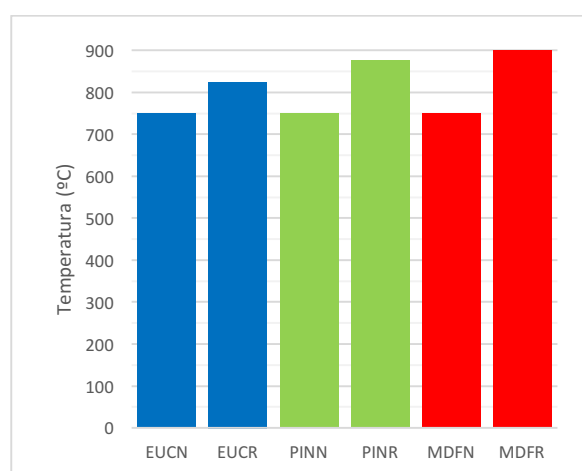
t<sub>e<sub>m</sub></sub> - média do tempo de extinção da chama após a retirada da ponta aquecida.

Já os resultados do GWFI e do GWIT são consolidados na Tabela 4-6.

**Tabela 4-6:** GWFI e GWIT dos corpos de prova.

CP	GWFI [°C]	GWIT [°C]
EUCN	960/10,0	750/10,0
EUCR	960/10,0	825/10,0
PINN	960/9,0	750/9,0
PINR	960/9,0	875/9,0
MDFN	960/9,0	750/9,0
MDFR	960/9,0	900/9,0








A Figura 4-8 confronta os resultados do ensaio GWIT dos materiais tratados e não tratados reportados na Tabela 4-6.



**Figura 4-8:** Representação gráfica do confronto dos resultados do ensaio GWIT.

Por fim, os estados das madeiras antes e depois do ensaio GWFI a 960° C, com e sem retardante, são retratados na Tabela 4-7, onde é possível observar a maior degradação do material não tratado.

**Tabela 4-7:** Corpos de prova antes e depois do ensaio GWFI a 960° C.

MAT	ANTES DO ENSAIO	APÓS ENSAIO	
		Sem retardante	Com retardante
EUC			
PIN			
MDF			

Correlacionando o estado da arte com as observações registradas na Tabela 4-7 e os resultados consolidados na Tabela 4-5 e na Tabela 4-6, verifica-se que:

- (i) como comportamento esperado da combustão das madeiras, nenhum dos corpos de prova, tanto tratados quanto não tratados com retardante de chamas, apresentou qualquer forma de gotejamento ou queda de material incandescente;
- (ii) não há registros na literatura de ensaios empregando o fio incandescente para avaliar a retardância à chama em madeiras, tendo sido encontrados trabalhos envolvendo polímeros [73][74]. Uma dessas pesquisas analisou o efeito sinérgico de formulações intumescentes e minerais em polímeros empregados no setor elétrico, onde o aumento de 50° C no GWIT foi destacado positivamente pelos autores [74];
- (iii) numa análise exclusiva da Tabela 4-5, os valores de GWFI tanto das amostras não tratadas e quanto das tratadas reportaram 960° C em todas as madeiras do ensaio, portanto, o valor máximo. Porém, sob a ótica do parâmetro  $t_{em}$ , identifica-se redução dos tempos de extinção das chamas após a retirada do fio quente em: 211%, 977% e 185%, no *Eucalyptus dunnii*, no *Pinus elliottii* e no MDF, respectivamente. Tal redução se materializou nas observações do estado pós ensaio das madeiras, conforme Tabela 4-7. Não será discutido qual madeira apresentou melhor resultado, em virtude do elevado coeficiente de variação do  $t_{em}$ ;
- (iv) quanto ao GWIT, verifica-se que todas as madeiras não tratadas apresentaram tempo de ignição *glow-wire* de 750°C. Portanto, a esperada temperatura de ignição maior do *P. elliottii* em relação ao *E. dunnii*, em virtude da maior concentração de lignina nas coníferas, não se materializou [36];
- (v) no que tange ao aumento do GWIT das madeiras tratadas, verificou-se que o aumento foi de 75°C, 125° C e 150°C, respectivamente no *Eucalyptus dunnii*, no *Pinus elliottii* e no MDF. Tais reduções se traduzem em aumentos significativos do GWIT [74];
- (vi) a permeabilidade observada no momento da aplicação do retardante seguiu a seguinte ordem decrescente: PIN, EUC e MDF, conforme Figura 3-5. No entanto,

não foi encontrada relação entre o aumento da temperatura de ignição das amostras tratadas e a permeabilidade, visto que o MDF e o *P. elliotii* (justamente os materiais que manifestaram, respectivamente, a menor e a maior permeabilidade), apresentaram os melhores resultados no GWIT. Contudo, em virtude do escopo limitado do presente trabalho, qualquer afirmação categórica sobre a ausência de correlação em outros materiais carece de pesquisas complementares;

- (vii) uma tentativa de explicar a temperatura de ignição 50° C maior no PINR em relação ao PINR pode estar relacionada à maior concentração de lignina nas coníferas. Nesta seara, como a lignina tem uma série de grupos hidroxila reativos em sua estrutura [70], a taxa de reação de fosforilação apresentada no item 2.5.1 [66][70] pode ter sido maior nas coníferas, potencializando a formação da camada carbonácea e a diluição na fase gasosa. Porém, em virtude de não ter sido encontrado na literatura dados específicos sobre a concentração de lignina nesses materiais, não se pode estabelecer tal correlação.

## CONCLUSÃO

---

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo aplicar métodos de ensaio de reação ao fogo alternativos aos preconizados no Brasil para a avaliação da retardância à chama em madeiras. Para tanto, os corpos de prova foram tratados superficialmente com retardante de chamas à base de fósforo seguindo recomendações do fabricante. Em seguida, foram confrontados parâmetros de ignitabilidade e liberação de calor de um exemplar de dicotiledônea (*Eucalyptus dunnii*), de conífera (*Pinus elliottii*) e de madeira industrializada (MDF) obtidos através do cone calorímetro e do fio incandescente, seguindo os procedimentos de preparação das amostras, calibração e ensaio preconizados nas normas ASTM E 2102-08 e IEC 60695-2-10:2000, IEC 60695-2-12:2000, IEC 60695-2-13:2000, respectivamente. Além das observações apontadas no decorrer da dissertação, as seguintes conclusões merecem ser especialmente destacadas:

- (i) o MDFN empregado no ensaio não ignitou e se enquadrou como um material retardante de chamas (*fire retardant*), por ter atendido os limites de  $THR_{5min}$  e de PHRR da classificação de inflamabilidade de materiais da *Building Standards Law* do Japão [51]. Entretanto, o MDFR não atendeu os parâmetros da aludida norma, por ter ultrapassado o limite de  $8 \text{ MJ/m}^2$  no  $THR_{5min}$ ;
- (ii) o MDFR ignitou após 500 segundos de ensaio e aumentou o PHRR em 29,72%, o  $THR_{5min}$  em 80,70% e o  $THR_{10min}$  em 66,95% em relação ao MDFN. Em virtude do comportamento não esperado, buscou-se explicações para tal fenômeno na literatura, não sendo, contudo, encontrado qualquer registro;
- (iii) os coeficientes de variação de parâmetros relacionados à liberação de calor e ao tempo de ignição do *E. dunnii* e do *P. elliottii*, respectivamente, foram altos no



ensaio do CCPM. Tal observação indica que o número de corpos de prova para o ensaio de tais materiais (madeiras naturais) deve ser maior do que o previsto na ASTM E2102-08 [77] a fim de que o coeficiente de variação seja minorado;

- (iv) as curvas de liberação de calor do EUCN e do EUCR revelaram comportamento típico de madeiras, *i. e.*, com dois picos de HRR [6][47][48]. Já o PINR e o PINN apresentaram apenas um pico de HRR, diferentemente de outras espécies do gênero *Pinus* [14], ou seja, tanto com tratamento quanto sem tratamento, até o momento do PHRR, a camada carbonácea do *Pinus elliottii* não havia conferido a proteção à transferência de calor e liberação de voláteis descrita por Chung e Spearpoint [45];
- (v) a aplicação superficial do retardante de chamas à base de fósforo aumentou o tempo e reduziu o HRR entre o PHRR<sub>1</sub> e o PHRR<sub>2</sub> do *Eucalyptus dunnii*, em consonância a outra pesquisa envolvendo o mesmo tratamento [5]. No entanto, em virtude do aumento do tempo entre picos, tal redução no HRR no intervalo supracitado não implicou em redução no THR<sub>5min</sub> e no THR<sub>10min</sub>. Já a aplicação do retardante no *P. elliottii*, promoveu a redução do HRR após os 300 segundos de ensaio, contribuindo para a redução de 16,25% do THRR<sub>5min</sub>;
- (vi) o *Eucalyptus dunnii* e o *Pinus elliottii* tratados reduziram seus picos de HRR em relação aos materiais não tratados em 8,50% e 8,65%, respectivamente;
- (vii) em função dos resultados destacados nos itens (v) e (vi), a aplicação superficial de retardante de chamas à base de fósforo não conferiu redução significativa no PHRR e no THR do *Eucalyptus dunnii* e do *Pinus elliottii*, sobretudo se confrontados (i) com estudos envolvendo a aplicação por impregnação de retardante à base de fósforo em madeira compensada de *E. dunnii*, onde se registrou reduções superiores a 50% no PHRR e a 200% no THR<sub>5min</sub> [5], e (ii) com trabalhos que englobaram a impregnação por retardante à base de fósforo no *Pinus Desinflora* [52][76], que resultaram no enquadramento da madeira como retardante de chama, segundo a BSL do Japão [51];
- (viii) contudo, os materiais tratados apresentaram resultados significativos no ensaio do GWIT, resultando num aumento de 75°C, 125° C e 150°C, respectivamente no

*Eucalyptus dunnii*, no *Pinus elliottii* e no MDF [74]. Além disso, o tempo para extinção das chamas reduziu em todas as madeiras tratadas no ensaio GWFI;

- (ix) considerando a assertiva do item (viii), buscou-se a presença de correlação entre a permeabilidade e a eficiência do tratamento. O grau de permeabilidade observado seguiu a seguinte ordem decrescente: PIN, EUC e MDF, ou seja, os materiais que apresentavam a maior e a menor permeabilidade obtiveram os melhores resultados no ensaio GWIT, não havendo, portanto, a citada correlação. Contudo, em virtude do escopo limitado de materiais estudados, não é possível estabelecer a ausência desta correlação para todos os materiais;
- (x) haja vista as assertivas dos itens (ii), (vii) e (viii), para os materiais empregados no presente estudo, a aplicação superficial de retardante de chamas à base de fósforo promoveu melhorias significativas da reação ao fogo no que concerne à temperatura de ignição por material aquecido, fato que não se concretizou nas propriedades relacionadas à liberação de calor.

Além das contribuições supracitadas, os resultados do presente estudo permitiram a discussão sobre os atuais métodos de ensaio para avaliação da reação ao fogo dos materiais e da retardância à chama de madeiras. Neste bojo e considerando o momento ímpar no qual o Estado do Rio de Janeiro, capitaneado pelo Corpo de Bombeiros Militar, promove a revisão de seu Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico, incluindo uma nota técnica específica para o controle de materiais de acabamento e revestimento, revela-se a importância de perpetrar os seguintes apontamentos:

- (i) em virtude do PHRR ser considerado por uma gama de autores o principal parâmetro preditor da severidade dos incêndios [4][15][16][40], é notório que a avaliação da propriedade de liberação de calor não pode estar de fora da classificação da inflamabilidade dos materiais. Portanto, seria importante que os entes federativos brasileiros adotassem limites ao PHRR e ao THR dos materiais (como verificado no *Building Standard Law* do Japão) ou índices deduzidos a partir do PHRR, como o FIGRA, através do ensaio do SBI (preconizado na *Euroclass*). Neste caso, uma alternativa que implica na redução de custos de aquisição, instalação e operação do equipamento é empregar a metodologia que

envolve o uso do cone calorímetro aliado a modelos matemáticos ou *softwares*, como o *Conetools*, para prever satisfatoriamente os resultados do SBI [82];

- (ii) tendo em vista as diferentes eficiências na retardância à chama observadas nas madeiras estudadas, é essencial que os fabricantes de retardantes de chama para madeiras apresentem não só os resultados, mas os laudos dos ensaios executados, contendo, sobretudo, o tipo de madeira empregada e o confronto com a madeira sem tratamento;
- (iii) para facilitar a análise se determinada madeira atende ou não uma classe de inflamabilidade específica e, portanto, requer tratamento com retardante de chamas, é fundamental a criação de um banco de dados nacional contendo os resultados de ensaios e a consequente classificação dos materiais, nos moldes da CWFT - *Classification Without Further Testing* da Europa, apresentada no item 2.4.4.

## **5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o ensejo de promover o enriquecimento dos resultados e, conseqüentemente, das discussões sobre o tema, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- (i) confrontar resultados relacionados à liberação de calor e à temperatura de ignição entre madeiras tratadas superficialmente e por impregnação com retardantes de chamas;
- (ii) analisar a influência de parâmetros relacionados à permeabilidade na redução da liberação de calor e da temperatura de ignição de madeiras tratadas superficialmente com retardantes de chamas;
- (iii) estudar a influência da concentração de lignina das madeiras na redução da taxa de liberação de calor e da temperatura de ignição das madeiras tratadas com retardantes à base de fósforo;
- (iv) confrontar as taxas de carbonização entre madeiras que apresentam picos duplos de liberação de calor e madeiras que apresentam pico único;
- (v) comparar parâmetros relacionados à liberação de calor entre amostras tratadas e

não tratadas com retardantes de chamas à base de fósforo de materiais naturalmente enquadrados como retardantes de chamas pela BSL do Japão [51].

## REFERÊNCIAS

---

- [1] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *NFPA 550: guide to fire safety concepts tree*. [S.l.]: NFPA, 2017. Disponível em: <<http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=550>>. Acesso em: 10 de junho de 2017.
- [2] QUINTIERE, J. G. *Principles of fire behavior*. Nova Iorque: Delmar Publishers, 1997.
- [3] PAPASPYRIDES, C. D.; KILIARIS, P. *Polymer green flame retardants*. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [4] HIRSCHLER, M. M. Flame retardants and heat release: review of traditional studies on products and on groups of polymers. *Fire and Materials*, v. 39, p. 207-231, 2015.
- [5] LA, H.; ZHILIN, C.; FENG, F.; MIZI, F. Investigation of factory fire retardant treatment of eucalyptus plywood. *Forest Products Journal*, v.65, n. 7-8, p. 320-326, 2015.
- [6] MARNEY, D. C. O.; RUSSELL, L. J.; MANN, R. Fire performance of wood (*Pinus radiata*) treated with fire retardants and a wood preservative. *Fire and Materials*, v. 32, n. 6, p. 357-370, 2008.
- [7] HORROCKS, A. R.; PRICE, D. (Ed.). *Advances in fire retardant materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.
- [8] SEITO, A. I. *A segurança contra incêndio no Brasil*. São Paulo: Projeto Editora, 2008.
- [9] ROSS, R. J. (Ed.). *Wood handbook: wood as an engineering material*. 100. ed. Madison, EUA: USDA Forest Service; Forest Products Laboratory, 2010.
- [10] HORROCKS, A. R.; PRICE, D. (Ed.). *Fire retardant materials*. Cambridge: England Woodhead Publishing Limited, 2010.

- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575*: norma de desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- [12] BABRAUSKAS, V. Engineering variables to replace the concept of ‘noncombustibility’. *Fire Technology*, v. 53, n. 1, p. 353-373, 2017
- [13] ROCHA, M. A. F. *Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- [14] LOWDEN, L. A.; HULL, T. R. Flammability behavior of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, v. 2, p. 1-19, 2013.
- [15] BABRAUSKAS, V.; PEACOCK, R. D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard. *Fire Safety Journal*, v. 18, n. 3, p. 255-272, 1992
- [16] DEHAAN, J. D. *Kirk’s fire investigation*. 6. ed. Upper Saddle River, EUA: Pearson, 2007.
- [17] JIMENEZ, M.; GALLOU, H.; DUQUESNE, S.; JAMA, C.; BOURBIGOT, S.; COUILLENS, X.; SPERONI, F. New routes to flame retard polyamide 6,6 for electrical applications. *Journal of Fire Sciences*, v. 30, n. 6, p. 535-551, 2012
- [18] PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de madeira*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [19] SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, n. 65, p. 120-129, 2004.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190*: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- [21] SUBYAKTO; SUBIYANTO, B.; HATA, T.; KAWAI, S. Evaluation of fire-retardant properties of edge-jointed lumber from tropical fast-growing woods using cone calorimetry and a standard fire test. *Journal of Wood Science*, v. 49, n. 3, p. 241-247, 2003.
- [22] SILVA, M. R. *Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas*”. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [23] TANAKA, T.; AVRAMIDIS, S.; SHIDA, S. A preliminary study on ultrasonic treatment effect on transverse wood permeability. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 12, n. 1, p. 03-09, 2010.

- [24] HANSMANN, C.; GINDL, W.; WIMMER, R.; TEISCHINGER, A. Permeability of wood – a review. *Wood Research*, v. 47, n. 4, p. 1-16, 2002.
- [25] LEPAGE, E. N. (Coord.). Manual de preservação das madeiras. São Paulo: IPT, 1986.
- [26] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Sistema de informações de madeiras brasileiras*. São Paulo: IPT, 1989. p. 291. Relatório nº 27 078.
- [27] BRISOLA, S. H.; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis x urpphylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. *Scientia Forestalis*, v. 39, n. 91, p. 317-330, 2011.
- [28] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina*. Curitiba: [s.n.], 1988. p. 30.
- [29] ZELENER, N.; POLTRI, S. N. M.; BARTOLONI, N.; LÓPEZ, C. R.; HOPP, H. E. Selection strategy for a seedling seed orchard design based on trait selection index and genomic analysis by molecular markers: a case study for *Eucalyptus dunnii*. *Tree Physiology*, v. 25, n. 11, p. 1457-1467, 2005.
- [30] INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Chave de identificação de espécies florestais. *Eucalyptus dunnii maiden*. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/dunnii.asp>>. Acesso em: 15 de maio de 2017.
- [31] IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Produção de painéis compensados multilaminados de *Eucalyptus*. *Revista da Madeira*, n. 111, 2008.
- [32] MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*, v. 46, n.2, p. 19-26, 1996.
- [33] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *ANSI A208.2: medium density fiberboard (MDF) for interior applications*. [S.l.]: CPA, 2009.
- [34] ROSEBURG. Produtos. *Roseburg flame retardant Medite® FR*. Disponível em: <<http://www.roseburg.com/Product/medite-fr/>>. Acesso em: 30 de julho de 2017.
- [35] LEVAN, S.; WINANDY, J. Thermal degradation. In: SCHIEWIND, A. P. (Ed.). *Concise encyclopedia of wood and wood-based materials*. Nova Iorque: Pergamon, 1989. p. 271-273.
- [36] JANSSENS, M. Piloted ignition of wood: a review. *Fire and Materials*, v. 15, p. 151-167, 1991.

- [37] CONNOR, M. A.; VILJOEN, M. H.; ILIC, J. Relationships between wood density, wood permeability and charcoal yield. In: BRIDGWATER, A.V.; BOOCOOCK, D. G. B. (Ed.). *Development in thermochemical biomass conversion*. Dordrecht, Holanda: Springer, 1997. p. 82-96.
- [38] HUGI, E.; WUERSCH, M.; RISI, W.; WAKILI, K. G. Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species. *Journal of Wood Science*, v. 53, n. 1, p. 71-75, 2007.
- [39] JIANG, J.; LI, J.; HU, J.; FAN, D. Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 12, p.:2633-2637, 2010.
- [40] APTE, V. B. (Ed.). *Flammability testing of materials used in construction, transport and mining*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
- [41] VAN BLIJDERVEEN, M.; BRAMER, E. A.; BREM, G. Modelling piloted ignition of wood and plastics. *Waste Management*, v. 32, n. 9, p. 1659-1668, 2012.
- [42] BABRAUSKAS, V. Ignition of wood: a review of the state of art. *Journal of Fire Protection Engineering*, v. 12, n. 3, p. 163-189, 2002.
- [43] WHITE, R. H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science*, v. 19, n. 4, p. 446-452, 1987.
- [44] JANSSENS, M. Rate of release of wood products. *Fire Safety Journal*, v.17, n. 3, p. 217-238, 1991.
- [45] CHUNG, Y. J.; SPEARPOINT, M. Combustion Properties of Native Korean Wood Species. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, v. 9, n. 3, p. 118-125, 2007.
- [46] SCHARTEL, B.; HULL, T. R. Development of fire retarded materials - interpretation of cone calorimeter data. *Fire and Materials*, v. 31, n. 5, p. 327-354, 2007.
- [47] LEE, B. -H.; KIM, H. -S.; KIM, S.; LUO, J. Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 7, p. 3044-3050, 2011.
- [48] GREXA, O.; LÜBKE, H. Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter. *Polymer Degradation and Stability*, v. 74, p. 427-432, 2001.
- [49] SPEARPOINT, M. J.; QUINTIERE, J. G. Predicting the burning of wood using an integral model. *Combustion and Flame*, v. 123, n. 3 p. 308-325, 2000.



- [50] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *NFPA 703: standard for fire retardant-treated wood and fire-retardant for buildings materials*". [S.l.]: NFPA, 2018. Disponível em: <<http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=703>>. Acesso em: 20 fev 2017>.
- [51] HAKKARAINEN, T.; HAYASHI, Y. Comparison of Japanese and European fire classification systems for surface linings. *Fire Science and Technology*, v. 21, n. 1, p. 19-42, 2001.
- [52] HARADA, T.; NAKASHIMA, Y.; ANAZAWA, Y. The effect of ceramic coating of fire-retardant wood on combustibility and wheatherability. *Journal of Wood Science*, v. 53, n. 3, p. 249-254, 2007.
- [53] UNIÃO EUROPEIA. *EN 13501-1: fire classification of construction products and building elements*. Europa, 2007.
- [54] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1182: reaction to fire tests for products – non-combustibility test*. 5. ed., Suíça, 2010.
- [55] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1716: reaction to fire tests for products - determination of the gross heat of combustion (calorific value)*. 3. ed., Suíça, 2010.
- [56] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 9239-1: reaction to fire tests for floorings - part 1: determination of the burning behaviour using a radiant heat source*. 3. ed., Suíça, 2010.
- [57] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 11925-2: reaction to fire tests - ignitability of products subjected to direct impingement of flame - part 2: single-flame source test*. 3. ed., Suíça, 2010.
- [58] UNIÃO EUROPEIA. *EN 13823: reaction to fire tests for building products - building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item*. Europa, 2014.
- [59] MIKKOLA, E. Review of reaction to fire performance of wood based products. *Structural Building Components Association*, n. 119, 2004.
- [60] ÖSTMAN, B.; BOSTRÖM, L. Fire protection ability of wood coverings. *Fire Technology*, v. 51, p. 1475-1493, 2015.
- [61] OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Commission decision of 17 January 2003 establishing the classes of reaction to fire performance for certain construction products. 18/01/2003, L. 13/35, p. 35-36.

- [62] CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Instrução Técnica 10/2004*: controle de materiais de acabamento e revestimento. São Paulo, 2004.
- [63] CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Instrução Técnica 10/2011*: controle de materiais de acabamento e revestimento. São Paulo, 2011.
- [64] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9442*: materiais de construção: determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.
- [65] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E 662-17a*: standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials. West Conshohocken, PA, EUA, 2017.
- [66] GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, SP, v. 8, n. 1, p. 23-37, jan-mar. 1998.
- [67] GREEN, J. An overview of the fire retardant chemicals industry, past-present-future. *Fire and Materials*, v. 19, n. 5, p. 197-204, 1995.
- [68] WANG, F.; WANG, Q.; WANG, X. Progress in research on fire retardant-treated wood and wood-based composites: a Chinese perspective. *Forest Products Journal*, v. 60, n. 7-8, p. 668-678, 2010.
- [69] VAN DER VEEN, I.; DE BOER, J. Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, v. 88, n. 10, p. 1119-1153, 2012.
- [70] PRIEUR, B.; MEUB, M.; WITTERMANN, M.; KLEIN, R.; BELLAYER, S.; FONTAINE, G.; BOURBIGOT, S. Phosphorylation of lignin: characterization and investigation of the thermal decomposition. *RSC Advances*, v. 7, p. 16866-16877, 2017.
- [71] MOSTASHARI, S. M.; BAIE, S. TG Studies of synergism between red phosphorus – calcium chloride used in flame-retardancy for a cotton fabric to green chemistry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Budapest, Hungria, v. 99, n. 2, p. 431-436, 2010.
- [72] LU, S. -Y.; HAMERTON, I. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant materials. *Progress in Polymer Science*, v. 27, n. 8, p. 1661-1712, 2002.

- [73] ACQUASANTA, F.; BERTI, C.; COLONNA, M.; FIORINI, M.; SREEPADARAJ, K. Study of glow wire ignition temperature (GWIT) and comparative tracking index (CTI) performances of engineering thermoplastics and correlation with material properties. *Polymer Degradation and Stability*, v. 96, n. 4, p. 566-573, 2011.
- [74] RIBEIRO, S. P. S.; ESTEVÃO, L. R. M.; NASCIMENTO, R. S. V. Glow-wire evaluation of polymeric materials for the electric sector: Effect of the interlayer spacing of montmorillonite. 2017. *Applied Clay Science*, v. 143, p. 399-407, 2017.
- [75] SEO, H. J.; KIM, S.; HUH, W.; PARK, K. -W.; LEE, D. R.; SON, D. W.; KIM, Y. -S. Enhancing the flame-retardant performance of wood-based materials using carbon-based materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 123, p.1935-1942, 2016.
- [76] HARADA, T.; UESUGI, S.; TANIUCHI, H. Evaluation of fire-retardant wood treated with poly-phosphatic carbamate using a cone calorimeter. *Forest Products Journal*, v. 56, n. 6, p. 81-85, 2003.
- [77] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E2102-08*: test method for measurement of mass loss and ignitability for screening purposes using a cone calorimeter. West Conshohocken, PA, EUA, 2008.
- [78] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60695-2-13*. fire hazard testing: part 2-12: glowing/hot-wire based test methods - glow wire ignition temperature test method for materials. Geneva, Suíça, 2000.
- [79] CKC DO BRASIL LTDA. *Catálogo CKC-2020*: retardante antichamas para madeira crua. São Paulo: [s.n.], 2015.
- [80] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8660*: revestimento de piso: determinação da densidade crítica de fluxo de energia térmica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- [81] SCHARTEL, B.; BARTHOLMAI, M.; KNOLL, U. Some comments on the use of cone calorimeter data. *Polymer Degradation and Stability*, v. 88, n. 3, p. 540-547, 2005.
- [82] VAN HEES, P.; HERTZBERG, T.; STEEN-HANSEN, A. Development of a screening method for the SBI and room corner using the cone calorimeter. *SP Swedish National Testing and Research Institute*, n. 11, 2002.
- [83] JANSSENS, M.; HUCZEK, J.; SAUCEDA, A. Development of a model of the ASTM E 84 Steiner tunnel test. *Fire Safety Science*, v. 9, p. 279-289, 2008.

- [84] HUGGETT, C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, v. 4, n. 2, p. 61-65, 1980.
- [85] BABRAUSKAS, V. Development of the cone calorimeter: a bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. *National Bureau of Standards*, v. NBSIR 82-2611, 1982.
- [86] BABRAUSKAS, V.; MULHOLLAND, G. Smoke and soot data determinations in the cone calorimeter. In: MEHAFFEY, J. R. (Ed.). *Mathematical modeling of fires*. Philadelphia, EUA: ASTM STP 983, 1987. p. 83-104.
- [87] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM. E 1354-11b*: standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter. West Conshohocken, PA, EUA, 2011.
- [88] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 5660-1*: reaction-to-fire tests - heat release, smoke production and mass loss rate - part 1: heat release rate (cone calorimeter method). 2. ed., Suíça, 2002.
- [89] ROCHA, M. A. F. *Determinação experimental da reação ao fogo e do desempenho mecânico de compósitos à base de PRFV com propriedades antichama*. Tese: Doutorado. Programa de Engenharia Civil. Coppe. UFRJ. 2017.
- [90] GARCIA, C. H. *Tabelas para classificação do coeficiente de variação*. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1989. Circular técnica, n. 171.
- [91] GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 139. ed., São Paulo: Piracicaba, 1985.
- [92] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60695-2-10*: fire hazard testing glowing/hot-wire based test methods: part 2-10: glow wire apparatus and common test procedure. Geneva, Suíça, 2000.
- [93] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60695-2-12*. fire hazard testing glowing/hot-wire based test methods: part 2-10: glow-wire flammability index (GWFI) test method for materials. Geneva, Suíça, 2000.

# A

## ***APÊNDICE A: Resultados experimentais do MLCC***

---

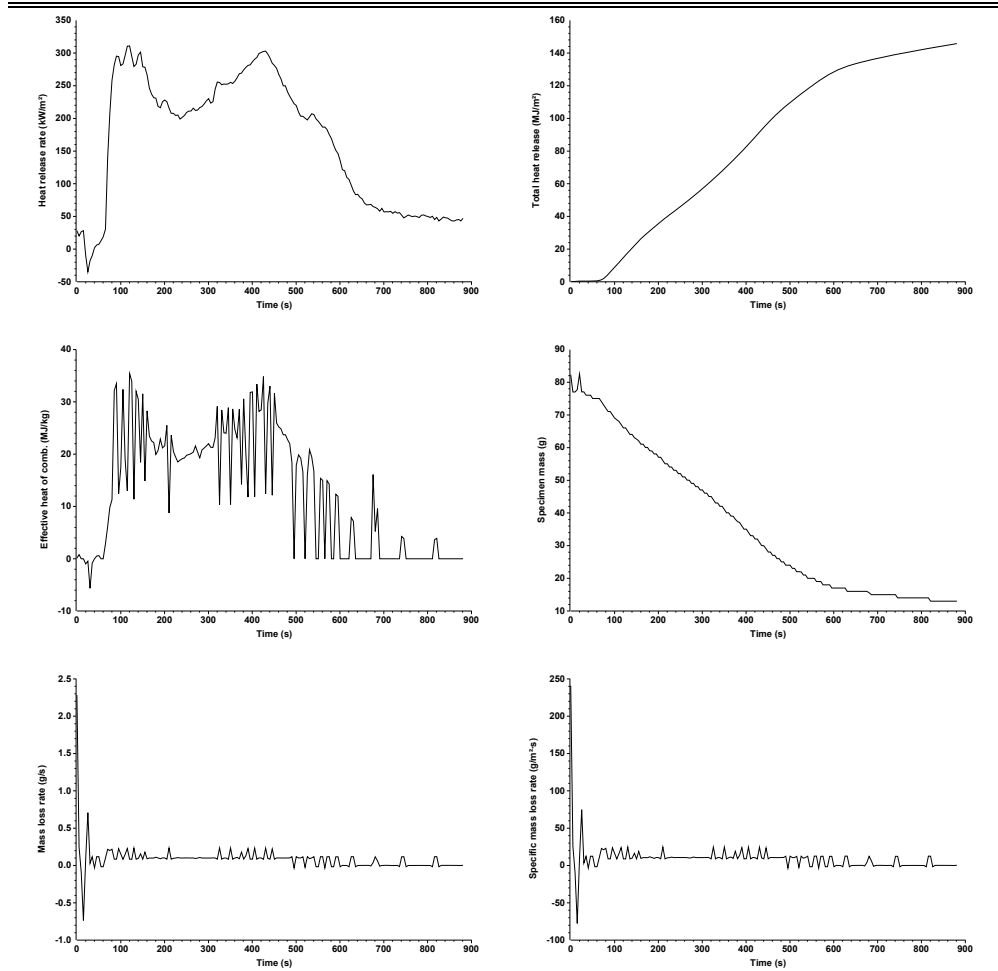
O presente apêndice traz o resumo dos relatórios obtidos através do MLCCalc durante a campanha experimental no MLCC. Os dados são apresentados através das seguintes curvas: (i) liberação de calor – HRR, (ii) calor total liberado no ensaio – THR, (iii) calor efetivo de combustão – EHC, (iv) massa total perdida – TML, (v) taxa de perda de massa e (vi) taxa de perda de massa específica – *Specific Mass Loss Rate*, todas em função do tempo e atendendo a seguinte ordem: *E. dunnii* não tratado, *E. dunnii* tratado, MDF não tratado, MDF tratado *P. elliottii* não tratado e *P. elliottii* tratado.

Test times		Test results (between 0 and 760 s)	
Time to ignition	68 s	Total heat release	140.1 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	760 s	Initial mass	82.3 g
End of test time (for calculations)	760 s	Mass at EOT	14.0 g
		Mass lost	68.3 g
		Specific mass lost	7.20 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	83.0 %

Test results (between 68 and 760 s)					
		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	139.3 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	201.26	310.80	120
Mass at sustained flaming	75.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	21.94	35.41	120
Mass at EOT	14.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.087	0.233	210
Mass lost	61.0 g				
Specific mass lost	6.43 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	81.3 %				
Average specific MLR	12.11 a/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	249.39	243.89
Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.35	19.80
Mass loss rate (g/s)	0.124	0.118

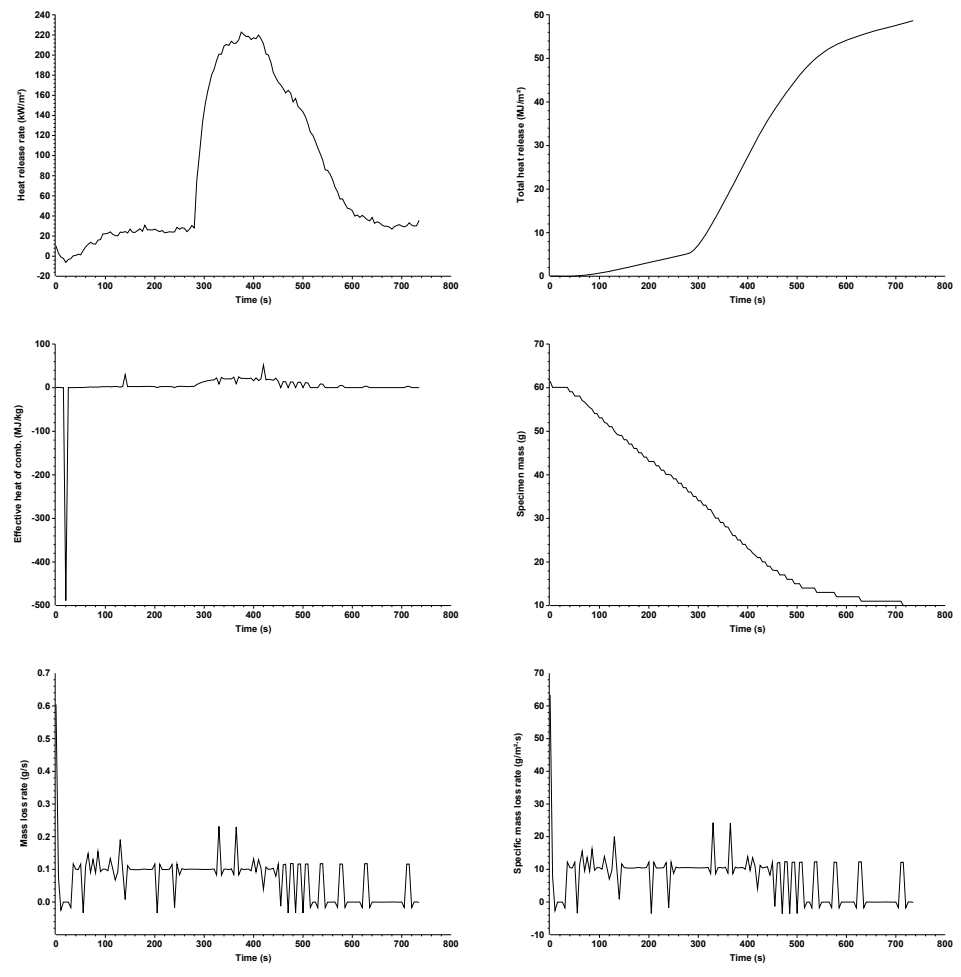


**Figura A-1:** resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN1.

Test times		Test results (between 0 and 618 s)	
Time to ignition	281 s	Total heat release	54,7 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	618 s	Initial mass	61.5 g
End of test time (for calculations)	618 s	Mass at EOT	12.0 g
		Mass lost	49.5 g
		Specific mass lost	5.19 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	80.4 %

Test results (between 281 and 618 s)			
Total heat release	49.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 147.62 <b>Peak</b> 222.62 <b>at time (s)</b> 375
Mass at sustained flaming	36.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.64 51.97 420
Mass at EOT	12.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.071 0.232 330
Mass lost	24.0 g		
Specific mass lost	2.52 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	66.6 %		
Average specific MLR	9.59 g/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	191.59	159.76	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	17.30	19.04	
Mass loss rate (g/s)	0.103	0.079	

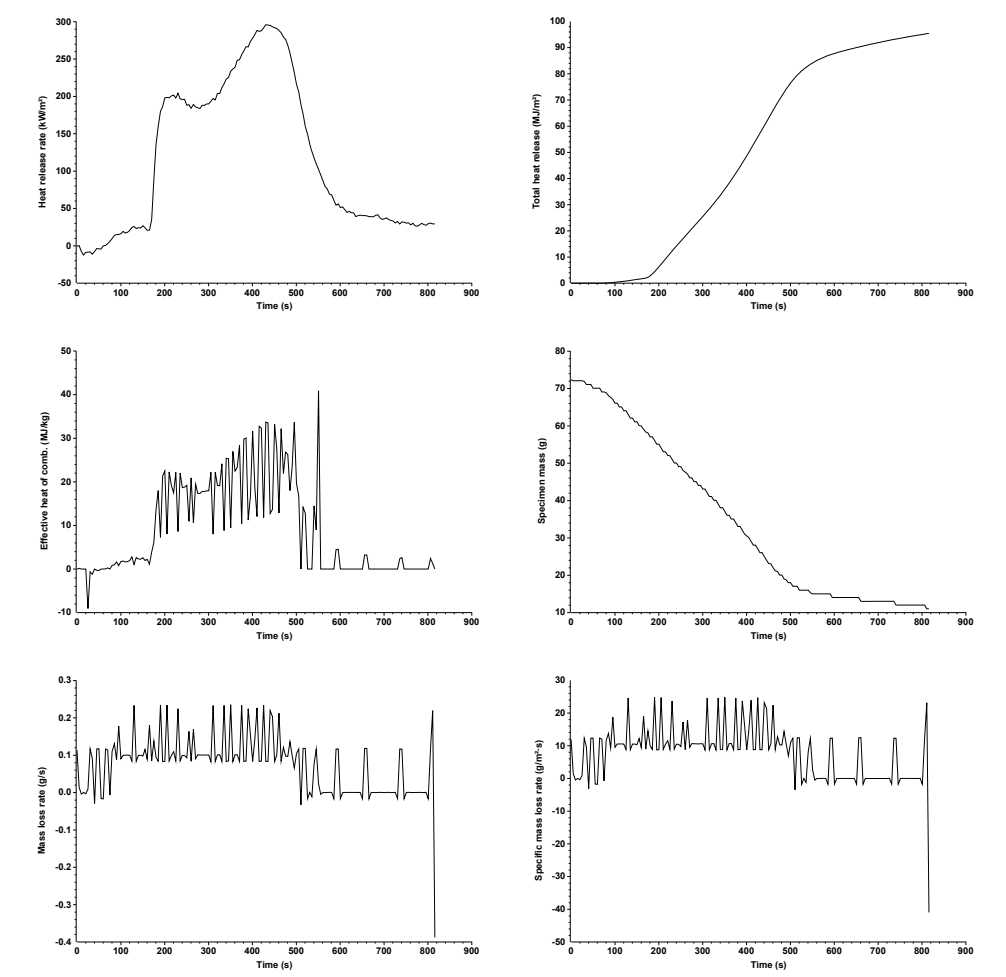


**Figura A-2:** resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN2.

Test times		Test results (between 0 and 694 s)	
Time to ignition	171 s	Total heat release	91.6 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	694 s	Initial mass	72.3 g
End of test time (for calculations)	694 s	Mass at EOT	13.0 g
		Mass lost	59.3 g
		Specific mass lost	6.27 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	82.0 %

Test results (between 171 and 694 s)			
Total heat release	89.7 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 172.21 Peak 295.63 at time (s) 430
Mass at sustained flaming	58.3 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	18.82 40.85 550
Mass at EOT	13.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.086 0.235 350
Mass lost	45.3 g		
Specific mass lost	4.79 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	77.7 %		
Average specific MLR	12.56 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	193.60	226.84	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	14.99	16.94	
Mass loss rate (g/s)	0.120	0.125	



**Figura A-3:** resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN3.



Test times		Test results (between 0 and 571 s)	
Time to ignition	156 s	Total heat release	92.2 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	571 s	Initial mass	71.0 g
End of test time (for calculations)	571 s	Mass at EOT	13.0 g
		Mass lost	58.0 g
		Specific mass lost	6.05 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	81.7 %

Test results (between 156 and 571 s)				
		Mean	Peak	at time (s)
Total heat release	89.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	216.33	375
Mass at sustained flaming	56.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.99	390
Mass at EOT	13.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.104	290
Mass lost	43.0 g			
Specific mass lost	4.49 kg/m <sup>2</sup>			
Percentage mass lost	76.8 %			
Average specific MLR	13.56 a/(m <sup>2</sup> ·s)			

Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		224.37	264.49
Effective heat of comb. (MJ/kg)		16.12	18.53
Mass loss rate (g/s)		0.132	0.136

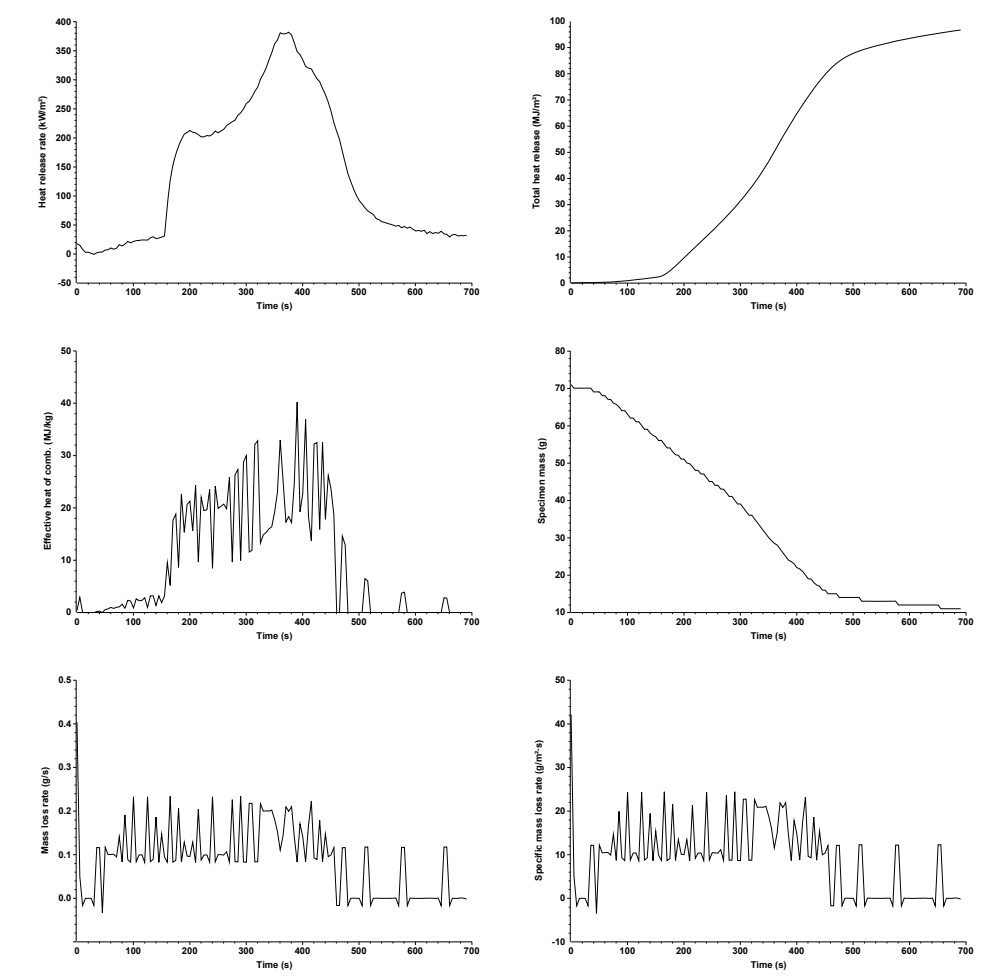


Figura A-4: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCN4.

Test			
Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	24 March 2017	Separation	25 mm
Time of test	17:29	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	24 March 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW
Test times		Test results (between 0 and 601 s)	
Time to ignition	106 s	Total heat release	95.8 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	601 s	Initial mass	69.9 g
End of test time (for calculations)	601 s	Mass at EOT	16.0 g
		Mass lost	53.9 g
		Specific mass lost	5.63 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	77.1 %
Test results (between 106 and 601 s)			
Total heat release	93.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 187.86 Peak 306.83 at time (s) 415
Mass at sustained flaming	62.8 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	18.93 69.87 295
Mass at EOT	16.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.094 0.234 350
Mass lost	46.8 g		
Specific mass lost	4.89 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	74.5 %		
Average specific MLR	11.50 a/(m <sup>2</sup> ·s)		
Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	177.49	198.05
	Effective heat of comb. (MJ/kg)	15.63	16.73
	Mass loss rate (g/s)	0.109	0.113

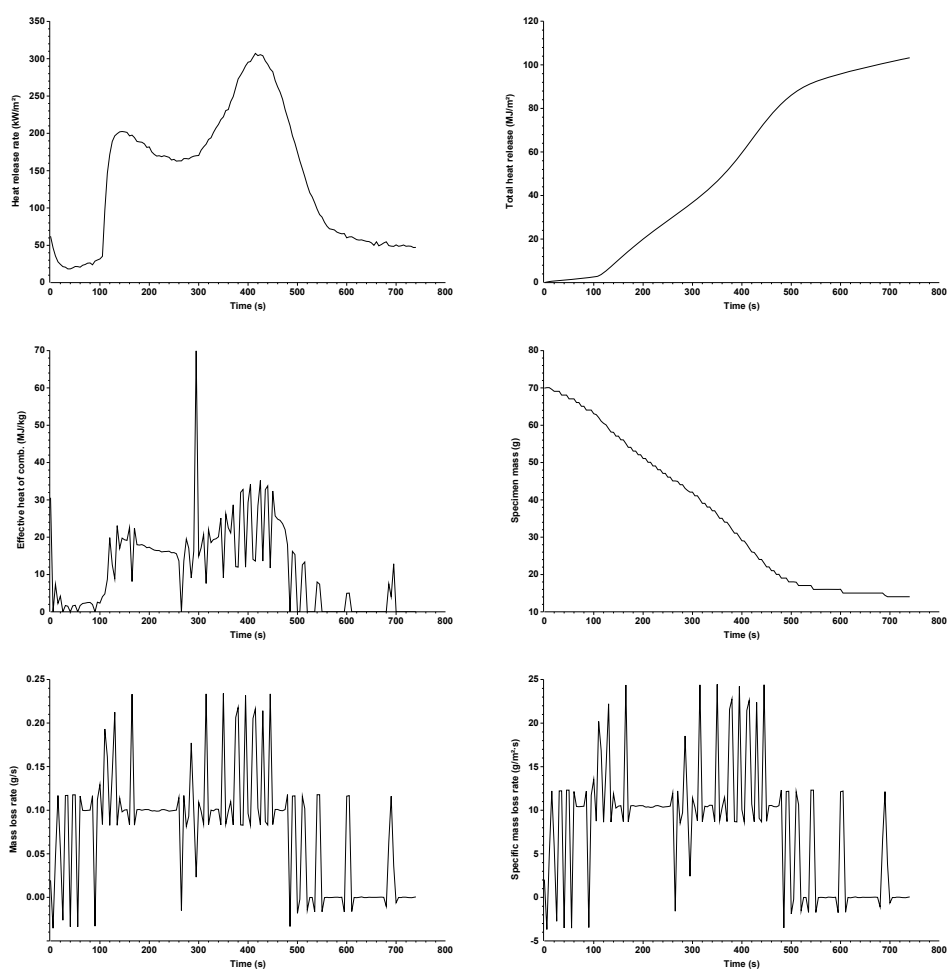


Figura A-5: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR1.

Test		Test results (between 0 and 592 s)	
Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	24 March 2017	Separation	25 mm
Time of test	18:06	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	24 March 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW
Test times		Test results (between 137 and 592 s)	
Time to ignition	137 s	Total heat release	81.0 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	592 s	Initial mass	65.1 g
End of test time (for calculations)	592 s	Mass at EOT	12.0 g
		Mass lost	53.1 g
		Specific mass lost	5.56 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	81.5 %
Test results (between 137 and 592 s)			
Total heat release	79.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 174.46 Peak 314.15 at time (s) 345
Mass at sustained flaming	54.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	18.49 35.66 350
Mass at EOT	12.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.090 0.234 265
Mass lost	42.0 g		
Specific mass lost	4.40 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	77.7 %		
Average specific MLR	13.04 a/(m <sup>2</sup> ·s)		
Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	199.82	230.79
	Effective heat of comb. (MJ/kg)	14.95	17.40
	Mass loss rate (g/s)	0.128	0.128

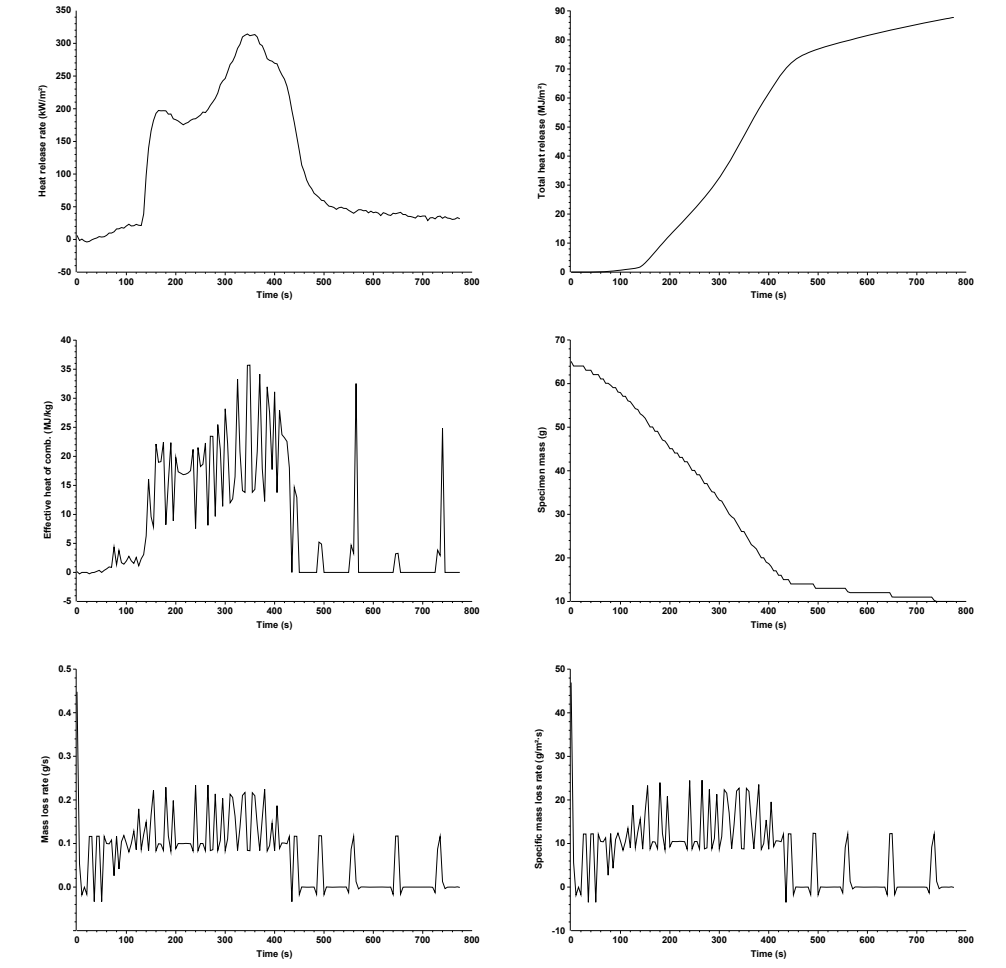


Figura A-6: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR2.

Test times		Test results (between 0 and 747 s)	
Time to ignition	164 s	Total heat release	92.4 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	747 s	Initial mass	77.0 g
End of test time (for calculations)	747 s	Mass at EOT	17.0 g
		Mass lost	60.0 g
		Specific mass lost	6.23 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	77.9 %

Test results (between 164 and 747 s)			
Total heat release	91.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 155.81 <b>Peak</b> 242.26 <b>at time (s)</b> 500
Mass at sustained flaming	66.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	18.29 52.81 225
Mass at EOT	17.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.082 0.234 460
Mass lost	49.0 g		
Specific mass lost	5.09 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	74.2 %		
Average specific MLR	9.93 g/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
	<b>from ignition to ignition plus...</b>	<b>180 s</b>	<b>300 s</b>
	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	149.15	158.98
	Effective heat of comb. (MJ/kg)	14.38	15.32
	Mass loss rate (g/s)	0.100	0.100

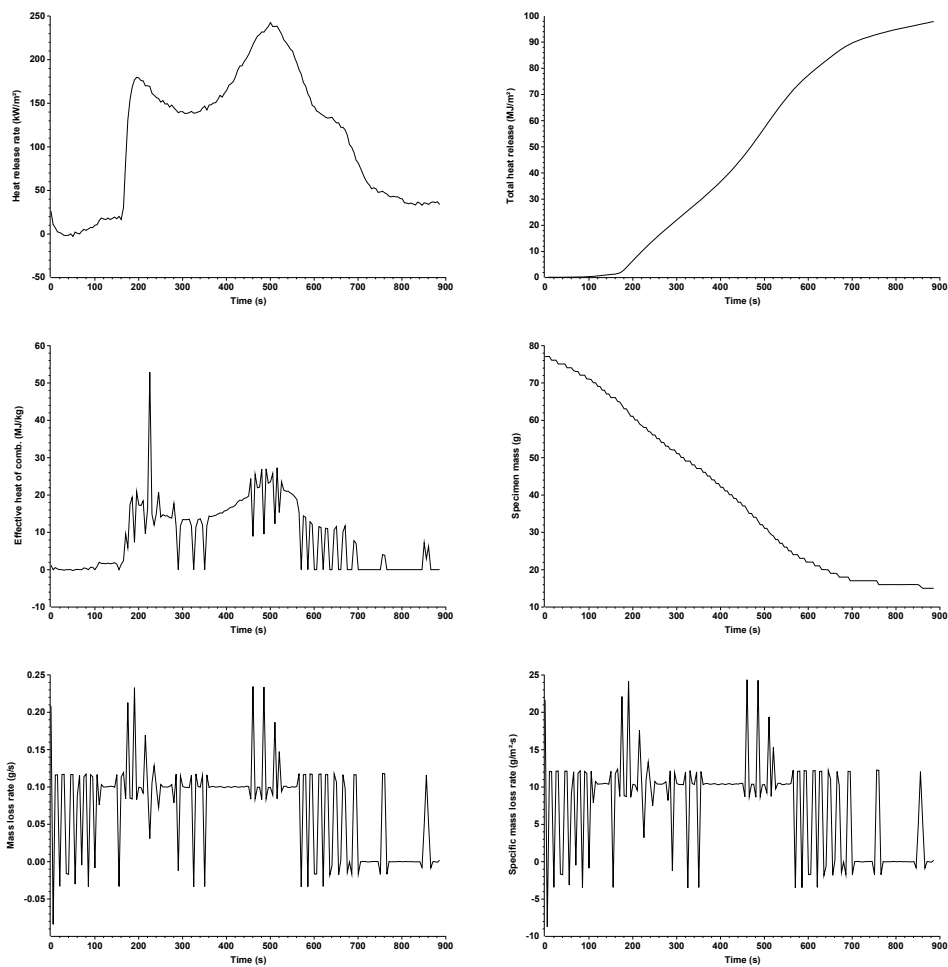


Figura A-7: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR3.

Test times		Test results (between 0 and 646 s)	
Time to ignition	113 s	Total heat release	92.5 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	646 s	Initial mass	74.6 g
End of test time (for calculations)	646 s	Mass at EOT	17.0 g
		Mass lost	57.6 g
		Specific mass lost	5.99 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	77.2 %

Test results (between 113 and 646 s)			
Total heat release	91.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 171.42 <b>Peak</b> 317.14 <b>at time (s)</b> 470
Mass at sustained flaming	67.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	17.99    69.38    225
Mass at EOT	17.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.092    0.234    245
Mass lost	50.0 g		
Specific mass lost	5.20 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	74.6 %		
Average specific MLR	11.25 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		153.87	167.73
Effective heat of comb. (MJ/kg)		14.03	15.12
Mass loss rate (g/s)		0.105	0.107

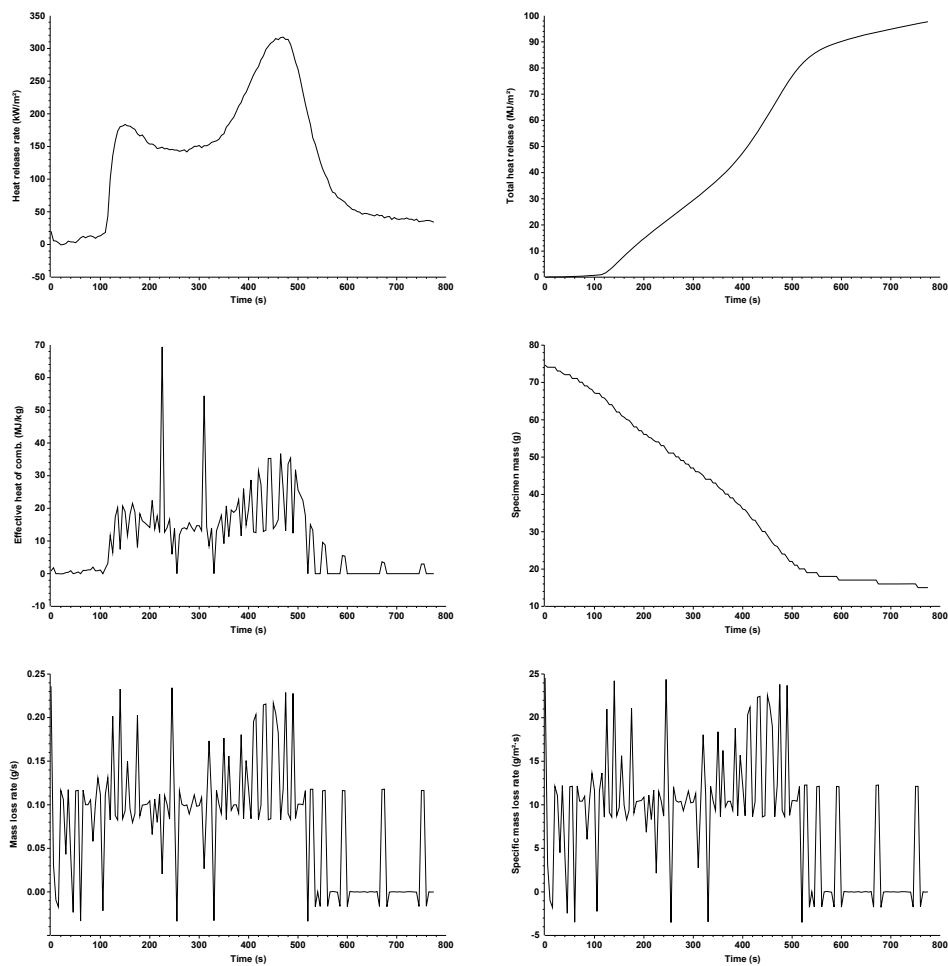


Figura A-8: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra EUCR4.

Test times		Test results (between 0 and 600 s)	
Time to ignition	not recorded	Total heat release	13.1 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	s	Initial mass	67.7 g
End of test time (for calculations)	600 s	Mass at EOT	13.0 g
		Mass lost	54.7 g
		Specific mass lost	5.47 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	80.8 %

Test results (between 0 and 600 s)			
Total heat release	13.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 21.35 Peak 47.27 at time (s) 330
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	2.34 55.28 600
Mass at EOT	13.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.091 0.317 330
Mass lost	54.7 g		
Specific mass lost	5.47 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	80.8 %		
Average specific MLR	15.08 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		11.88	18.42
Effective heat of comb. (MJ/kg)		1.04	1.51
Mass loss rate (g/s)		0.114	0.123

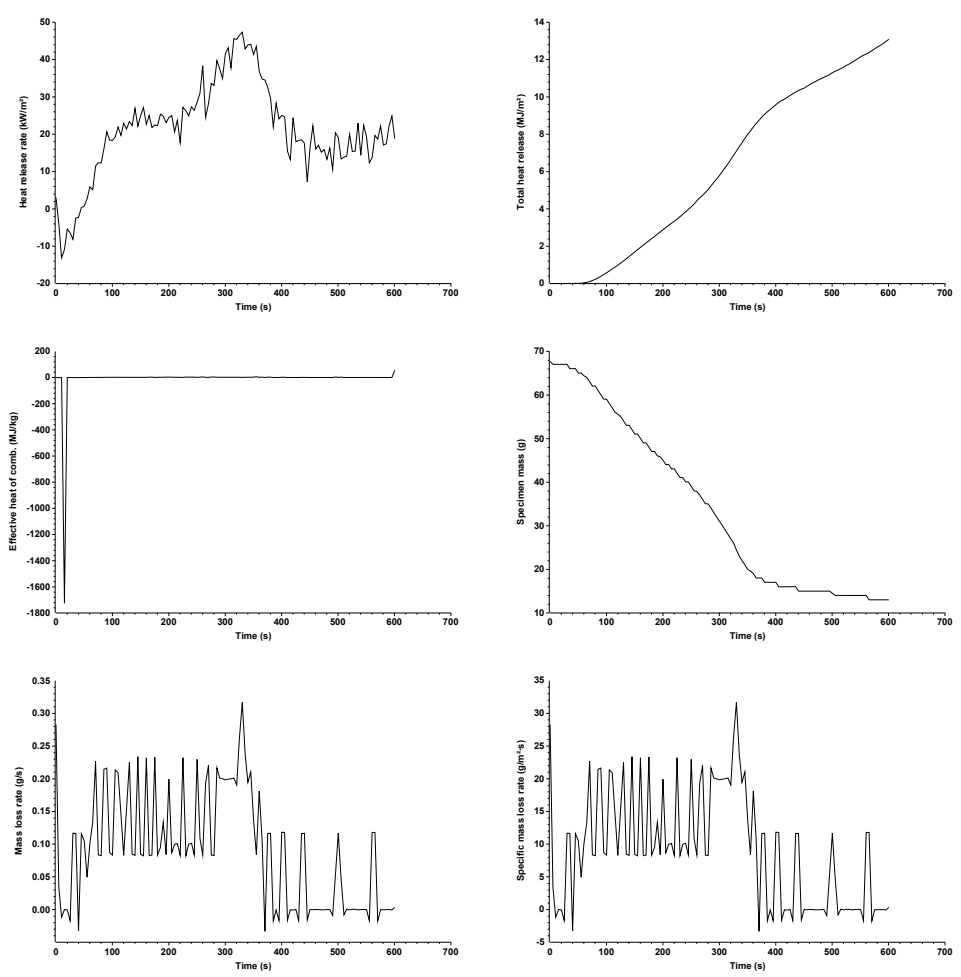


Figura A-9: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN1.

Test times		Test results (between 0 and 600 s)	
Time to ignition	not recorded	Total heat release	15.6 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	s	Initial mass	67.8 g
End of test time (for calculations)	600 s	Mass at EOT	14.0 g
		Mass lost	53.8 g
		Specific mass lost	5.38 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	79.3 %

Test results (between 0 and 600 s)			
Total heat release	15.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 25.96 Peak 50.95 at time (s) 375
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	2.90 18.04 430
Mass at EOT	14.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.090 0.327 0
Mass lost	53.8 g		
Specific mass lost	5.38 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	79.3 %		
Average specific MLR	12.84 g/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
between time 0 and...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	14.81	19.50	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	1.42	1.84	
Mass loss rate (g/s)	0.104	0.106	

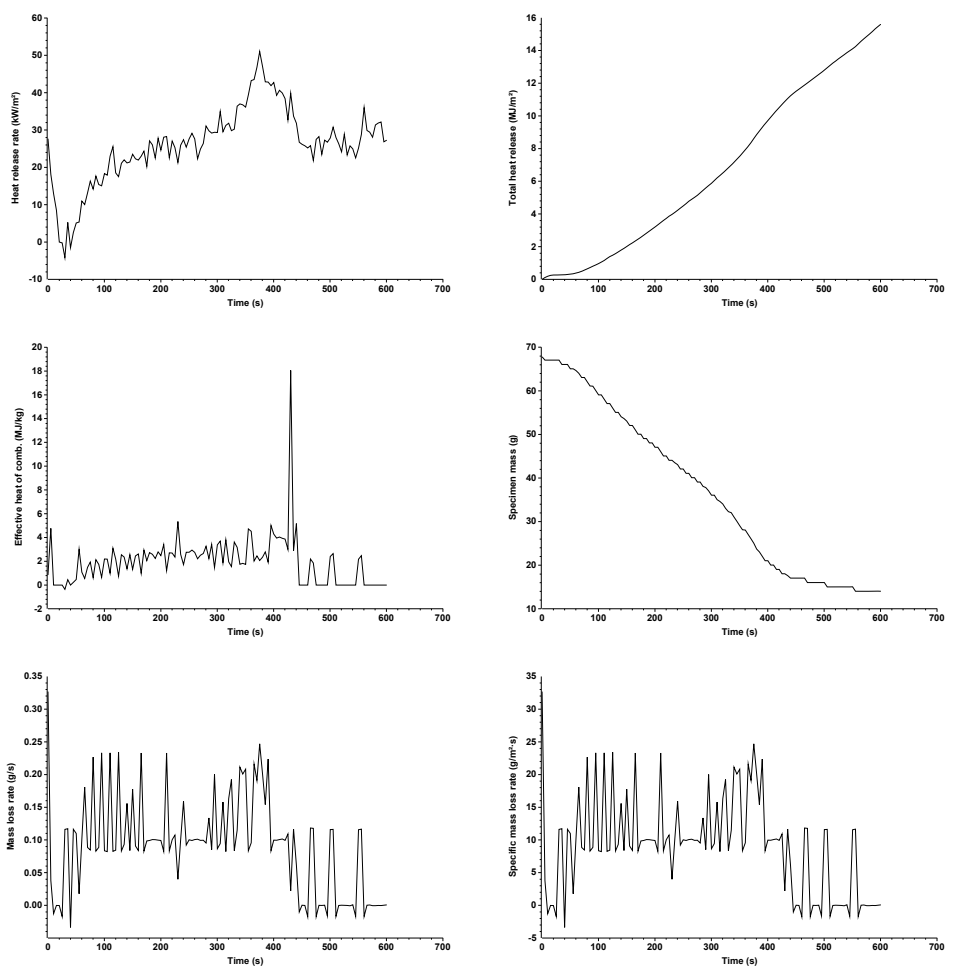


Figura A-10: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN2.

Test times		Test results (between 0 and 600 s)	
Time to ignition	not recorded	Total heat release	12.6 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	s	Initial mass	67.5 g
End of test time (for calculations)	600 s	Mass at EOT	13.0 g
		Mass lost	54.5 g
		Specific mass lost	5.46 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	80.7 %

Test results (between 0 and 600 s)					
		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	12.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	20.09	45.27	350
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	2.21	8.33	430
Mass at EOT	13.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.091	0.235	290
Mass lost	54.5 g				
Specific mass lost	5.46 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	80.7 %				
Average specific MLR	13.66 a/(m <sup>2</sup> ·s)				

Test averages			
between time 0 and...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	7.21	14.11	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	0.70	1.30	
Mass loss rate (g/s)	0.103	0.109	

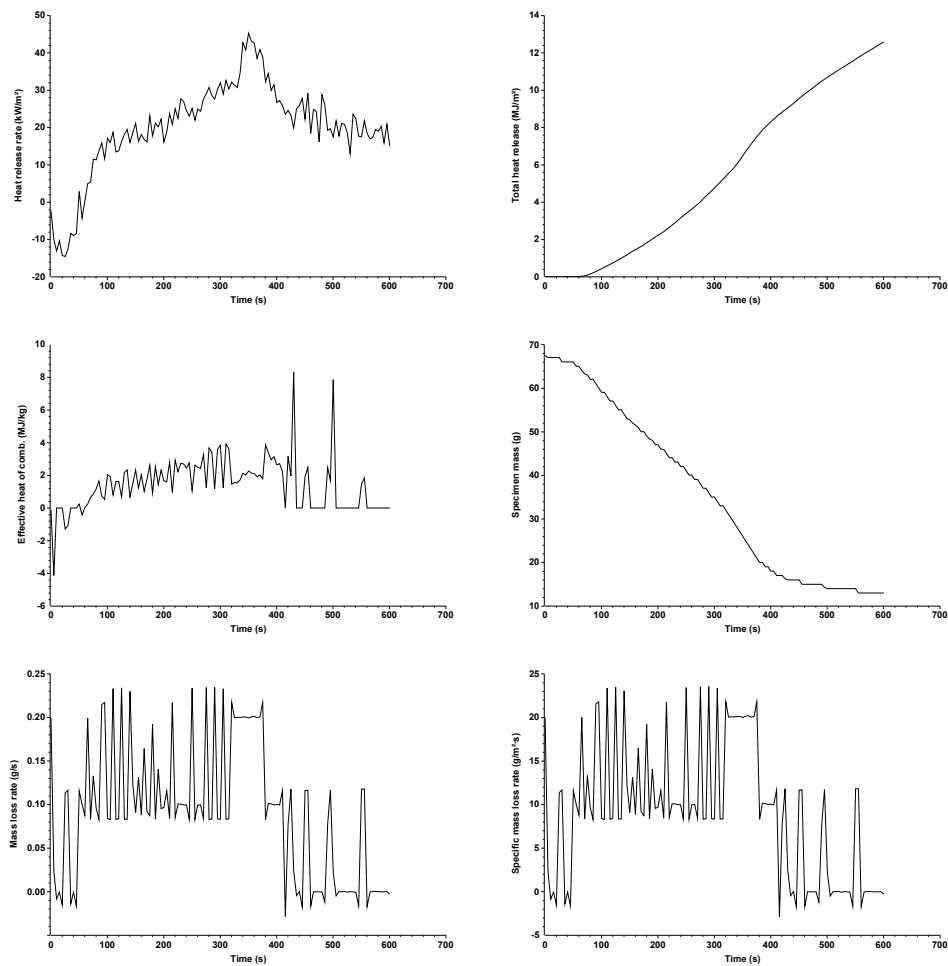


Figura A-11: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN3.



Test times		Test results (between 0 and 610 s)	
Time to ignition	not recorded	Total heat release	13.5 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	s	Initial mass	67.7 g
End of test time (for calculations)	610 s	Mass at EOT	14.0 g
		Mass lost	53.7 g
		Specific mass lost	5.38 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	79.3 %

Test results (between 0 and 610 s)			
Total heat release	13.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 21.75 <b>Peak</b> 46.78 <b>at time (s)</b> 350
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	2.47    4.77    370
Mass at EOT	14.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.088    0.281    330
Mass lost	53.7 g		
Specific mass lost	5.38 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	79.3 %		
Average specific MLR	14.34 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
between time 0 and...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	12.43	18.07	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	1.20	1.61	
Mass loss rate (g/s)	0.106	0.113	

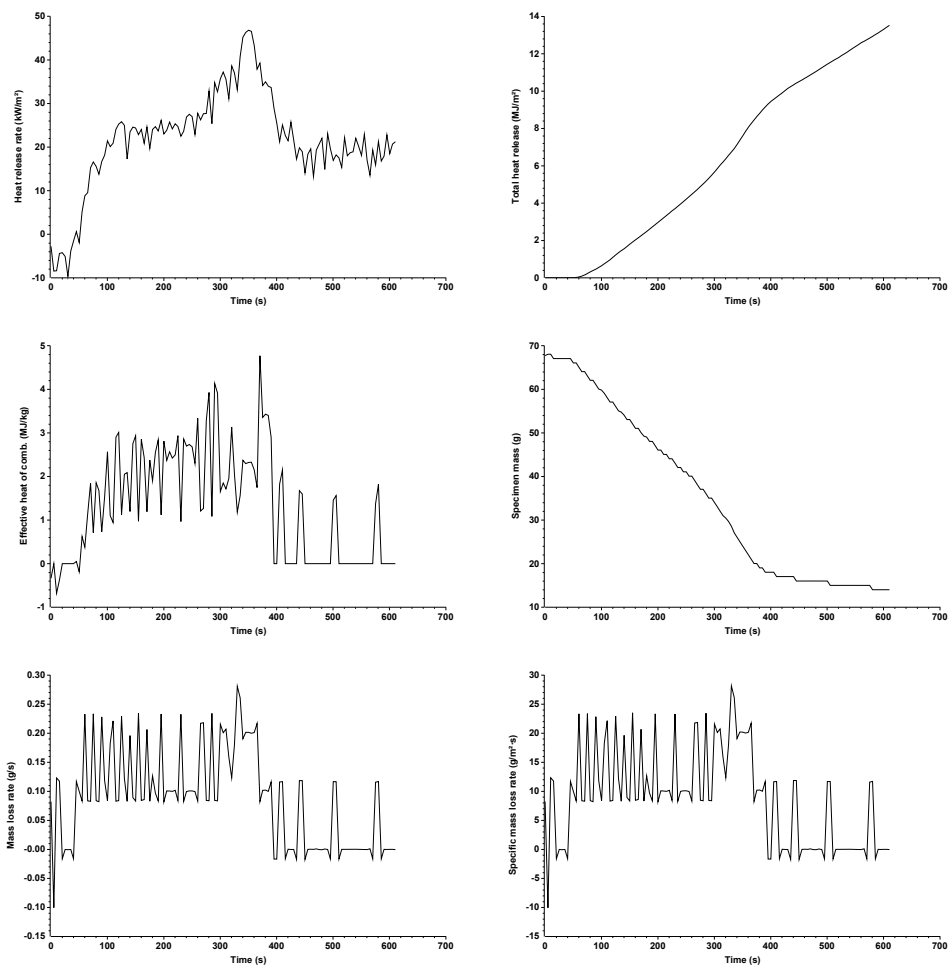


Figura A-12: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFN4.

Test times		Test results (between 0 and 605 s)	
Time to ignition	not recorded	Total heat release	16.4 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	s	Initial mass	68.9 g
End of test time (for calculations)	605 s	Mass at EOT	16.0 g
		Mass lost	52.9 g
		Specific mass lost	5.32 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	76.7 %

Test results (between 0 and 605 s)			
Total heat release	16.4 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean: 27.11, Peak: 53.32, at time (s): 425
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	3.08, 9.43, 570
Mass at EOT	16.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.087, 0.234, 170
Mass lost	52.9 g		
Specific mass lost	5.32 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	76.7 %		
Average specific MLR	11.67 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
between time 0 and...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	18.11	22.13	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	1.92	2.29	
Mass loss rate (g/s)	0.093	0.094	

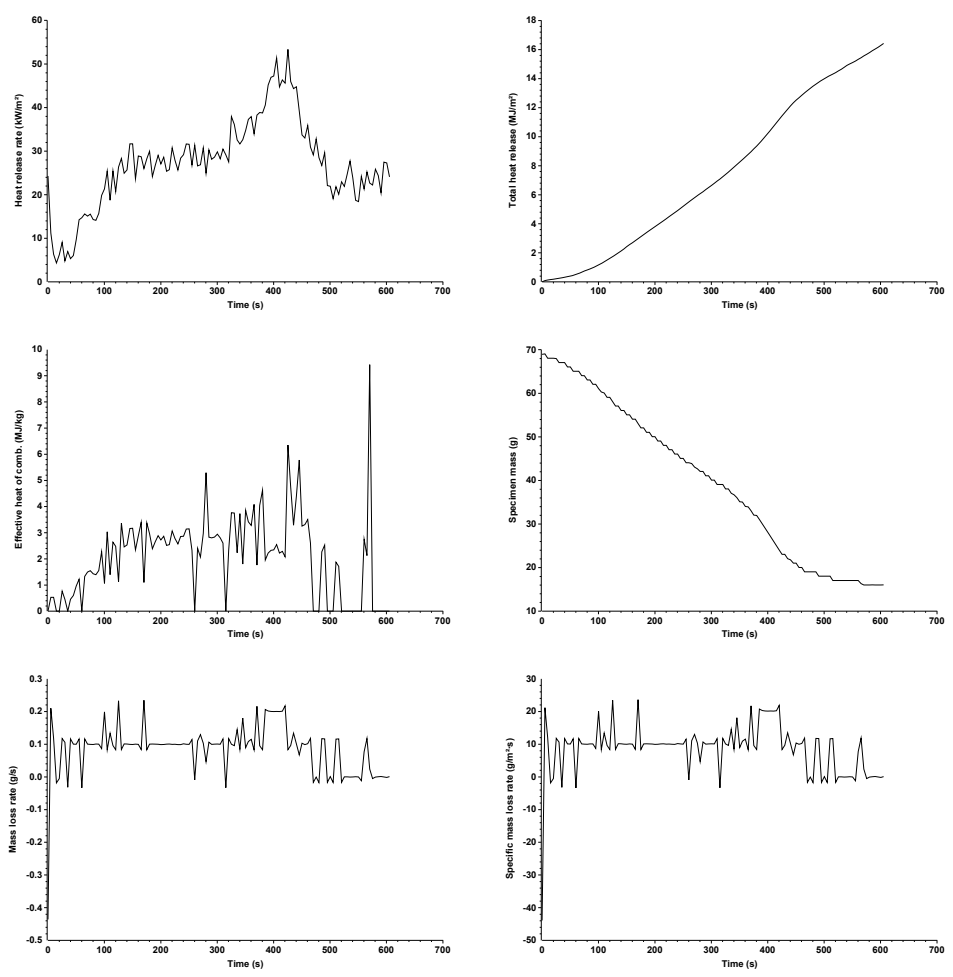


Figura A-13: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR1.

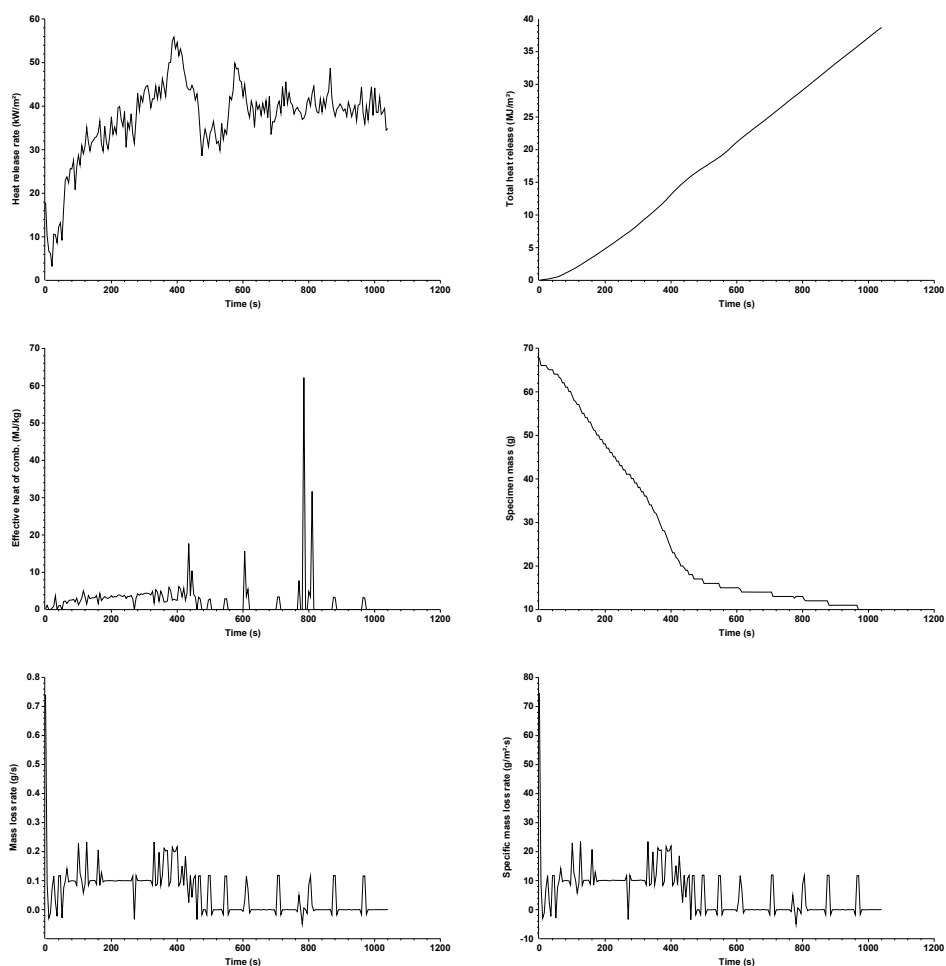
Test times		Test results (between 0 and 889 s)		
Time to ignition	553 s	Total heat release	32.6 MJ/m <sup>2</sup>	
Time to flameout	889 s	Initial mass	67.8 g	
End of test time (for calculations)	889 s	Mass at EOT	11.0 g	
		Mass lost	56.8 g	
		Specific mass lost	5.72 kg/m <sup>2</sup>	
		Percentage mass lost	83.7 %	

Test results (between 553 and 889 s)					
			Mean	Peak	at time (s)
Total heat release	13.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	40.74	49.79	575
Mass at sustained flaming	15.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	33.79	62.14	785
Mass at EOT	11.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.012	0.118	710
Mass lost	4.0 g				
Specific mass lost	0.40 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	26.6 %				
Average specific MLR	8.07 a/(m <sup>2</sup> .s)				

Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		41.03	40.64
Effective heat of comb. (MJ/kg)		36.52	40.33
Mass loss rate (g/s)		0.011	0.010



**Figura A-14:** resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDRF2.

Test times		Test results (between 0 and 861 s)	
Time to ignition	603 s	Total heat release	37.4 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	861 s	Initial mass	68.4 g
End of test time (for calculations)	861 s	Mass at EOT	14.0 g
		Mass lost	54.4 g
		Specific mass lost	5.47 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	79.5 %

Test results (between 603 and 861 s)					
		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	12.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	46.90	53.54	645
Mass at sustained flaming	17.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	40.36	4.27	790
Mass at EOT	14.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.012	0.118	610
Mass lost	3.0 g				
Specific mass lost	0.30 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	17.6 %				
Average specific MLR	5.37 g/(m <sup>2</sup> .s)				

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	46.88	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	41.81	-	
Mass loss rate (g/s)	0.013	-	

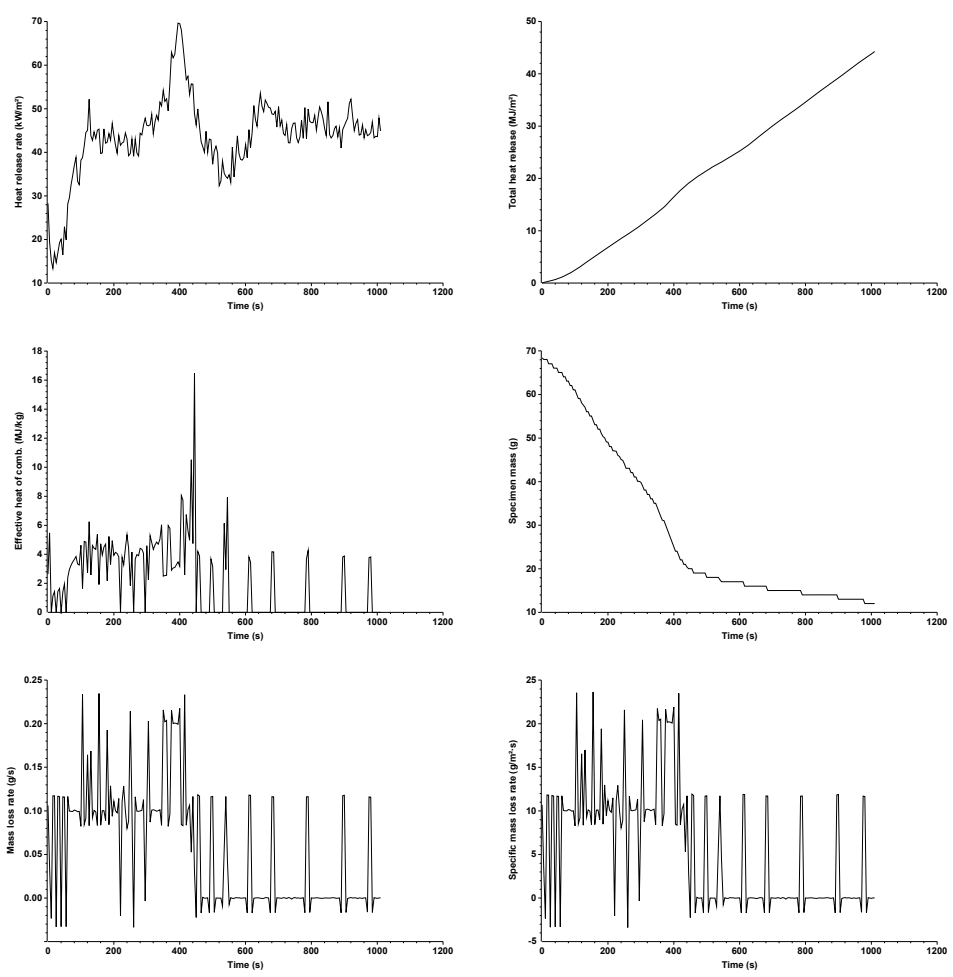


Figura A-15: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDR3.

Test times		Test results (between 0 and 891 s)	
Time to ignition	572 s	Total heat release	36.0 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	891 s	Initial mass	67.7 g
End of test time (for calculations)	891 s	Mass at EOT	12.0 g
		Mass lost	55.7 g
		Specific mass lost	5.59 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	82.2 %

Test results (between 572 and 891 s)		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	14.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	44.30	51.07	615
Mass at sustained flaming	16.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	35.34	4.15	810
Mass at EOT	12.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.012	0.118	740
Mass lost	4.0 g				
Specific mass lost	0.40 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	24.9 %				
Average specific MLR	5.35 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

Test averages		
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	44.77	44.06
Effective heat of comb. (MJ/kg)	26.77	32.96
Mass loss rate (g/s)	0.016	0.013

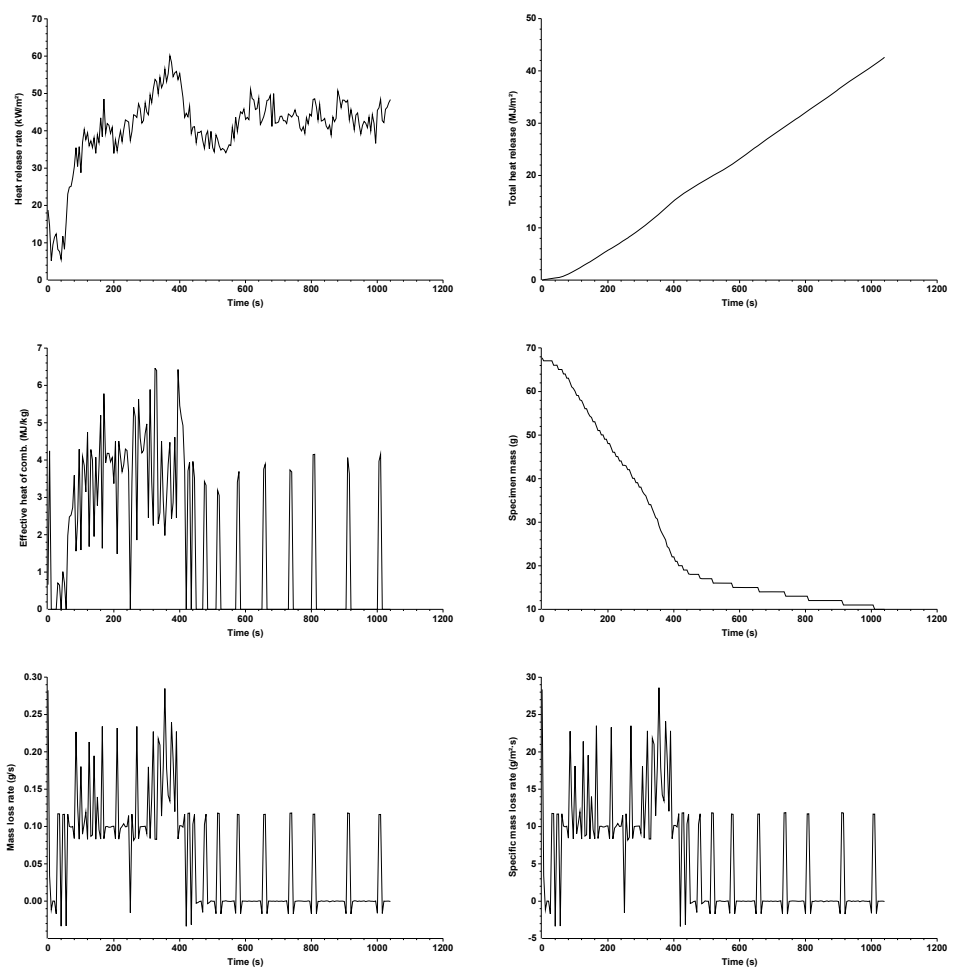


Figura A-16: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra MDFR4.

Test times		Test results (between 0 and 318 s)	
Time to ignition	95 s	Total heat release	50.0 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	318 s	Initial mass	35.0 g
End of test time (for calculations)	318 s	Mass at EOT	5.0 g
		Mass lost	30.0 g
		Specific mass lost	3.01 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	85.7 %

Test results (between 95 and 318 s)					
		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	47.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	213.85	350.64	190
Mass at sustained flaming	27.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	21.73	40.82	205
Mass at EOT	5.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.098	0.234	150
Mass lost	22.0 g				
Specific mass lost	2.21 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	81.5 %				
Average specific MLR	11.07 a/(m <sup>2</sup> ·s)				

Test averages			
	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		249.02	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		21.22	-
Mass loss rate (g/s)		0.117	-

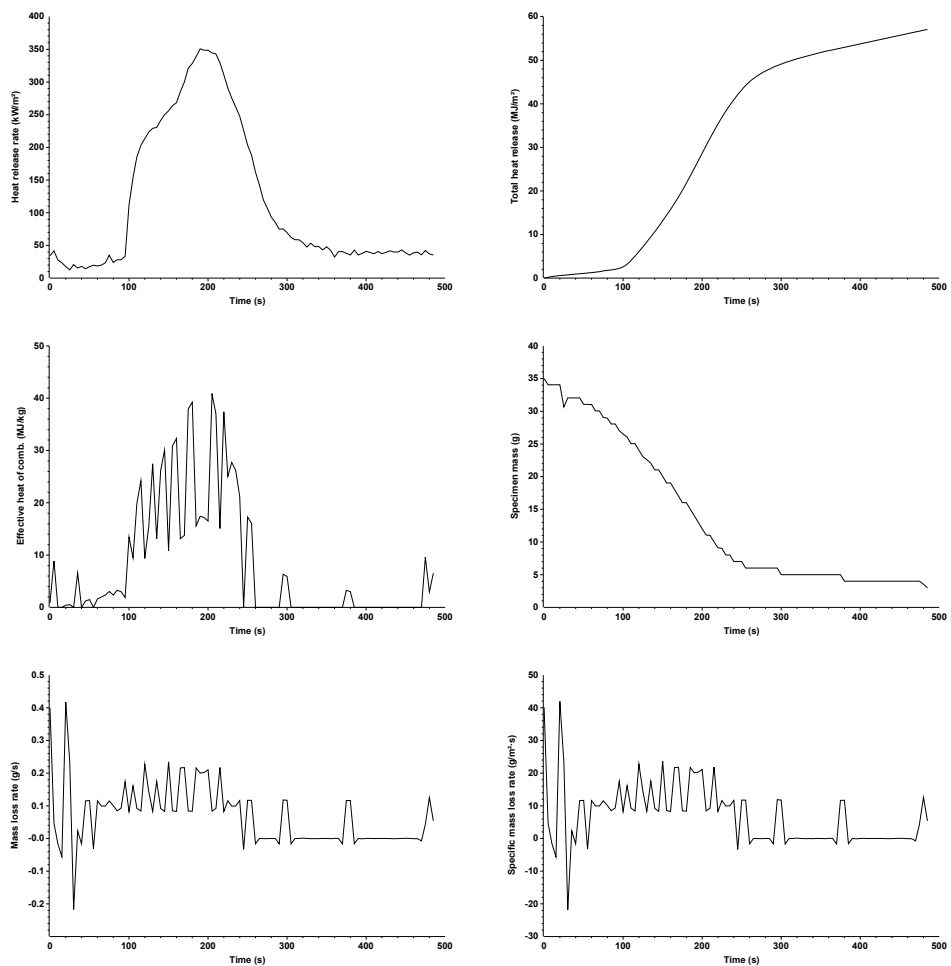


Figura A-17: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN1.

Test times		Test results (between 0 and 328 s)	
Time to ignition	124 s	Total heat release	48.2 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	328 s	Initial mass	37.7 g
End of test time (for calculations)	328 s	Mass at EOT	6.0 g
		Mass lost	31.7 g
		Specific mass lost	3.23 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	84.0 %

Test results (between 124 and 328 s)			
Total heat release	46.4 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 226.85 Peak 356.21 at time (s) 225
Mass at sustained flaming	28.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	21.26 40.44 235
Mass at EOT	6.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.105 0.234 180
Mass lost	22.0 g		
Specific mass lost	2.25 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	78.5 %		
Average specific MLR	11.59 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	248.72	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.47	-	
Mass loss rate (g/s)	0.120	-	

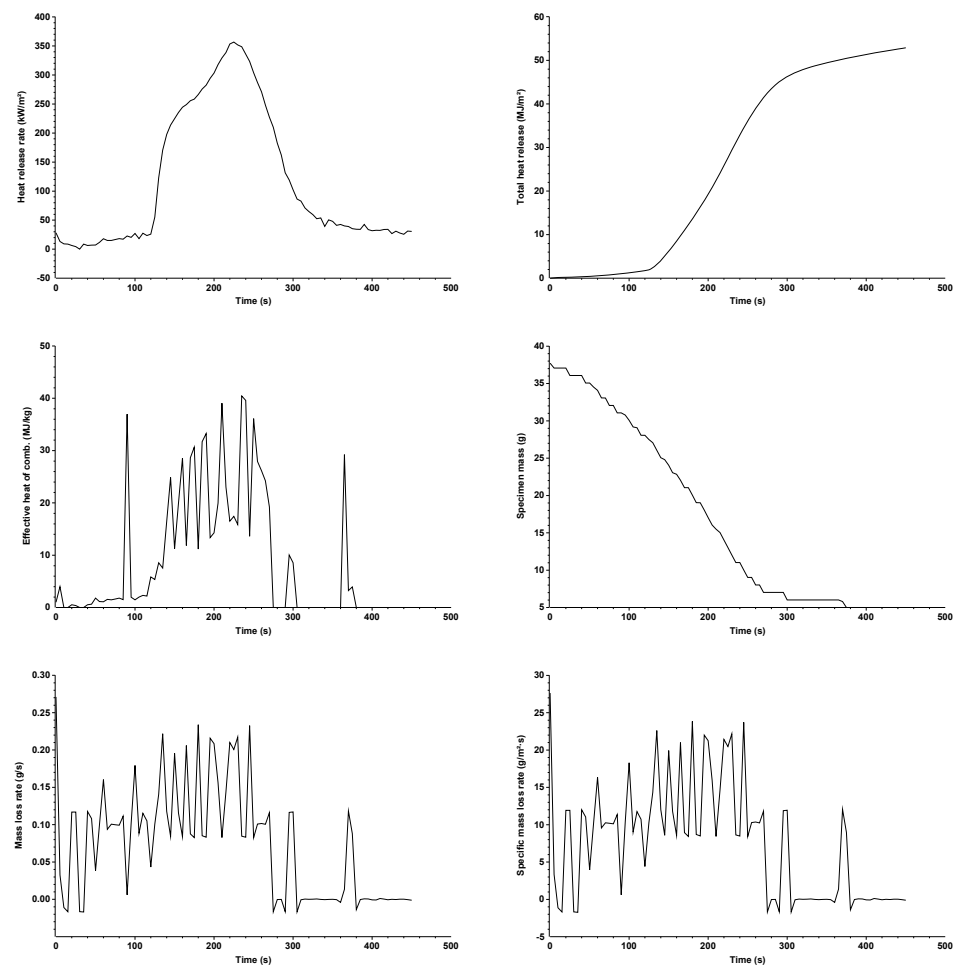


Figura A-18: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN2.

Test times		Test results (between 0 and 365 s)	
Time to ignition	166 s	Total heat release	47.2 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	365 s	Initial mass	38.9 g
End of test time (for calculations)	365 s	Mass at EOT	6.0 g
		Mass lost	32.9 g
		Specific mass lost	3.39 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	84.5 %

Test results (between 166 and 365 s)			
Total heat release	44.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean 228.12 Peak 353.91 at time (s) 250
Mass at sustained flaming	26.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	22.69 41.12 245
Mass at EOT	6.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.099 0.234 270
Mass lost	20.0 g		
Specific mass lost	2.06 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	76.9 %		
Average specific MLR	10.65 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	242.13	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	22.24	-	
Mass loss rate (g/s)	0.106	-	

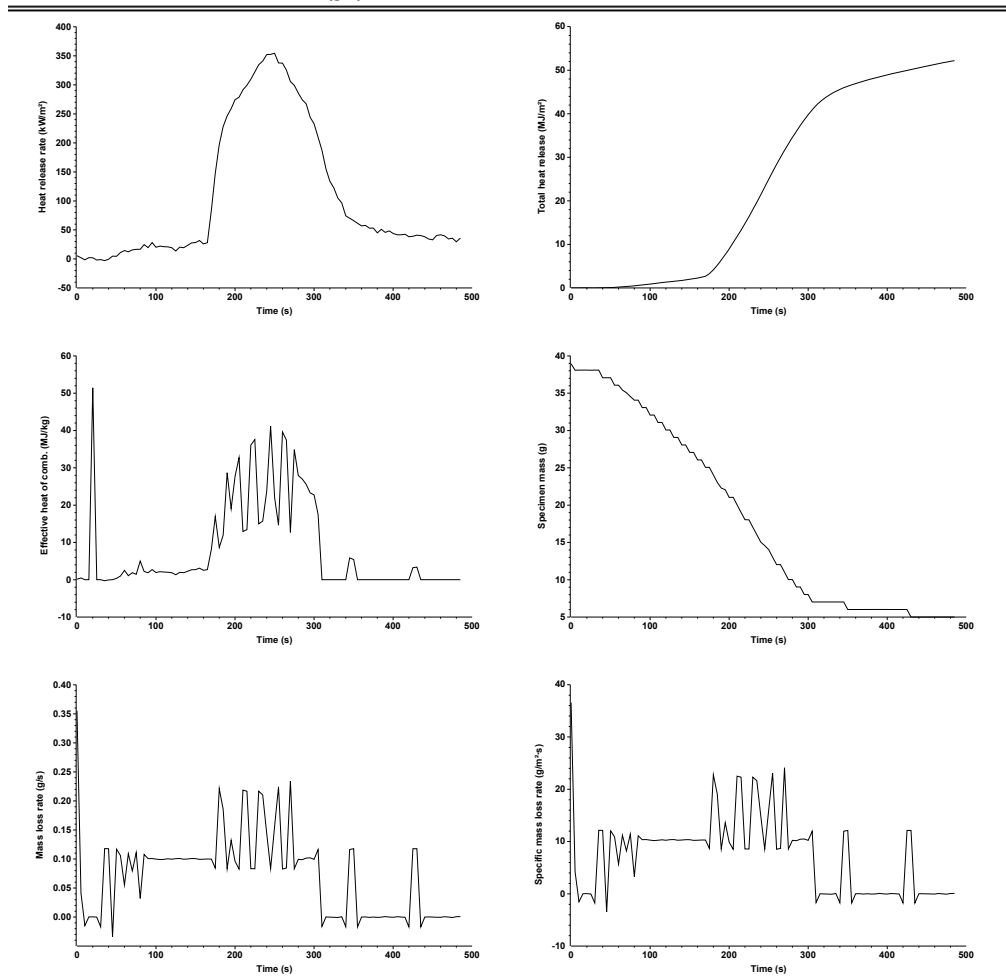


Figura A-19: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN3.



Test times		Test results (between 0 and 346 s)	
Time to ignition	132 s	Total heat release	48.6 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	346 s	Initial mass	39.2 g
End of test time (for calculations)	346 s	Mass at EOT	6.0 g
		Mass lost	33.2 g
		Specific mass lost	3.43 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	84.6 %

Test results (between 132 and 346 s)			
Total heat release	47.7 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 221.72 <b>Peak</b> 386.64 <b>at time (s)</b> 220
Mass at sustained flaming	29.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.95    41.32    240
Mass at EOT	6.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.102    0.233    135
Mass lost	23.0 g		
Specific mass lost	2.38 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	79.3 %		
Average specific MLR	12.69 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages		
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	254.75	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.15	-
Mass loss rate (g/s)	0.122	-

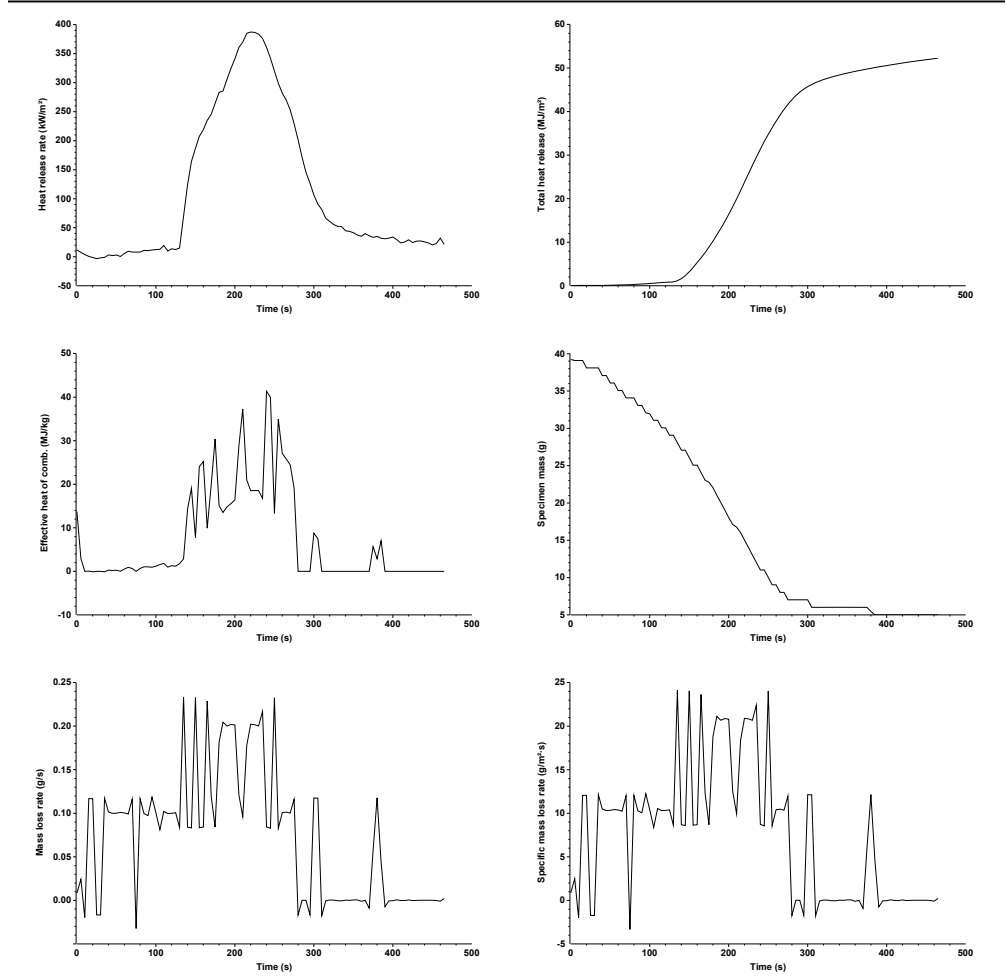


Figura A-20: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINN4.

Test times		Test results (between 0 and 330 s)	
Time to ignition	124 s	Total heat release	42.1 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	330 s	Initial mass	37.2 g
End of test time (for calculations)	330 s	Mass at EOT	9.0 g
		Mass lost	28.2 g
		Specific mass lost	2.85 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	75.7 %

Test results (between 124 and 330 s)			
Total heat release	39.9 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	<b>Mean</b> 193.98 <b>Peak</b> 305.96 <b>at time (s)</b> 225
Mass at sustained flaming	29.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.63 36.66 225
Mass at EOT	9.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.094 0.234 235
Mass lost	20.0 g		
Specific mass lost	2.03 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	68.9 %		
Average specific MLR	10.14 a/(m <sup>2</sup> ·s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	211.92	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.79	-	
Mass loss rate (g/s)	0.107	-	

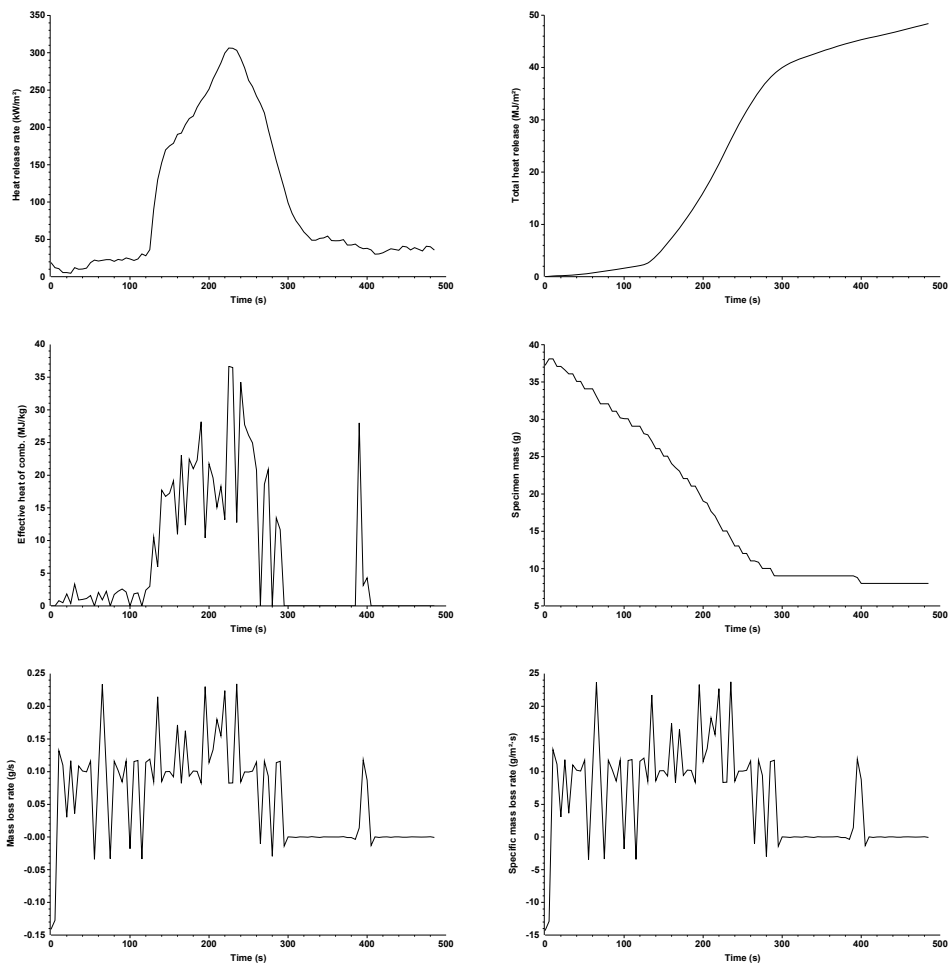


Figura A-21: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR1.

Test times		Test results (between 0 and 374 s)	
Time to ignition	184 s	Total heat release	49.7 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	374 s	Initial mass	43.0 g
End of test time (for calculations)	374 s	Mass at EOT	8.0 g
		Mass lost	35.0 g
		Specific mass lost	3.64 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	81.3 %

Test results (between 184 and 374 s)					
		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	43.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	227.59	337.21	265
Mass at sustained flaming	27.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	21.87	38.56	270
Mass at EOT	8.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.099	0.234	280
Mass lost	19.0 g				
Specific mass lost	1.98 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	70.3 %				
Average specific MLR	9.04 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	235.76	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	21.46	-	
Mass loss rate (g/s)	0.104	-	

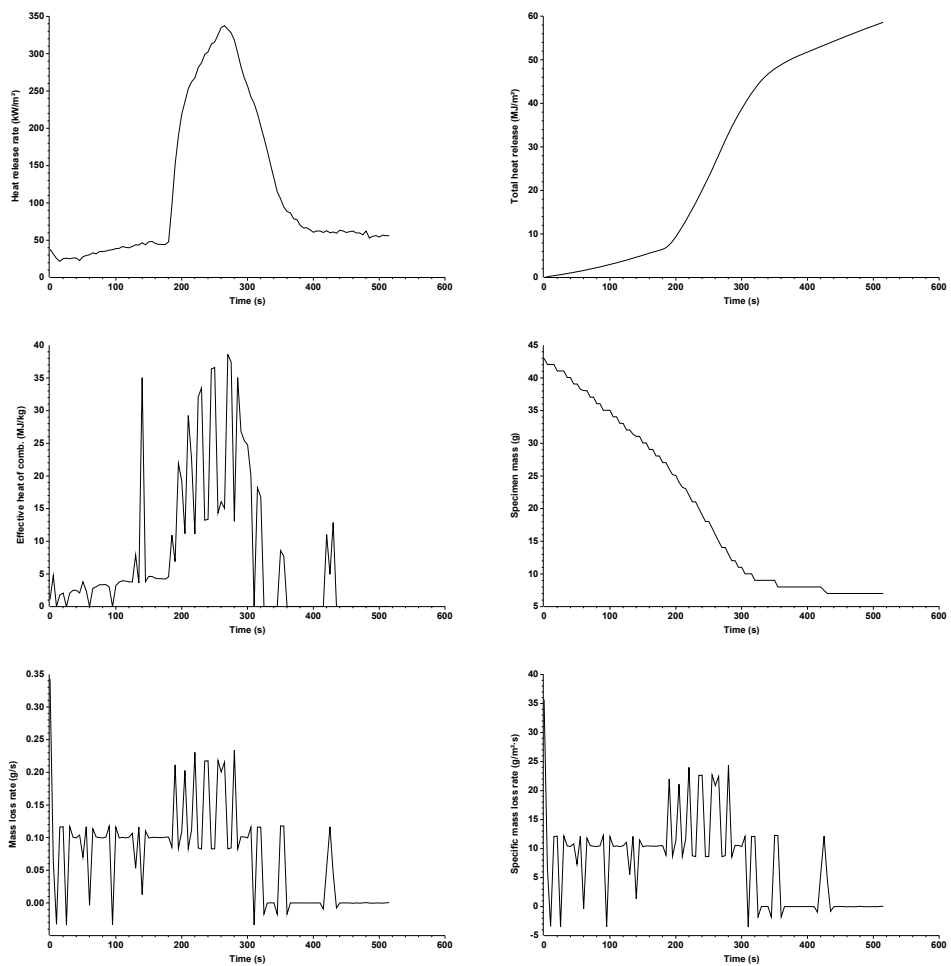


Figura A-22: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR2.

Test times		Test results (between 0 and 343 s)	
Time to ignition	153 s	Total heat release	41.1 MJ/m <sup>2</sup>
Time to flameout	343 s	Initial mass	38.8 g
End of test time (for calculations)	343 s	Mass at EOT	7.0 g
		Mass lost	31.8 g
		Specific mass lost	3.31 kg/m <sup>2</sup>
		Percentage mass lost	81.9 %

Test results (between 153 and 343 s)			
Total heat release	39.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean Peak at time (s)
Mass at sustained flaming	26.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	205.76 333.12 230
Mass at EOT	7.0 g	Mass loss rate (g/s)	19.73 36.50 220
Mass lost	19.0 g		0.099 0.225 175
Specific mass lost	1.98 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	73.1 %		
Average specific MLR	9.91 g/(m <sup>2</sup> .s)		

Test averages			
from ignition to ignition plus...	180 s	300 s	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	214.29	-	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.46	-	
Mass loss rate (g/s)	0.105	-	

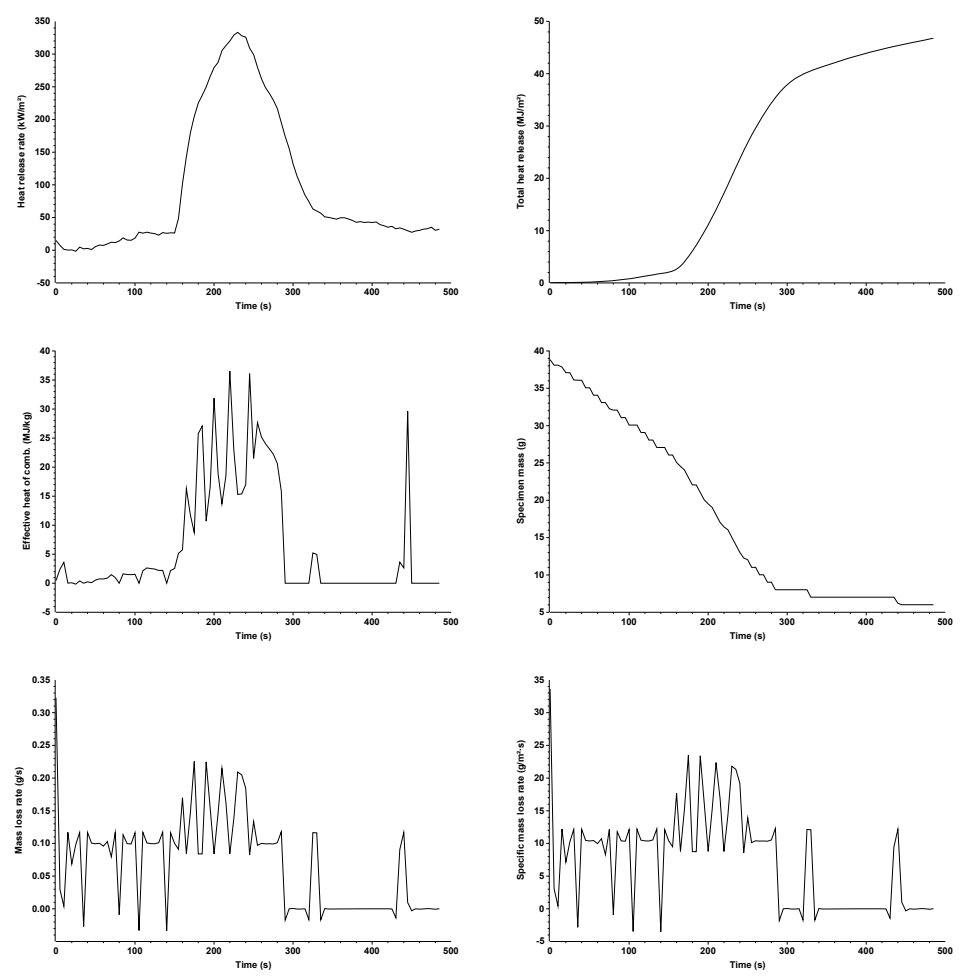


Figura A-23: resultados experimentais obtidos no MLCC para a amostra PINR3.