



APRIMORAMENTO DAS PROPRIEDADES DE RETARDAMENTO AO FOGO DE  
POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Alexandre Landesmann

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

APRIMORAMENTO DAS PROPRIEDADES DE RETARDAMENTO AO FOGO DE  
POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento

TESE 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 DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Alexandre Landesmann, D. Sc.

---

Prof. Carlos Magluta, D. Sc.

---

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D. Sc.

---

Prof. Janine Domingos Vieira, D. Sc.

---

Prof. Carlos André Vaz Junior, D. Sc.

---

Prof. Wendell Diniz Varela, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2018

Rocha, Monique Amaro de Freitas

Aprimoramento das propriedades de retardamento ao fogo de polímeros reforçados com fibra de vidro / Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

X, 162 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Landesmann

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 89-96.

1. PRFV. 2. Retardantes de chama. 3. Taxa de liberação de calor. 4. Reação ao fogo. I. Landesmann, Alexandre II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*A Deus em primeiro lugar,  
Aos meus pais, Jonas e Euzinea.  
A Daniel.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Alexandre Landesmann, pelos ensinamentos, pela disponibilidade e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a sensibilidade em muitas vezes em perceber e me ajudar em muitos momentos difíceis nesse período.

À minha coorientadora Dra. Simone Pereira da Silva Ribeiro, do IQ/UFRJ, minha sincera gratidão pela amizade, paciência, dedicação e pelo conhecimento compartilhado ao longo dos últimos anos.

A todos meus colegas do Laboratório de Estruturas, principalmente Gabriela Fernandes e Fernanda Silva, pela amizade, pelas colaborações e pelo companheirismo durante esta longa jornada.

À COPPE/UFRJ, particularmente ao Programa de Engenharia Civil, representado por todos seus Professores, Técnicos e Funcionários.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

À Cogumelo Indústria e Comércio LTDA, por fornecer as amostras de PRFV utilizadas no trabalho.

Ao povo brasileiro.

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

## APRIMORAMENTO DAS PROPRIEDADES DE RETARDAMENTO AO FOGO DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento

Dezembro/2018

Orientador: Alexandre Landesmann

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma investigação experimental de propriedades de retardamento ao fogo de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), fabricados por pultrusão. Em especial, foi destacada uma abordagem de aplicar dados de inflamabilidade como tempo de ignição, índice limite de oxigênio e taxa de liberação de calor como parâmetros para elaboração de um sistema de escala na avaliação da reação ao fogo de PRF. Os materiais compósitos utilizados neste trabalho foram compostos pelas matrizes esterevinílica bisfenol-A, poliéster isoftálico e fenólica, todas reforçadas com vidro tipo E de baixa condutividade elétrica. Três sistemas passivos de proteção contra o fogo foram testados: alumina tri-hidratada (ATH), decabromodifenil eter (DBDE) e trióxido de antimônio ( $Sb_2O_3$ ). Os testes de reação ao fogo foram realizados com o objetivo de investigar se a combinação de ATH e DBDE poderia ter efeitos "aditivos", "antagônicos" ou "sinérgicos" nas propriedades de reação ao fogo dos PRFVs estudados neste trabalho. Além disso, a influência da variação da concentração de ATH nas propriedades retardantes de chama também foi avaliada. Os melhores resultados encontrados foram aqueles em que a ATH foi adicionada sozinha em altas concentrações (47,75% a 80%). Todas as amostras exibiram inibição de ignição no CCPM e UL-94, resultando nas melhores propriedades de reação, além de serem livres de halogênio.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ENHANCED OF FIRE RETARDANCY PROPERTIES OF GLASS FIBRE  
REINFORCED POLYMERS COMPOSITES

Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento

December/2018

Advisor: Alexandre Landesmann

Department: Civil Engineering

This work presents an experimental research of fire retardancy properties of polymers reinforced with glass fibers (PRFV), manufactured by pultrusion. In particular, a flammability data approach was used as ignition time, oxygen limit rate and heat rate as parameters for the elaboration of a PRF fire scale evaluation system. The internal combustion materials were developed by sterile-bisphenol-A matrices, thermal and phenolic insulation, all components superior and inferior to electrical conductivity. The three fire protection systems were tested: alumina trihydrate (ATH), decabromodiphenyl ether (DBDE) and antimony trioxide ( $Sb_2O_3$ ). The fire reaction tests were performed with the objective of investigating a combination of ATH and DBDE, which could have been "additives", "antagonistic" or "synergistic" in the fire properties of the PRGFs studied in this work. In addition, the influence of the ATH concentration on flame retardant properties was also evaluated. The results were compared with an ATH in 47.75% to 80%. All types of inflation demonstration do not have CCPM and UL-94, being their better reaction properties, besides being free of halogen.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	7
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO .....	9
2.3 PULTRUSÃO .....	9
2.4 O PROCESSO DE QUEIMA DE UM POLÍMERO .....	12
2.4.1 Tratamentos para diminuição da inflamabilidade em PRFV .....	13
2.4.2 Principais retardantes de chama .....	14
2.5 PESQUISAS RELACIONADAS A PROPRIEDADES DE REAÇÃO AO FOGO... 15	
<b>3. METODOLOGIA DE ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>26</b>
3.1 MATERIAIS .....	26
3.2 MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DE INFLAMABILIDADE .....	31
3.2.1 Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCCPM) .....	32
3.2.2 Análise simultânea de termogravimetria e calorimetria diferencial de varredura... 40	
3.2.3 Índice limite de oxigênio (LOI).....	421
3.2.4 Queima vertical (UL- 94).....	452
3.2.5 Fio incandescente .....	405
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>47</b>
4.1 AVALIAÇÕES DA INFLAMABILIDADE ATRAVÉS DO CCPM PARA PRFV .....	47
4.1.1 Propriedades da reação de fogo.....	50
4.2 AVALIAÇÕES DA INFLAMABILIDADE ATRAVÉS DOS EQUIPAMENTOS .....	65
4.2.1 Análise simultânea TGA e DSC.....	65
4.2.2 Índice Limite de Oxigênio (LOI) .....	76
4.2.3 Queima Vertical - UL- 94.....	80
4.2.4 Fio incandescente.....	82
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	88
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>97</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CCPM	cone calorímetro de perda de massa
CTL	calor total liberado
FTT	Fire Testing Technology
FDS	programa computacional <i>Fire Dynamic Simulator</i>
P	resina poliéster sem retardante de chama
PA	resina poliéster com 37phr de ATH
PA1	resina poliéster com 47,75 phr de ATH
PA2	resina poliéster com 58,5 phr de ATH
PA3	resina poliéster com 69,25 phr de ATH
PA4	resina poliéster com 80 phr de ATH
PAB	resina poliéster com 37phr de ATH e 6,5phr de DBDE
PABC1	resina poliéster com 13phr de DBD, 4,3phr de Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 37phr de ATH
PABC2	resina poliéster com 19,5phr de DBD e 6,5phr de Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 37phr de ATH
PB	resina poliéster com 6,5phr de DBDE
PBC1	resina poliéster com 13phr de DBD e 4,3phr de Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
PBC2	resina poliéster com 19,5phr de DBD e 6,5phr de Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
phr	partes por cem de resina
PTLC	pico do TLC
PRF	polímero reforçado com fibra
PRFV	polímero reforçado com fibra de vidro
TPM	taxa de perda de massa
TGA/DSC	análise simultânea de termogravimetria e análise térmica diferencial
TLC	taxa de liberação de calor
TTI	tempo de ignição
TOC	tempo de combustão
V	resina estervinílica sem retardante de chama
VA	resina estervinílica com 37phr de ATH
VB	resina estervinílica com 6,5phr de DBDE
VAB	resina estervinílica com 37phr de ATH e 6,5phr de DBDE

## **LISTA DE SIGLAS**

ATH	alumina tri-hidratada
A-LDH	adipato-LDH
CS	silicato de cálcio
DBDE	decabromodifenil eter
DMA	análises dinâmicas mecânicas
FIGRA	taxa de crescimento do fogo
GWFI	índice de inflamabilidade Glow-Wire
GWIT	temperatura de ignição Glow-Wire
I	revestimento intumescente
LDH	nanopartículas hidróxidos duplos
LOI	índice limite de oxigênio
LOX	teste de impacto mecânico com oxigênio líquido
SBI	teste de queima única
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	trióxido de antimônio
S-LDH	2-metil-2-propeno-1-sulfonato-LDH
UL-94	ensaio classificatório de resistência ao fogo
VP	vermiculita/perlita

# 1

## INTRODUÇÃO

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) exibem uma combinação desejável de alta eficiência estrutural (relação resistência /peso), baixos custos de produção, versatilidade de fabricação (ou seja, são capazes de moldar virtualmente qualquer forma em um tipo de construção uniforme) e baixa manutenção com alta durabilidade (mesmo sob ambientes agressivos). Naturalmente, essas características bastante positivas, conforme relatados por BANK (2006) e MARTINS e MARTINS (2011), têm produzido uma expansão constante de PRF na indústria da construção civil durante os últimos anos, particularmente eletrodos, grades em áreas com ar marítimo e edifícios residenciais.

Com o surgimento de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro (PRFV), carbono e *kevlar*, por exemplo, onde é possível unir a elevada resistência da fibra com a ductilidade do polímero, um melhor desempenho estrutural foi alcançado. De acordo com CORREIA (2008) o alto desempenho dos materiais compósitos poliméricos tem alcançado importância nas construções industriais devido ao seu baixo peso específico, resistência à corrosão e rapidez na montagem.

Apesar das inúmeras vantagens apontadas, é justo dizer que os materiais PRF são visivelmente vulneráveis às condições de fogo (ex. exposição ao calor e/ou chama), que têm o potencial para rapidamente alterar substancialmente as leis constitutivas, nomeadamente a sua rigidez, resistência e a quantidade de comportamento estrutural de não-linearidade, CORREIA *et al.* (2010 parte B e 2015), e liberar calor intenso, bem como produzir fumaça densa e gases tóxicos devido ao processo de combustão da matriz orgânica do PRF, MOURITZ *et al.* (2006). Esta última é considerada a principal causa de mortes em risco de incêndios, como a ocorrida na Boate Kiss situada em Santa Maria/RS, em 27 de janeiro de 2013, responsável por 242 mortes e 680 feridos (Figura 1-1 (a)). Outros graves incêndios ocorridos recentemente também chamam a atenção

para esse assunto: o incêndio no Museu Nacional do Brasil situado no Rio de Janeiro/RJ, na noite de 2 de setembro de 2018, destruindo quase a totalidade do acervo histórico e científico construído ao longo de duzentos anos, e que abrangia cerca de vinte milhões de itens catalogados (Figura 1-1 (b)); e o incêndio que destruiu a *Grenfell Tower*, em Londres, que deixou 79 mortos e 78 feridos em 14 de junho de 2017 (Figura 1-1 (c)).



(a)



(b)



(c)

**Figura 1-1** - Incêndios ocorridos em: (a) Boate Kiss, em Santa Maria/RS, em 27/01/2013 (G1, 2013), (b) Museu Nacional do Brasil, no Rio de Janeiro/RJ, em 2/09/2018 (WIKIPEDIA, 2018) e (c) Grenfell Tower, em Londres, em 14/06/2017 (GLOBO 1, 2017).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Os compósitos reforçados com fibras podem ser utilizados na engenharia civil em estruturas principais como pontes, passarelas de pedestres, edifícios, torres e várias outras composições. Exemplos disso não faltam, como a passarela *Aberfeldy* na Escócia (Figura 1-2(a)), a passarela *Sun-Yu*, em Seoul – Coréia (Figura 1-2 (b)), a ponte *Neal*, construída no estado do Maine – EUA (Figura 1-2 (c)), a fachada no Hotel Fasano na

praia de Ipanema no Rio de Janeiro (Figura 1-2 (d)), a fachada do *Joliette Secondary School* nos EUA (Figura 1-2 (e)), dentre tantos outros.



(a)



(c)



(d)



(b)



(e)

**Figura 1-2** – Aplicações dos compósitos reforçados com fibras: (a) passarela *Aberfeldy* na Escócia (WÅHLIN, 2011), (b) passarela *Sun-Yu*, em Seoul – Coréia (COSTA, 2013), (c) ponte *Neal*, construída no estado do Maine – EUA (GAZETA, 2009), (d) fachada do Hotel Fasano em Ipanema/RJ (COGUMELO S/A, 2017) e (e) fachada do *Joliette Secondary School* nos EUA (ARCHIEXPO, 2018).

Entretanto, como para qualquer material de construção em geral, o uso de compósitos poliméricos com fibras em edifícios exige características adequadas de reação/resistência ao fogo, definidas por parâmetros fornecidos por normas específicas de segurança contra incêndios, visando minimizar a ignição, propagação de chamas e produção excessiva de fumaça/toxicidade.

Assim, a busca natural por soluções de segurança leva à necessidade de desenvolver resinas à prova de fogo e retardantes de chama, para atender aos requisitos de inflamabilidade/resistência. Diante deste problema, surgiu o interesse em investigar a reação ao fogo de polímeros reforçados com fibras de vidro. Além disso, vale ressaltar que a atividade de pesquisa dedicada a investigações sobre a reação/resistência a incêndios de materiais de PRF, particularmente PRFV, já iniciou algum nível de entendimento sobre as propriedades de comportamento ao fogo dos materiais mais comuns usados na construção civil (por exemplo: CORREIA *et al.* (2010 parte A e 2015), WILKIE e MORGAN (2009), SCUDAMORE (1994), etc.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é ampliar os estudos anteriores, apresentando e discutindo os resultados disponíveis de uma investigação experimental da reação ao fogo de PRFV, considerando três resinas poliméricas termofixas estervinílica bisfenol-A, poliéster isoftálica e fenólica, todos reforçados com fibra E-vidro de baixa condutividade elétrica. Três materiais diferentes para sistemas de proteção passiva contra incêndio estarão inclusas na investigação: alumina tri-hidratada (ATH), decabromodifenil eter (DBDE) e trióxido de antimônio ( $Sb_2O_3$ ).

Inicialmente será analisada a adição de ATH e DBDE isoladamente nas resinas estervinílica e poliéster e em seguida a investigação de ocorrência de interações entre eles. Posteriormente, será avaliada somente na resina poliéster a sinergia entre DBDE e  $Sb_2O_3$  seguida pela adição da ATH nesse sistema. Após esses resultados, serão investigadas diversas concentrações de ATH adicionada isoladamente na resina poliéster. A intenção principal é saber se haverá um aumento das propriedades

retardantes de chama do PRFV, se a ATH poderia ser uma alternativa para o desenvolvimento de um compósito PRFV retardante de chama livre de halogênio e em que concentração este efeito poderia ser observado.

Serão feitas análises nos equipamentos Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCPM), TGA/DSC, Índice Limite de Oxigênio (LOI), Queima Vertical (UL-94) e Fio Incandescente. Através destes testes de reação ao fogo é possível ter uma nova abordagem de aplicar dados de inflamabilidade como tempo de ignição, índice limite de oxigênio e taxa de liberação de calor como parâmetros para elaboração de um sistema de escala na avaliação da reação ao fogo de PRF (LAU *et al.*, 2016).

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

No próximo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, percorrendo o histórico dos materiais compósitos com ênfase nas matrizes poliméricas reforçadas com fibra de vidro; definição das propriedades das diferentes matrizes utilizadas, assim como da fibra de vidro; descrição do processo de fabricação pultrusão; aplicação de materiais pultrudados; uma visão do processo de queima de um polímero e dos diferentes tipos de tratamentos anti-chamas e requisitos de segurança; exemplos de diversas aplicações do PRFV. Finaliza-se o capítulo com uma pesquisa do estado de arte das propriedades de reação ao fogo de materiais pultrudados reforçados com fibra de vidro no Brasil e no exterior. Uma visão mais detalhada do procedimento para avaliação da reação ao fogo dos PRFV é fornecida no capítulo 3; bem como a descrição dos corpos de prova, resinas e retardantes empregados, dimensões, quantidades e nomenclatura. A apresentação de cada equipamento utilizado, CCPM, TGA/DSC, LOI, UL-94 e fio incandescente, também segue apresentada neste capítulo, enfatizando, normas, procedimentos dos ensaios e registro de cada aparelho.

O capítulo 4 destina-se às análises e classificações dos resultados obtidos. Inicia-se por um conjunto de descrições de cada parâmetro medido no CCPM, seguido pelo TGA/DSC, LOI, UL-94 e fio incandescente, onde as metodologias são aplicadas a um conjunto de corpos de prova, sendo possível avaliar o funcionamento dos diferentes

sistemas retardantes de chama aplicados ao longo da análise de reação ao fogo e comparar os resultados obtidos para cada equipamento. As principais conclusões e recomendações obtidas nesta pesquisa de doutorado encontram-se no capítulo 5. Por fim, os apêndices que apresentam os relatórios emitidos pelo equipamento CCPM, tabela com resultados de todos os corpos de prova dos ensaios de LOI, UL-94 e fio incandescente e por fim os relatórios de TGA/DSC.

# 2

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão expostos aspectos gerais em relação aos materiais compósitos seguido de um breve histórico. Será apresentado o processo de fabricação pultrusão; as principais vantagens e desvantagens dos Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV's); uma pesquisa do estado de arte do uso de materiais pultrudados no Brasil e no exterior e finaliza com alguns estudos recentes realizados sobre tais materiais relacionando-os a este trabalho e sua importância atual.

### **2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS**

Compósitos são materiais cuja estrutura é constituída por uma combinação de dois ou mais fases não solúveis entre si (BROUTMAN, 1987). Uma das suas partes é denominada por reforço e a outra é chamada de matriz. A matriz de um compósito tem como função a proteção do reforço contra o meio envolvente, transferir os esforços, manter a posição deste e proteger o compósito durante o manuseamento. O material de reforço confere a resistência à tração e tenacidade ao compósito. As propriedades dos compósitos dependem da natureza dos materiais usados e do grau de ligação entre eles através da interface.

O reforço é feito geralmente por fibras e estas podem ser fibras naturais (como sisal), vidro, carbono, aramida, boro ou alumínio oxidado. Algumas propriedades dos materiais compósitos, como (i) densidade; (ii) resistência e o módulo de tração; (iii) resistência e o módulo de compressão; (iv) resistência à fadiga; (v) mecanismo de falha; (vi) condutividade elétrica e térmica; (vii) custo da produção do material, são influenciados pela quantidade e orientação das fibras (DANIEL e ISHA, 1994).

Dependendo do tipo de matriz, MITCHELL (2004) nomeia os materiais compósitos reforçados por fibras em 03 (três) grupos: Compósitos de Matriz Metálica, Compósitos de Matriz Cerâmica e Compósitos de Matriz Polimérica. Os compósitos utilizados na presente pesquisa são de matriz polimérica que são os mais utilizados por serem mais baratos e de fácil produção, segundo COGUMELO S/A (2017).

Os polímeros podem ser classificados em: termoplásticos, que são moldáveis quando aquecidos, relativamente dúcteis e não apresentam estabilidade dimensional, e termofixos, que não amolecem com o aumento da temperatura e por isso, uma vez produzidos, não podem ser reprocessados. As matrizes poliméricas mais utilizadas são:

- i.* Epóxi - possui grande resistência à umidade, alta resistência à temperatura, boa adesão com fibras de vidro e baixa retração durante a cura em comparação com poliéster e estervinílica. A resina epóxi pode ser curada a temperatura ambiente ou a alta temperatura.
- ii.* Poliéster - possui grande resistência química, resistência a desgastes por ações atmosféricas, resistência ao envelhecimento, boa adesão com fibras de vidro e, por fim, tem baixo custo.
- iii.* Estervinílica - derivadas de componentes das resinas epóxi. O emprego de tais resinas deve-se ao fato de apresentarem melhor desempenho que as de poliéster isoftálicas, pois oferecem maior resistência a ataques químicos, bem como maior resistência e rigidez mecânica a altas temperaturas, e por terem alta dureza.
- iv.* Fenólica - apresenta alta resistência à chama (não sofrem ignição espontânea, não propagam chamas) e baixos índices de emissão de fumaça e outros gases tóxicos (BORGES, 2004). Além disso, trata-se de uma resina que possui baixa retração, se comparada com as resinas poliéster, segundo o EUROCOMP (1996). Nenhum outro material polimérico conhecido até então apresenta o mesmo desempenho neste aspecto como as resinas fenólicas. Porém, apresenta elevado custo operacional (BORGES, 2004) e, conseqüentemente, seu valor comercial é alto comparado com as outras resinas.

## **2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO ("FIBER GLASS")**

Existe uma grande variedade de fibras em geral que podem ser usadas como reforço nos materiais compósitos. As características mais importantes destas fibras são: alta resistência, alta dureza e densidade relativamente baixa.

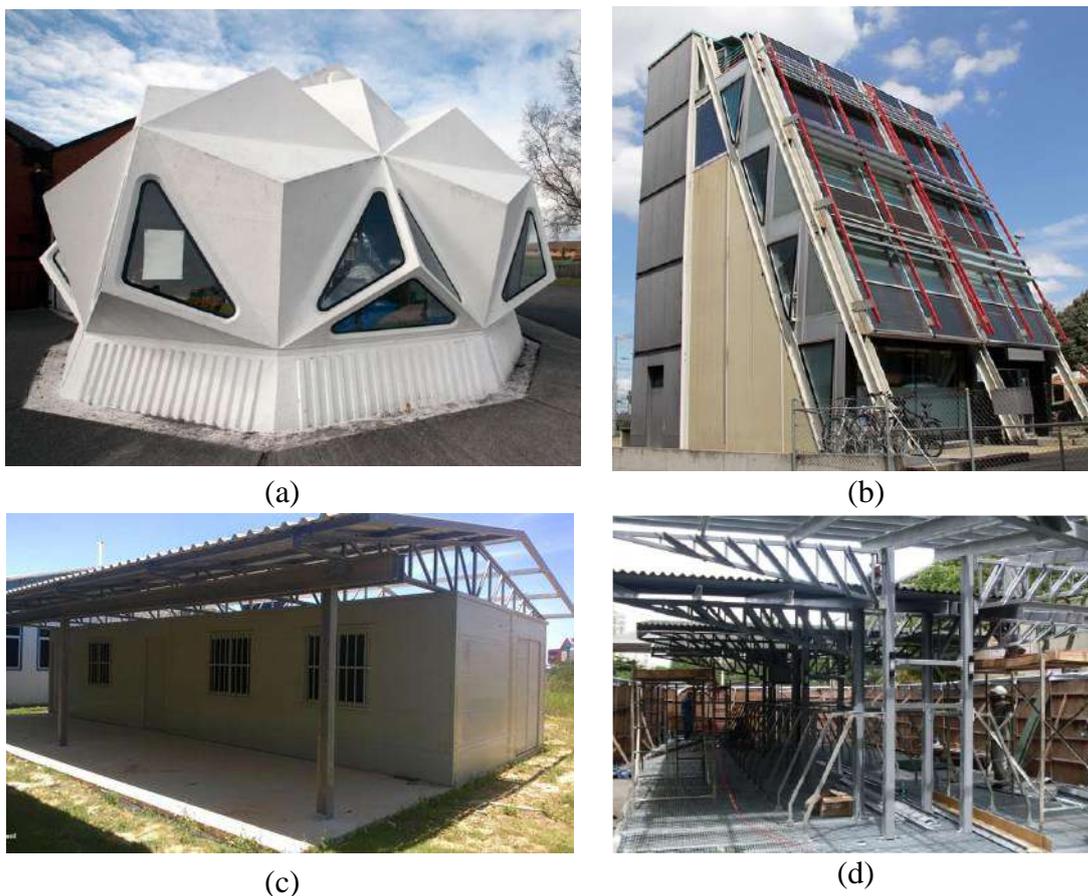
Os três principais tipos de fibras sintéticas que são usadas para reforçar materiais poliméricos são: vidro, aramida (ou aramídica) e carbono. As fibras de vidro são, com grande vantagem, o reforço mais usado e o mais barato. FIORELLI (2005) apresenta as seguintes características favoráveis para os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro: (i) elevada razão entre resistência mecânica e peso; (ii) boa estabilidade dimensional; (iii) boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; (iv) boas propriedades de isolamento elétrico; (v) facilidade de fabricação; (vi) custo relativamente baixo.

Diferentes tipos de fibra de vidro são identificados por uma letra inicial que denota a sua principal característica. O EUROCOMP (1987) e DANIEL *et al.*, (1994) destacam alguns tipos de fibras de vidro: *E-glass*, com alta resistência mecânica somada a boa resistência elétrica; *C-glass*, com alta resistência química, mas uma resistência mecânica inferior à da fibra *E-glass*; *S-glass*, a mais resistente sob ação da temperatura e a mais cara.

## **2.3 PULTRUSÃO**

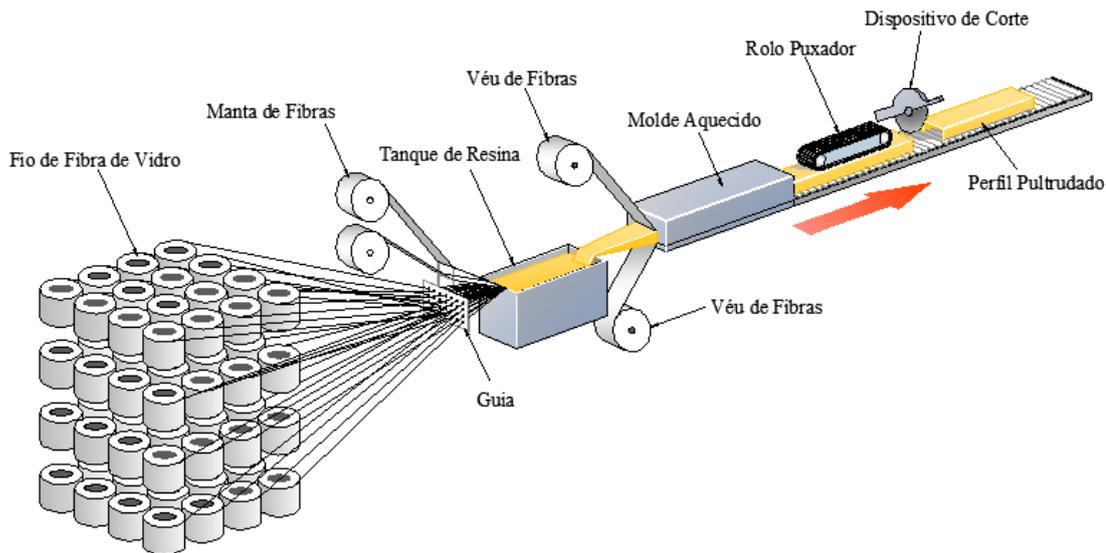
O método de pultrusão, de acordo com BANNISTER (2001), foi criado na década de 1950 nos Estados Unidos. Por ser automatizado, necessita de pouca mão-de-obra e o custo-benefício se torna atraente. Na década de 1960 e 1970 os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro começaram a serem utilizados na construção civil como materiais construtivos (CORREIA, 2008). A Figura 2-1 (a) apresenta a primeira estrutura feita totalmente em material compósito polimérico (resina poliéster reforçada com fibra de vidro) situada no Reino Unido em 1974 (SOUZA, 2017). Desde então, diversas aplicações surgiram pelo mundo, como apresentadas nas: Figura 2-1 (b) com o

edifício “Eyecatcher”, construído pela *Fiberline Composites* em Basel, Suíça, em 1999; Figura 2-1 (c) com o laboratório de Adesão e Aderência (LAA), na UFRJ em Macaé, RJ; Figura 2-1 (d) com a estrutura em perfis pultrudados para telhado na PUC-RIO.



**Figura 2-1** – Aplicações de materiais pultrudados: (a) escola primária Kennington, Reino Unido, 1974 (SOUZA, 2017); (b) edifício “Eyecatcher”, Suíça, 1999 (MOSALLAM *et al.*, 2014); (c) laboratório de Adesão e Aderência (LAA), Macaé, RJ (BP, 2016) e (d) telhado na PUC-RIO (SANTOS *et al.*, 2009).

A pultrusão, palavra derivada do termo inglês *pultrusion* que tem origem nas palavras *pull* que significa puxar e *through* que significa através, é um processo automatizado e contínuo para produção de peças estruturais, que consiste no “puxamento” de fibras (mantas, fios e tecidos) impregnadas por uma resina, através de um molde metálico aquecido. No final acontece o corte do perfil pultrudado de acordo com o comprimento desejado. O esquema do processo da pultrusão pode ser visto na Figura 2-2.



**Figura 2-2** - Processo de pultrusão de polímeros reforçados com fibras de vidro.  
(SERUTI, 2013).

O sistema de fibra utilizado na fabricação dos compósitos pultrudados consiste em diferentes tipos e arquiteturas: fios de fibra, manta de fibras e véu de fibras. Dezenas de rolos de fibra de vidro chamados de *roving*, Figura 2-3 (a), fornecem os fios necessários como reforço ao compósito. As mantas, ilustrada na Figura 2-3 (b), são utilizadas para aumentar a resistência e rigidez transversal do perfil e também tem como função proteger as fibras de danos em sua superfície e auxiliar a adesão da fibra com a matriz. Os véus são responsáveis pela qualidade da superfície do perfil pultrudado, conforme ilustrado na Figura 2-3 (c).



(a)



(b)



(c)

**Figura 2-3** - Imagens de: (a) rolos de fibra de vidro, (b) manta de fibra de vidro e (c) véu de fibra de vidro (COGUMELO, 2010).

## 2.4 O PROCESSO DE QUEIMA DE UM POLÍMERO

A queima de produtos que possuem polímeros em sua composição tem o potencial de produzir rapidamente fumaça densa, calor intenso e gases tóxicos. Segundo GALLO e AGNELLI (1998), o processo da queima de um combustível sólido pode ser dividido em cinco etapas: aquecimento, pirólise, ignição, combustão e propagação e extinção.

GALLO e AGNELLI (1998) descrevem o processo de queima: na primeira etapa do aquecimento a temperatura do material é elevada progressivamente através de uma fonte externa ou por contato direto com chama, gases quentes ou por condução. Em seguida, na etapa da pirólise, quando o material polimérico alcança a temperatura de decomposição em baixa concentração de oxigênio, começa a liberar uma ou mais substâncias as quais as diferentes combinações físicas é que darão origem à fumaça. A pirólise se dá por mecanismo via radical livre, que dará origem aos radicais  $H\cdot$  e  $OH\cdot$ , altamente reativos. As equações químicas abaixo demonstram um possível mecanismo de pirólise de um polímero:



Na terceira etapa, ignição, os produtos da pirólise, altamente inflamáveis, encontram-se com oxigênio do ar e, devido às condições de temperatura propícias, tais níveis permitem a ignição por uma fonte externa de calor ou por autoignição. Essa etapa é principalmente influenciada pela temperatura e pela concentração mínima de oxigênio necessária para iniciar e sustentar a combustão - o índice de oxigênio. Esse estágio é também conhecido como “pré-flashover” e termina no instante conhecido por “flashover” (instante de inflamação generalizada) (COSTA e SILVA, 2003).

Na etapa da combustão e propagação, as reações iniciadas pela pirólise que são altamente exotérmicas geram material combustível sustentando o processo de retroalimentação térmica. Enquanto houver material combustível disponível, os

processos de combustão e propagação são mantidos em um ciclo que propaga o fogo através da superfície do material tornando a queima irreversível. Na última etapa, o combustível disponível vai reduzindo até o ponto em que não é mais suficiente para alimentar o ciclo térmico. O calor da combustão vai diminuindo e o processo de queima entra no estágio de extinção, com a degradação completa do polímero.

#### **2.4.1 Tratamentos para diminuição da inflamabilidade em PRFV**

A função de um aditivo retardante de chama é inibir ou, quando possível, eliminar a combustão de um material. Isso se torna altamente necessário quando uma peça está exposta a temperaturas elevadas ou a correntes elétricas, fatores que somados a inflamabilidade de boa parte dos polímeros podem apresentar um resultado indesejável: o incêndio.

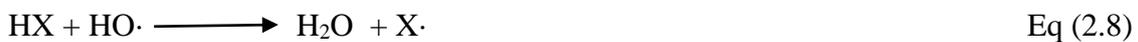
De acordo com GALLO e AGNELLI (1998) as diversas maneiras de se reduzir a inflamabilidade dos polímeros podem ser agrupadas em: (i) uso de agentes retardantes de chama reativos (modificação química dos polímeros), (ii) uso de agentes retardantes de chama aditivos, (iii) aplicação de revestimentos antichama e (iv) combinação de vários métodos.

Dentre esses métodos, o uso de agentes retardantes de chama aditivos é mais difundido podendo atuar de forma física, química e simultaneamente nas fases sólida, líquida ou gasosa. A ação física pode ser feita pelo método de resfriamento, por formação de camada protetora ou por diluição dos combustíveis nas fases sólidas e gasosas. Já a ação química interfere no processo de combustão nas fases sólida e gasosa. Efeitos de sinergia ou antagônicos podem ser obtidos a partir da combinação de diferentes modos de ação de retardantes. Esses efeitos sinérgicos são de suma importância pois, enquanto um certo retardante pode ter pouco efeito quando aplicado individualmente, quando adicionado concomitantemente com outro retardante ajuda na soma das ações ou simplesmente reduz significativamente a quantidade necessária de um outro, usualmente mais caro. A redução na concentração dos aditivos retardantes de chama no compósito, através de efeitos sinérgicos, também é interessante quando se analisa as propriedades mecânicas do material.

## 2.4.2 Principais retardantes de chama

GALLO e AGNELLI (1998) citam diversos tipos de retardantes de chama, por exemplo: organohalogenados, trióxido de antimônio, alumina tri-hidratada, boratos, fosfatos e hidróxido de magnésio. A seguir serão discutidos o mecanismo de ação dos retardantes organohalogenados, trióxido de antimônio e alumina tri-hidratada.

Os organohalogenados atuam no bloqueio dos radicais livres formados na combustão, substituindo o radical HO·, que é altamente reativo, pelos radicais halogenídricos de baixa energia X, incapazes de manter as reações de combustão. O verdadeiro efeito retardante de chama é exercido pelo ácido halogenídrico (GALLO e AGNELLI 1998).



Os principais compostos organohalogenados utilizados são a base de cloro e bromo. Os compostos decabromodifenil eters são duas vezes mais eficientes do que os clorados e, como são utilizados em menor teor, afetam menos as propriedades mecânicas dos polímeros e suportam temperaturas maiores. Apesar de produzirem uma considerável quantidade de substâncias potencialmente perigosas e tóxicas (GALLO e AGNELLI, 1998), como os ácidos halogenídricos, ainda são muito utilizados no Brasil por serem mais baratas.

O composto trióxido de antimônio  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  é praticamente o único composto de antimônio usado como retardante de chama, não apresentando quase nenhuma eficiência, quando usado isoladamente. Entretanto, quando ele é utilizado em conjunto com retardantes de chama halogenados, observa-se uma poderosa sinergia positiva.

A alumina tri-hidratada, quando atinge temperaturas da ordem de  $230^\circ\text{C}$ , tem início a seguinte reação de desidratação:



Esta decomposição absorve cerca de 1,17 J/kg, o que contribui para a diminuição da temperatura do material, atenuando desta maneira o fenômeno da retroalimentação térmica. A água liberada (35%) dilui os gases combustíveis na chama. Outro aspecto que contribui para o efeito retardante deste aditivo é a formação de  $Al_2O_3$  (Óxido de alumínio) como uma camada protetora na superfície do produto, reduzindo a difusão do oxigênio para o meio reativo e dificultando a troca de calor. Como são utilizados em grandes quantidades, geralmente prejudicam o comportamento mecânico (SIQUEIRA *et al.*, 2001).

O sistema intumescente é uma alternativa viável de material retardante de chama livre de halogênios. Estes aditivos formam, com o aquecimento, uma camada carbonácea intumescente, que reduz a transferência de calor, de combustível e de oxigênio, cessando a chama. Entretanto, tem-se observado que apenas a adição de uma formulação intumescente muitas vezes não proporciona o aumento desejado na retardância de chama no material polimérico (LEWIN, 1998).

Os nanocompósitos tem atraído muito a atenção dos pesquisadores, pois não apresentam as desvantagens dos sistemas de retardantes de chama tradicionais. Segundo RIBEIRO (2012) nanocompósitos, principalmente do tipo polímero-argila, apesar de serem capazes de aumentar a estabilidade térmica do polímero e diminuir a taxa de liberação de calor, não impedem a degradação completa do polímero durante a queima. Além disso, esses materiais não têm apresentado resultados de retardância de chama adequados quando avaliados por meio de ensaios clássicos de inflamabilidade, tais como Índice Limite do Oxigênio (LOI) e UL-94, onde outros fatores, como o tempo de ignição, são mais determinantes.

## **2.5 PESQUISAS RELACIONADAS A PROPRIEDADES DE REAÇÃO AO FOGO DE PRFV**

BAINS *et al.* (1990) realizaram estudos para avaliar as propriedades retardantes de fogo do hidroxistanoato de zinco em relação às do trióxido de antimônio, em resinas baseadas na fonte de bromo contendo várias cargas inorgânicas. A eficácia desses

retardantes de chama depende de vários fatores, incluindo o nível de incorporação dos aditivos e enchimentos e teor de bromo da resina. Em geral, o trióxido de antimônio proporciona um ótimo desempenho, embora aumente a emissão de fumaça e o hidroxiestanato de zinco reduz significativamente a taxa de produção e o nível máximo de fumaça gerada a partir desses materiais.

EGGLESTONE e TURLEY (1994) testaram as características de queima de painéis reforçados com vidro com uma resina de poliéster isoftálica, a mesma resina com um retardante de chama inorgânico, duas resinas de estervinílica e um fenólico. Estudaram em uma variedade de valores de fluxo de calor incidente usando um cone calorímetro. O compósito fenólico foi superior a todos os níveis, mostrando um maior tempo de ignição, redução da produção de calor, menor contribuição para um incêndio sustentado de baixo nível (25 kW/m<sup>2</sup>) e um menor rendimento de fumaça.

SCUDAMORE (1994) comparou laminados com resinas poliéster (com 43% em massa de fibra de vidro), epóxi (em torno de 40% em massa de fibra de vidro) e fenólica (com 40% em massa de fibra de vidro) em termos de suas propriedades de reação ao fogo em um cone calorímetro, com e sem retardantes de chamas. A resina poliéster com retardador de chama à base de bromado mostrou uma diminuição acentuada na taxa de liberação de calor e na taxa de produção de fumaça. O retardante de chama à base de alumina tri-hidratada (67% em relação à resina) causou um atraso significativo no tempo de ignição para a resina epóxi e alguma redução na taxa de liberação de calor, mas a taxa de liberação de fumaça ainda era relativamente alta. Os laminados fenólicos mostraram um tempo de ignição longo e uma taxa de liberação de calor relativamente baixa (TLC). O PTLC foi ainda reduzido pela presença de hidróxido de alumínio e por alteração do tipo de reforço de vidro. A influência da espessura foi explorada para uma série de laminados fenólicos tanto no cone calorímetro quanto no teste de inflamabilidade superficial. O tempo de atraso da ignição foi significativamente afetado e os resultados do cone calorímetro mostraram que a forma da curva TLC também foi alterada à medida que a espessura aumentava. No entanto, as medições de liberação de calor no teste inflamabilidade superficial não foram sensíveis o suficiente para captar as diferenças nesta propriedade.

BROWN e MATHYS (1997) apresentaram valores de tempo de ignição, taxa de liberação de calor, calor eficaz da combustão e liberação de fumaça (monóxido de carbono e dióxido de carbono) para amostras de diferentes tipos de compósitos reforçados com fibra de vidro. Os corpos de prova apresentaram variação de taxa e forma da fibra de vidro, quatro tipos de resinas compondo a matriz e espessuras diferenciadas em ensaios com três fluxos de calor – 35, 50 e 75 kW/m<sup>2</sup>. Os resultados demonstraram propriedades de combustão superiores nos compósitos de matriz fenólica. Os parâmetros de tempo de ignição, taxa de liberação de calor e liberação de fumaça foram bem melhores, do ponto de vista de reação ao fogo, nesses corpos de prova.

HSHIEH e BEESON (1997) ensaiaram amostras de compósitos reforçados com fibras de vidro, aramida e grafite. As resinas utilizadas foram de epóxi e fenólica, onde a primeira recebeu tratamento de um retardante de chamas e a segunda nenhum tratamento. Os ensaios realizados no cone calorímetro tiveram uma atmosfera controlada onde os seguintes parâmetros foram obtidos: tempo de ignição, taxa de liberação de calor, propensão ao *flashover*, produção de fumaça e liberação de CO. Além do cone calorímetro, outros dois métodos de ensaios foram realizados: teste de propagação de chamas e teste de impacto mecânico com oxigênio líquido. Os resultados mostraram que o compósito fenólica/grafite apresentou maior resistência à propagação de chamas em comparação ao compósito epóxi/grafite no ensaio de propagação de chamas. Já no teste do cone calorímetro, os compósitos com resina fenólica apresentaram menor inflamabilidade, pico de TLC, propensão a *flashover* e produção de fumaça em relação ao epóxi. Já o tempo de ignição, os resultados foram semelhantes para as resinas testadas.

CUSACK *et al.* (1997) testaram formulações de resina poliéster contendo vários retardadores de chama halogenados no cone calorímetro de perda de massa e LOI. Resultados diferenciados foram obtidos, enquanto a adição do agente de sinergia Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atuou na redução da ignição e reduzir o calor total liberado, outros atuaram na redução de fumaça e no TLC. As diferenças de desempenho dos sinérgicos inorgânicos podem estar relacionadas aos mecanismos de ação durante a combustão. O agente de sinergia Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> opera principalmente na fase de vapor pela inibição das reações na chama. Em

contraste, ZB e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atuam predominantemente na fase condensada e ZHS atua em ambas as fases.

OHLEMILLER e SHIELDS (1999) estudaram sobre a capacidade de ignição e propagação de chamas de algumas resinas e a eficiência de vários revestimentos retardantes de chamas. As resinas testadas foram estereovínica, fenólica e poliéster, todas reforçadas com fibra de vidro e aplicação de várias espessuras dos retardantes de chamas, com sistemas intumescentes. O equipamento utilizado foi uma espécie de painel radiante com um queimador em sua base. Os pesquisadores concluíram que os revestimentos intumescentes controlaram de uma forma geral, o potencial de crescimento de liberação de calor, mas com considerável variação de resultados em relação aos diferentes fornecedores dos retardantes de chamas e das espessuras aplicadas.

Segundo HAKKARAINEN (2001), os índices de taxa de liberação de calor e inflamabilidade são aplicados para uma classificação europeia de produtos e seus níveis de combustão, visando um controle de qualidade. O autor cita o equipamento cone calorímetro como o mais indicado para obter esses dois índices, com um fluxo de calor de  $50\text{kW/m}^2$ , e alguns cálculos após os ensaios para complementação dos resultados. São listados diversos compósitos e seus respectivos tempo de ignição, taxa de liberação de calor e tempo para *flashover*.

BURCHILL *et al.* (2005) analisaram a perda de massa e a profundidade de dano produzido pela combustão em compósitos de fibra de vidro. Os ensaios foram feitos em um Cone Calorímetro de Perda de Massa com cinco tipos diferentes de fluxos, matrizes dos compósitos com dois tipos de resinas e quatro espessuras diferenciadas das amostras. Os autores concluíram que a profundidade de dano (a partir da observação da espessura da seção transversal e profundidade da carbonização) é proporcional a perda de massa e que o aumento do fluxo incidente e o tempo de exposição após a ignição é determinante para a perda de massa.

MOURITZ *et al.* (2006) pesquisaram sobre a relação entre a velocidade de liberação de calor e outras propriedades de reação ao fogo de materiais compósitos poliméricos

reforçados com fibras. Determinou-se a velocidade de liberação de calor e as propriedades de reação ao fogo de compósitos de matriz termoendurecida (poliéster, epóxi e estervinílica) reforçados com fibras combustíveis (aramida, polietileno de cadeia prolongada) ou fibras não combustíveis (vidro, carbono) numa gama de níveis de fluxo de calor utilizando a técnica do cone calorímetro. As propriedades de reação ao fogo que foram medidas foram tempo para ignição, densidade da fumaça, rendimento de monóxido de carbono, rendimento de dióxido de carbono, taxa de perda de massa e perda de massa total. Descobriu-se que estas propriedades de reação (com exceção do tempo de ignição) estão linearmente relacionadas com a taxa de liberação de calor para compósitos contendo fibras não combustíveis. Contudo, quando o reforço é combustível, a taxa de liberação de calor parece estar relacionada com o rendimento de monóxido de carbono, a taxa de perda de massa e (em alguns casos) a densidade de fumaça. Este estudo mostra claramente a importância da relação entre a taxa de liberação de calor com a densidade de fumaça e o rendimento de monóxido de carbono, duas propriedades de reação que influenciam a sobrevivência de seres humanos no fogo.

LAOUTID *et al.* (2009) apresentam uma revisão no campo de retardantes de chamas e os efeitos sinérgicos da mistura desses para materiais poliméricos. Se concentraram particularmente em nanocompósitos poliméricos, isto é, matrizes poliméricas preenchidas com nanopartículas. Relacionam resultados referentes aos equipamentos cone calorímetro, análises termogravimétricas, índice limite de oxigênio e queima vertical de vários pesquisadores. Os autores concluem que enquanto alguns sistemas, como compostos halogenados, estão no processo de serem banidos devido a preocupações com a saúde e o meio ambiente, sistemas como o uso de quantidades relativamente baixas de nanopartículas ou os efeitos sinérgicos dos retardantes de chama de várias famílias mostram resultados muito promissores.

PEREIRA *et al.* (2009) estudaram nanocompósitos de poliéster e o efeito das nanopartículas hidróxidos duplos (LDH) sobre as propriedades da resina e avaliaram a influência destes nas propriedades físicas, térmicas, mecânicas e de reação ao fogo, utilizando um cone calorímetro. Os resultados apresentaram uma redução significativa na inflamabilidade de 46% e 32%, por incorporação de 1% em peso de adipato-LDH (A-LDH) e 5% em peso de 2-metil-2-propeno-1-sulfonato-LDH (S-LDH),

respectivamente. Curvas de perda de massa mostram formação de carvão com as diferentes cargas testadas enquanto a quantidade de fumaça se mostrou inalterada.

BAI *et al.* (2010) ensaiaram perfis de polipropileno reforçados com fibras de vidro pultrudados para análise das propriedades termofísicas dos sistemas passivos de proteção contra incêndio: placa de silicato de cálcio, argamassa à base de vermiculita/perlita e sistema de arrefecimento a água. Os sistemas de proteção contra incêndios resultaram em variações benéficas podendo ser utilizados em um modelo de concepção de incêndio passivo.

CORREIA *et al.* (2010 parte A) realizaram uma série de investigações experimentais em perfis de polímeros com resina de poliéster reforçados com fibra de vidro (com 69% de fibra de vidro) para analisar seu comportamento quando expostos ao fogo. Foram ensaiados perfis com e sem proteção anti-chamas em um cone calorímetro de perda de massa com cinco tipos diferentes de fluxo de calor – 25, 35, 50 e 75 kW/m<sup>2</sup>. A presença dos materiais de proteção (silicato de cálcio (CS), vermiculita/perlita (VP) e revestimento intumescente (I)) contra incêndio melhorou consideravelmente o desempenho dos espécimes testados, em termos das propriedades de reação ao fogo. No que diz respeito a tempo de ignição, taxa de liberação de calor, perda de massa, produção de fumaça e liberação de gases tóxicos, os resultados encontrados pelos pesquisadores foram semelhantes aos relatados na literatura.

Em continuação ao trabalho anterior, CORREIA *et al.* (2010 parte B) apresentaram resultados experimentais sobre o comportamento de perfis reforçados com fibra de vidro (69%) à base de resina poliéster expostos ao fogo com e sem proteção contra incêndio. O programa experimental incluiu análises dinâmicas mecânicas (DMA), termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial (TGA/DSC) e experimentos de resistência ao fogo em feixes tubulares de PRFV. O feixe de PRFV desprotegido falhou após cerca de 38 min, os três diferentes sistemas de proteção passiva (placa de silicato de cálcio (CS), uma vermiculite/argamassa à base de perlita (VP) e revestimento intumescente) forneceram uma resistência ao fogo entre 65 e 76 min e o sistema de resfriamento a água forneceu uma resistência ao fogo de pelo menos 120 min.

ZHANG e DELICHATSIOS (2010) avaliaram nanocompósitos, polibutileno tereftalato e o etileno-acetato de vinila, como uma alternativa aos retardantes de chama tradicionais, para melhorar a resistência e retardamento de chama de materiais poliméricos. As medições foram realizadas num cone calorímetro com três fluxos de calor externo (40, 50 e 60 kW/m<sup>2</sup>). Os autores concluíram que o retardamento por nanocompósitos é devido à formação de uma camada superficial e que o efeito retardador de fogo da nanopartícula depende do tipo de polímeros, bem como do tipo e concentração de nanopartículas.

NGUYEN *et al.* (2013) investigaram o desempenho em incêndio de polímeros reforçados com fibras de vidro de resinas de poliéster, estervinílica, epóxi e fenólica. Nesta pesquisa, a produção de gás quente do processo de pirólise, a taxa de crescimento do fogo) e a propagação de chama do teste item de queima única (SBI) foram convenientemente simuladas usando um programa computacional *Fire Dynamic Simulator* (FDS). O tempo computacional foi definido como 900 segundos e o tempo de ignição ajustado em 300 segundos. Os resultados numéricos mostram que o composto à base de fenol é o único material que passa nas exigências da CTL<sub>600s</sub> e da FIGRA para a classe B. Os valores de CTL<sub>600s</sub> de todos os materiais estão bem abaixo do limiar de 7,5 MJ. Contudo, a resina de estervinílica, poliéster e epóxi excedem os critérios limiares para FIGRA, que é 120 W/s. O composto à base de poliéster tem o maior FIGRA, que é quase três vezes maior que a da com base em epóxi. Embora a libertação total de calor CTL<sub>600s</sub> dos quatro materiais são em torno de 4,7 MJ, a grande variação nos valores FIGRA sugere que há diferenças no desenvolvimento da chama através das amostras. Foi constatado que é crucial utilizar retardadores de chama para compósitos à base de poliéster.

NGUYEN *et al.* (2014) estudaram estratégias para melhoramento de resistência ao fogo para painéis de compósitos PRFV com resina poliéster e adição de retardantes e revestimentos em gel. Foram feitas análises termogravimétricas e item de queima única (SBI) para obtenção de dados sobre a taxa de liberação de calor, taxa de crescimento de fogo e produção de fumaça. Embora a exigência de segurança para a liberação de calor tenha sido alcançada, os valores relacionados a fumaça não ultrapassaram os requisitos, o que indica a necessidade de novas melhorias.

CORREIA *et al.* (2015) elaboraram uma revisão sobre estudos do desempenho ao fogo de perfis de PRFV pultrudados. Primeiramente abordaram o efeito da temperatura elevada nas propriedades termofísicas e termomecânicas do material. Em seguida, as propriedades de reação ao fogo e os efeitos de diferentes proteções contra incêndios. Por último, uma seção de revisões anteriores sobre estudos experimentais e de modelagem sobre o comportamento de resistência ao fogo de diferentes tipos de membros estruturais de PRFV. Os autores concluem que, embora uma quantidade significativa de pesquisa já tenha sido realizada, perguntas não respondidas ainda permanecem onde o trabalho é mais requerido. Pontos críticos em estruturas compostas por perfis pultrudados são as conexões entre eles, que são aparafusadas ou coladas. Investigações do comportamento dessas conexões sob temperaturas elevadas e fogo ainda estão escassos. Depois de um acidente de fogo, a questão surge se uma estrutura que foi exposta a altas temperaturas ainda pode ser usada ou danos podem ser reparados. Investigações sobre as propriedades pós-fogo de perfis PRFV ainda são necessários.

MONTI *et al.* (2015) avaliaram a reação ao fogo de polímeros termoplásticos (poliamida 6) sem e com reforço de fibras de vidro e partículas de argila de tamanho nanométrico (poliamida dopada com nanopartículas 6 (PA6)) através do cone calorímetro, UL-94 e outros equipamentos. No caso do cone calorímetro não houve evidência de melhor desempenho, apenas uma redução da temperatura da superfície de queima, o que contribui para diminuir a taxa de combustível produzido pela degradação térmica do polímero. Por outro lado, em um cenário de propagação de chama vertical, a argila leva à extinção de chamas, apesar da extinção não ser no tempo adequado para obter a classificação em conformidade com o Teste UL94.

MORGAN e GILMAN (2016) apresentam uma visão geral sobre retardantes de chama comerciais. Segundo os autores, existem seis classes gerais de aditivos químicos retardadores de chama disponíveis hoje. São eles: nanocompósitos poliméricos, retardantes inorgânicos (boratos, estانات e silicatos), retardantes intumescentes, preenchimentos minerais (hidróxido de alumínio  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , frequentemente chamado de “alumina tri-hidratada, e de magnésio  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ou carbonato de magnésio e de cálcio), retardantes à base de fósforo e halogenados.

NGUYEN *et al.* (2016a) utilizaram modelos de CFD desenvolvidos para imitar as condições de teste da análise termogravimétrica e do calorímetro de cone e posteriormente validação com experimentos com amostras de PRFV com resina de poliéster com e sem adição do composto argila organofilizada. O desempenho em incêndio do laminado GFRP com concentração de argila de 5% foi simulado com sucesso no modelo de CFD desenvolvido. Foi constatado que a inclusão de argila em concentração de 5% impede o flash-over e também a propagação da chama na direção horizontal do Painel PRFV.

NGUYEN *et al.* (2016b) investigaram uma resina de poliéster com fibra de vidro com e sem argila organofilizada para determinar a sua influência sobre o desempenho ao fogo dessa substância nos polímeros. Um novo procedimento numérico combinando a análise de pirólise dos compostos e a simulação dinâmica do processo de combustão são desenvolvidos para validar as respostas térmicas obtidas a partir dos experimentos do cone calorímetro. Os resultados numéricos são comparados com os experimentais em termos de liberação total de calor, índice de crescimento do fogo, resistência ao fogo e liberação total de fumaça dos compósitos. Os resultados experimentais indicaram melhorias significativas no comportamento de reação ao fogo dos compósitos de GFRP com o aumento de teor da argila organofilizada.

NGO *et al.* (2016) investigaram os efeitos da argila em tamanho nanométrico (variando de 1 a 5%) sobre as propriedades mecânicas em um teste de tração padrão e o desempenho ao fogo de compósitos de fibra de vidro com resina epóxi utilizando um cone calorímetro. Uma percentagem baixa de menos de 3% em peso de argila em tamanho nanométrico produz uma camada de carvão. A 5% em peso de argila observaram uma redução de 7s no tempo de ignição, 45% de redução no pico de velocidade de liberação de calor, 15% de redução na liberação de calor total e 15% de redução na taxa de produção de fumaça.

NGO *et al.* (2016) investigaram o desempenho ao fogo de uma unidade de escritório modular de PRFV com matriz poliéster simulados com dinâmica de fluidos computacional (FDC), a partir das experiências do equipamento cone calorímetro. A curva TLC atinge o pico em 270 kW/m<sup>2</sup> após 131s do início do teste. O CTL médio das

amostras compostas é de 47,3 MJ/m<sup>2</sup> com um calor de combustão eficaz de 17,9 MJ/kg. Os autores concluem que a incorporação futura de retardadores de fogo na fachada certamente melhoraria o desempenho ao fogo, minimizando também a fumaça gerada e, portanto, o desempenho global da unidade de escritório modular.

ZHANG e DELICHATSIOS (2017) investigaram painéis de PRFV pultrudados acoplados a outros painéis com função de retardante de chamas em situação de incêndio. Três tipos de painéis resistentes ao fogo, nomeadamente placa de magnésio em vidro (GM), placa de gesso e cálcio leve (GP) e placa de silicato (CS), foram instalados na face externa do painel plano PRFV inferior usando parafusos. As superfícies inferiores dos espécimes construídos foram então expostas ao fogo. Os resultados da análise termogravimétrica sugeriram que os painéis com função de resistência ao fogo diminuíram a temperatura de decomposição do compósito, podendo elevar a retardância de chama em conjuntos estruturais.

KHALILI *et al.* (2017) utilizaram várias composições de epóxi com retardantes de chamas - polifosfato de amônio (APP), alumina tri-hidratada (ATH) e híbrido ATH/APP – e incorporação de fibras naturais (NF) para avaliação sobre a inflamabilidade, propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos. A incorporação de NF na matriz epóxi pura reduziu o calor de combustão e diminuiu a temperatura de degradação térmica. A adição de APP aumentou as propriedades de resistência à chama do compósito com um tempo de combustão muito reduzido e gotejamento zero. O híbrido de 10% em peso de ATH e 5% em peso de APP mostrou ser o retardador de chama mais promissor com uma propriedade auto-extinguível bem como o calor de combustão mais baixo e o maior resíduo de carvão entre as várias formulações investigadas. Em geral, as formulações contendo apenas ATH não proporcionaram uma resistividade eficaz da chama quando comparada com a das composições preenchidas com APP. As formulações preenchidas com ATH reduziram a resistência à tração, o alongamento à ruptura e as propriedades de flexão, enquanto se observou um aumento na resistência à flexão de formulações carregadas com APP.

Apesar do número razoavelmente grande de publicações disponíveis mostrando a eficácia do uso de diferentes tipos de sistemas de proteção contra incêndio associados a materiais de PRF, pode-se argumentar que o escopo é limitado; por exemplo, a influência de organohalogenados (DBDE) com a alumina tri-hidratada (ATH) e trióxido de antimônio ( $Sb_2O_3$ ) na resina poliéster foi pouco examinada. Além disso, apenas uma pequena fração desses estudos aborda a influência da ATH no comportamento de reação ao fogo do PRFV. Ademais, a variação de concentração de ATH na resina poliéster reforçada com fibra de vidro e a correlação com a resina fenólica, que é considerada um material naturalmente retardante de chama (ROTHON, 1999; BROWN e MATHYS, 1997; EGGLESTONE e TURLEY, 1994), ainda não foi avaliada. O uso de ATH é uma maneira de produzir materiais livres de halogênio, que são extremamente tóxicos (GALLO e AGNELLI, 1998) e muito utilizados no Brasil, devido ao seu baixo custo.

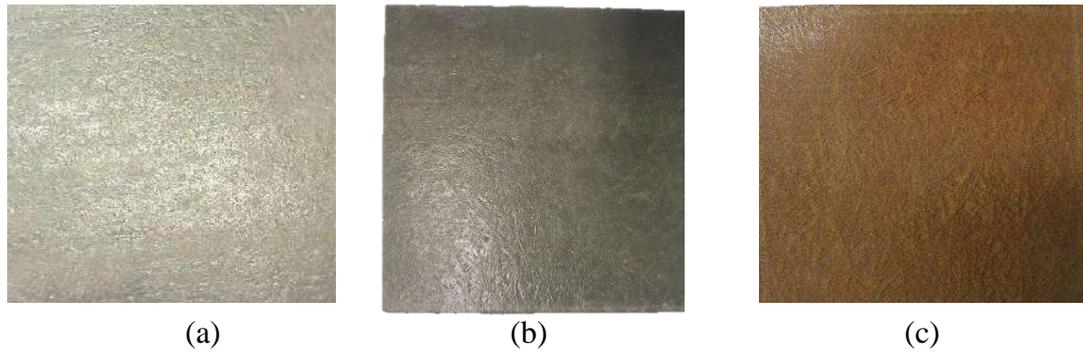
# 3

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

Para a avaliação do comportamento de reação ao fogo de materiais pultrudados reforçados com fibra de vidro (PRFV) com e sem retardantes de chama, a pesquisa teve 5 (cinco) linhas de atuação: (i) avaliação experimental no equipamento Cone Calorímetro de Perda de Massa de acordo com as recomendações contidas nas normas ISO 17554 (2014), específica para avaliar a taxa de perda de massa, e ISO 13927 (2015), que avalia a taxa de liberação de calor e tempo de ignição das amostras, (ii) avaliação experimental no equipamento UL-94 normatizada pelo UL-94 (2003), (iii) avaliação experimental no equipamento LOI normatizado pela ISO 4589-2 (1996), (iv) índice de inflamabilidade no equipamento fio incandescente normatizado pelas IEC 60695-2-10 (2000), IEC 60695-2-12 (2000) e IEC 60695-2-13 (2000) e (v) medições termogravimétricas (TGA) e calorimetria de varredura diferencial (DSC), normatizados pela ISO 11357 (1997).

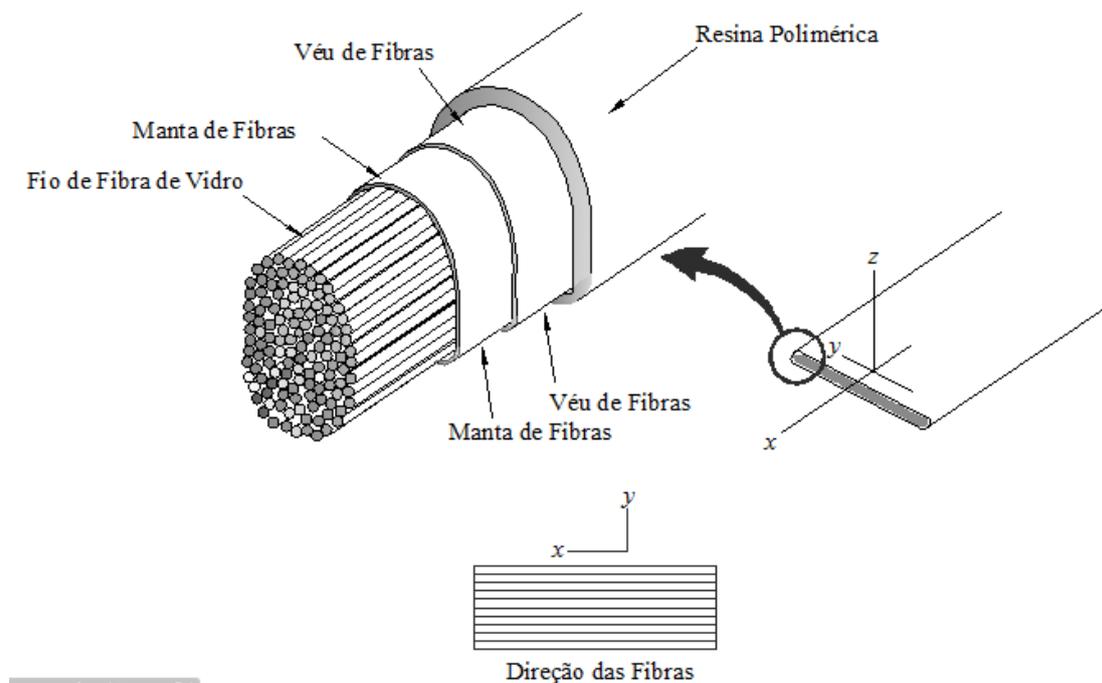
### **3.1 MATERIAIS**

Todos os materiais PRFV utilizados nesta investigação experimental foram produzidos através da pultrusão e fornecidos pela empresa Cogumelo Pultrudados situada no Rio de Janeiro, Brasil. Três diferentes resinas poliméricas termofixas foram analisadas: (i) estervinílica bisfenol-A (Figura 3-1-a), (ii) poliéster isoftálica (Figura 3-1-b) e (iii) fenólica (Figura 3-1-c), todas reforçadas com a fibra de vidro *E-glass* de baixa condutividade elétrica.



**Figura 3-1**– Resinas poliméricas termofixas analisadas: (a) estervinílica bisfenol-A, (b) poliéster isoftálica e (c) fenólica (PRÓPRIO AUTOR).

Estes materiais poliméricos são constituídos por camadas de fibra de vidro no sentido longitudinal da direção da pultrusão (50% de fibra em massa para as resinas estervinílica e poliéster e 85% para a resina fenólica) incorporados na resina polimérica. As fibras são posicionadas no centro, envolvidas por uma manta e véu de fibras enquanto um acabamento de resina polimérica finaliza a superfície do material, conforme ilustrado na Figura 3-2.



**Figura 3-2** – Dissecação de um laminado de PRFV (PRÓPRIO AUTOR).

Três diferentes sistemas de retardantes de chama foram usados: (i) alumina tri-hidratada (ATH), (ii) decabromodifenil eter (DBDE) e (iii) trióxido de antimônio ( $Sb_2O_3$ ). Inicialmente, conforme já comercializado pelo empresa Cogumelo, os retardantes foram adicionados isoladamente e posteriormente misturados nas resinas estervinílica e poliéster (a matriz fenólica não recebeu nenhum tipo de tratamento de retardância devido ao alto teor de fibra de vidro e pela sua característica inerente retardante de chama). A ATH foi adicionada inicialmente em um percentual relativamente baixo considerando as concentrações utilizadas, por exemplo, por SCUDAMORE (1994) e as concentrações apontadas por FRANCHINI *et al.* (2011), dentre outros, como ideais para obtenção de boas propriedades retardantes de chama, pois neste caso se trata inicialmente de um elemento de carga do material utilizado. Contudo, como já está bem estabelecida na literatura a ação da ATH como retardante de chama em materiais poliméricos, procurou-se avaliar as propriedades de retardância de chama do material mesmo com a concentração baixa de ATH, que é a concentração usada pela empresa Cogumelo no mercado nacional, e posteriormente a sua ação conjunta com o DBDE objetivando um possível efeito de sinergia a partir da combinação de diferentes modos de ação de retardantes. Os compostos DBDE funcionam muito bem em menor teor em relação a ATH e, apesar de produzirem uma considerável quantidade de substâncias potencialmente perigosas à saúde (FRANCHINI *et al.*, 2011) ainda são muito utilizados no Brasil. O  $Sb_2O_3$  foi adicionado como agente sinérgico com o DBDE e, posteriormente, em um sistema com a combinação de ATH e DBDE somente na resina poliéster devido aos melhores resultados obtidos com essa matriz em relação à resina estervinílica.

Um código de letras e números foi utilizado para facilitar a identificação das amostras, conforme demonstrado na Tabela 3-1. A primeira letra representa a resina utilizada: V para estervinílica, P para poliéster e F para fenólica. O segundo elemento refere-se ao tipo de retardante aplicado: A para ATH, B para DBDE e C para trióxido de antimônio. No caso dos retardantes trióxido de antimônio e ATH, foi acrescido um número após as letras para diferenciar as diversas concentrações utilizadas.

Todas as concentrações de retardantes de chama são relativas à resina (partes por cem de resina - phr). O conteúdo inicial (37phr ATH e 6,5phr DBDE) foi definido de acordo com a produção da empresa Cogumelo Pultrudados. Subsequentemente, os valores do composto de DBDE foram duplicados e triplicados adicionando o composto de trióxido de antimônio na proporção de 3: 1, para verificação da sinergia e determinação da melhor percentagem. Depois, a estas mesmas concentrações de DBDE e trióxido de antimônio, foi adicionada ATH em 37 phr e esta concentração foi mantida para avaliar a influência da ATH neste composto. Finalmente, devido aos bons resultados com a ATH e por ser uma substância de baixo custo e baixa toxicidade, o comportamento foi observado com algumas concentrações, sempre variando em 10,75 phr. Os corpos de prova ficaram divididos em seis sistemas, conforme Tabela 3-1, onde o primeiro grupo é formado apenas pela matriz estervinílica, contendo ou não retardantes de chama, do segundo ao quinto grupo são formados apenas pela matriz poliéster, com e sem retardantes de chama, e o último grupo composto apenas pela resina fenólica sem retardante de chama.

**Tabela 3-1** – Composições dos sistemas testados.

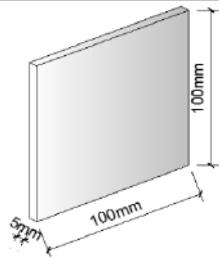
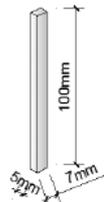
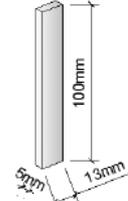
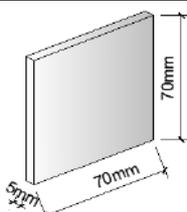
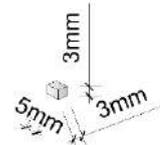
IDs	Resina			Retardante (phr)		
	Estervinílica	Poliéster	Fenólica	ATH	DBDE	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
V	x					
VA	x			37		
VB	x				6,5	
VAB	x			37	6,5	
P		x				
PA		x		37		
PB		x			6,5	
PAB		x		37	6,5	
PBC1		x			13	4,3
PBC2		x			19,5	6,5
PABC1		x		37	13	4,3
PABC2		x		37	19,5	6,5
PA1		x		47,75		
PA2		x		58,5		
PA3		x		69,25		
PA4		x		80		
F			x			

Com o auxílio de uma serra de bancada dotada de um disco diamantado, os corpos de prova foram lixados para máxima precisão nas suas dimensões.

Conforme demonstrado na Tabela 3-2, para o equipamento cone calorímetro foram utilizados 3 corpos de prova, conforme solicitado nas normas ISO 17554 (2014) e ISO 13927 (2015), com dimensões de 100 x 100 x 5 *mm*. Já para o equipamento LOI foram utilizados corpos de prova suficientes para três confirmações de presença de chama e mais três confirmações de ausência de chama, cada um com dimensões de 100mm x 7mm x 5mm, conforme solicitado na ISO 4589-2 (1996). Para o ensaio UL-94 foram necessários 5 corpos de prova, com dimensões 100 mm x 13mm x 5mm, para classificação conforme critérios contidos na norma UL-94 (2003). Já para o ensaio do fio incandescente, foram utilizados no mínimo seis corpos de prova, de dimensões 70 x 5 *mm*, para confirmação das temperaturas conforme descrito nas IEC 60695-2-10,12,13 (2000). Para as análises simultâneas de TGA/DSC foi utilizado apenas 1 corpo de prova com dimensões mínimas (mantendo a configuração da dissecação do laminado demonstrado na Figura 3-2) para caber na panelinha de platinada.

A Tabela 3-2 apresenta cada equipamento utilizado, bem como as propriedades de reação ao fogo medidas, padrões utilizados, dimensões e número de corpos de prova testados. No total foram utilizados 26 espécimes para cada compósito previamente definido, totalizando 416 amostras testadas.

**Tabela 3-2** - Resumo dos testes experimentais realizados e caracterização de amostras.

Teste	Normas	Dimensões das amostras	Número de amostras
<b>Cone Calorímetro de perda de massa</b> (reação ao fogo)	ISO 17554 (2014) ISO 13927 (2015)		3
<b>LOI</b> (ignitibilidade)	ISO 4589-2 (1996)		$\geq 10$
<b>UL-94</b> (ignitibilidade e propagação de chama)	UL-94 (2003)		5
<b>Fio incandescente</b> (índice de inflamabilidade do fio incandescente e temperatura de ignição)	IEC 60695-2-10(2000) IEC 60695-2-12(2000) IEC 60695-2-13(2000)		$\geq 8$
<b>TGA/DSC</b> (variação de massa e mudanças de energia em função da temperatura)	ISO 11357 (1997)		1

### 3.2 MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DE INFLAMABILIDADE

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil e no Laboratório de Fluidos e Materiais Poliméricos Multifásico (FLUMAT) do Pólo de Xistoquímica, ambos da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A descrição da metodologia aplicada em cada teste é descrita nas subseções seguintes.

### 3.2.1 Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCCPM)

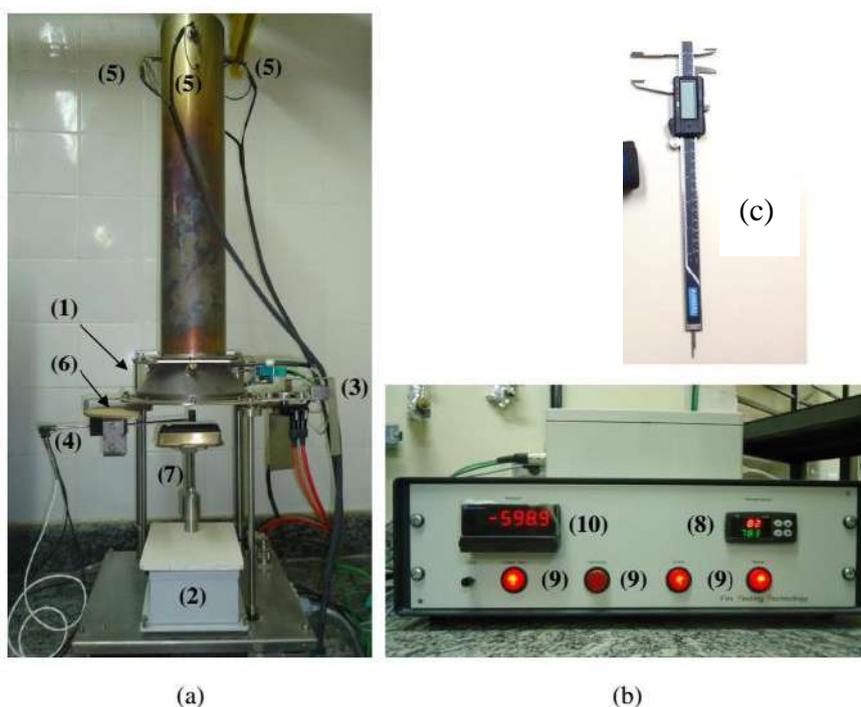
O CCCPM é atualmente o método mais avançado para avaliar as reações dos materiais ao fogo (WANG *et al.*, 2017). Através dele é possível obter de forma quantitativa: (i) taxa de liberação de calor por unidade de superfície e tempo - TLC (expresso em  $\text{kW/m}^2$ ), considerado hoje pela ciência de segurança contra incêndios parâmetro que quantifica a real contribuição dos materiais para um incêndio (BABRAUSKAS *et al.*, 2017), bem como o pico do TLC (PTLC), (ii) calor total liberado (CTL), (iii) taxa de perda de massa (TPM), (iv) tempo de ignição (TTI) e (v) tempo de combustão (TOC).

Conforme ROCHA e LANDESMANN (2015), o TLC é registado pelo CCPM em função do tempo decorrido do teste; a aquisição de dados foi ajustada em intervalos de amostragem de 1s (*i.e.*, 1 Hz). Este equipamento possui uma coluna com termopilhas (como apresentado na Figura 3-3 (a)). As termopilhas fornecem como saída valores em mV que são convertidos em TLC (kW) através de uma curva de calibração, que é obtida da através do procedimento apresentado posteriormente. O CTL foi também determinado diretamente a partir do equipamento CCPM, como a soma do calor total liberado durante a duração do teste ( $\text{MJ/m}^2$ ). O TPM da amostra é apresentado como uma porcentagem da massa original consumida já que o peso é monitorado continuamente com a balança até o final do ensaio. O TTI exibe o resultado do tempo para o início da chama na superfície das amostras como resultado da radiação de calor obtido diretamente através da linha temporal do equipamento e dado em segundos. Finalmente, o TOC é medido desde o início da observação da chama sustentada até que ela seja cessada, também dado em segundos.

O PTLC é considerado como o parâmetro que melhor expressa a intensidade máxima de uma curva de TLC (JUNHYUN *et al.*, 2012). Ele é alcançado logo após um período inicial onde nenhum calor é liberado porque o material ainda não atingiu a temperatura de decomposição. Subsequentemente, verifica-se uma subida do TLC até atingir um pico devido à ignição de gases voláteis inflamáveis da superfície do material. Em seguida, o TLC começa a descer gradualmente devido ao consumo da resina e ao surgimento de uma camada carbonizada na superfície (mais importantes em resinas fenólicas do que nas resinas poliéster e estervinílica) retardando a taxa de decomposição

das camadas subjacentes. Em um último momento, quando a resina superficial do polímero reforçado com fibra de vidro já foi completamente consumida, o TLC torna-se insignificante (CORREIA *et al.*, 2015).

A Figura 3-3 (a-b) representa o equipamento FTT-0014/2012 utilizado na configuração experimental e paquímetro digital utilizado para aferimento das dimensões dos corpos de prova (Figura 3-3c). O CCPM utilizado é composto por duas partes: (i) conjunto do cone (Figura 3-3a) - constituída de (1) aquecedor, (2) balança (capacidade para amostras de 500 g), (3) ignição por faísca, (4) medidor de fluxo, (5) três termopares de controle, (6) mecanismo de obturador térmico e (7) suporte para amostras horizontais - e (ii) a unidade de controle (Figura 3-3b) - contendo (8) um controlador de temperatura de leitura digital; (9) interruptores para alimentação, ignição, célula de carga e aquecedor cônico; e (10) controlador com leitura digital da célula de carga e tara eletrônica.

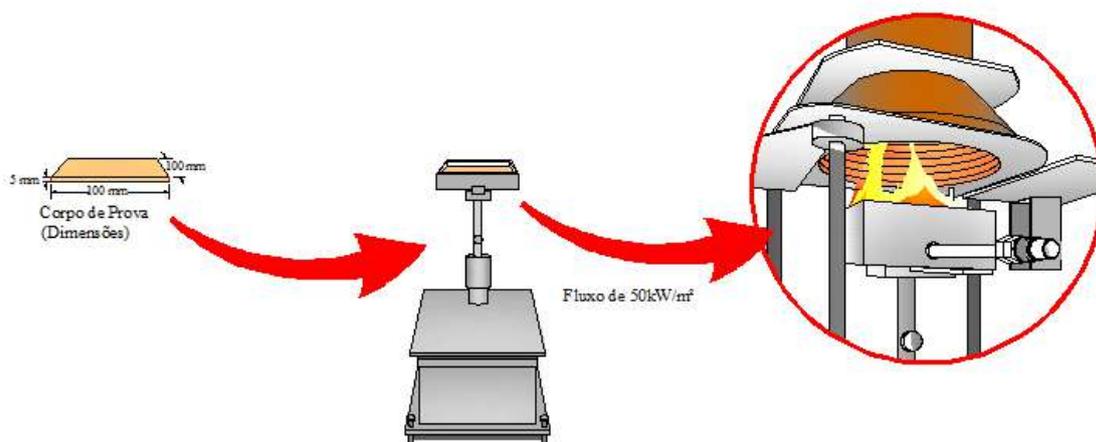


**Figura 3-3** - Equipamento CCPM utilizado nos ensaios – (a) conjunto do cone, (b) unidade de comando e (c) paquímetro digital.

Em resumo, o método de teste CCPM é baseado na observação de que o calor total liberado é diretamente relativo à temperatura dos gases de combustão na chaminé, que,

por sua vez, é uma função das componentes nesses gases (metano) - a relação é que aproximadamente 1 kW de calor de liberação de gás metano a 99% de pureza é de 1,67 l/min.. Com efeito, a fim de determinar a resposta da termopilha, um dado fluxo de metano é queimado sob a chaminé e o sinal da termopilha gravado. Isto é realizado para nove fluxos diferentes de metano correspondentes a 5, 4, 3, 2, 1, 0,75, 0,5, 0,25 e 0 kW. Estes dados de resposta/calibração são então usados no software CCPM para determinar a liberação de calor a partir de amostras testadas observando a resposta termopilha e comparando com os dados de calibração para determinar qual o nível de liberação de calor é alcançado.

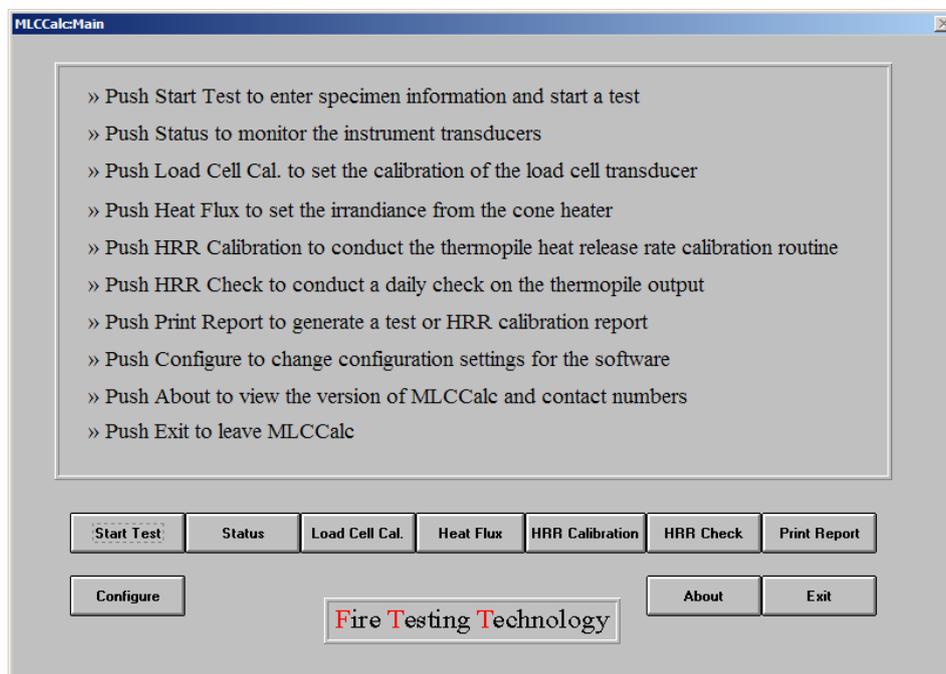
No ensaio, a superfície da amostra é exposta a um nível constante de radiação de calor, dentro da gama de 0-100 kW/m<sup>2</sup>, e colocada sobre uma balança que registra a taxa de perda de massa durante a combustão, conforme apresentado na Figura 3-4. Os corpos de prova foram irradiados na posição horizontal com um fluxo de calor de 50kW/m<sup>2</sup>, que corresponde ao calor liberado em incêndios bem desenvolvidos, segundo SCHARTELK *et al.* (2005). Todos os corpos de prova que apresentaram ignição tiveram a finalização do ensaio depois de 2 minutos decorridos do cessar chama, seguindo as recomendações da ISO 13927 (2015). Os que não apresentaram, após 10 minutos do início do ensaio.



**Figura 3-4** - Esquema geral do ensaio no CCPM de orientação horizontal (PRÓPRIO AUTOR).

## Calibração do equipamento

Como parte integrante desta tese, foi necessária a calibração de todas as partes do equipamento do Cone Calorímetro para montagem e, posteriormente, a calibração de alguns módulos antes de cada ensaio, que será apresentada em seguida. O aplicativo de software instalado foi o *MLCCalc* (Figura 3-5).



**Figura 3-5** - Imagem do software - quadro principal.

## Tara da balança

Para realizar a aquisição dos dados de evolução de massa, foi utilizada a balança com precisão de  $\pm 0.1$  g e tempo de resposta de 1 s. O controlador da balança pode ser dimensionado para ajustar o intervalo de saída de acordo com a massa da amostra a ser testada. Assim, pode ser configurado para dar um sinal de 10 V para 50 g ou 300 g (ou qualquer outro valor *span*). Para configurar a balança, primeiro foi necessário determinar a massa máxima das amostras. Foi escolhido um intervalo um pouco maior do que a maior massa utilizada e o valor inserido na caixa de edição (*Span Value*).



**Figura 3-6** - Imagem do suporte para amostra e massa de 100g para calibração da balança.

### **Fluxo de calor**

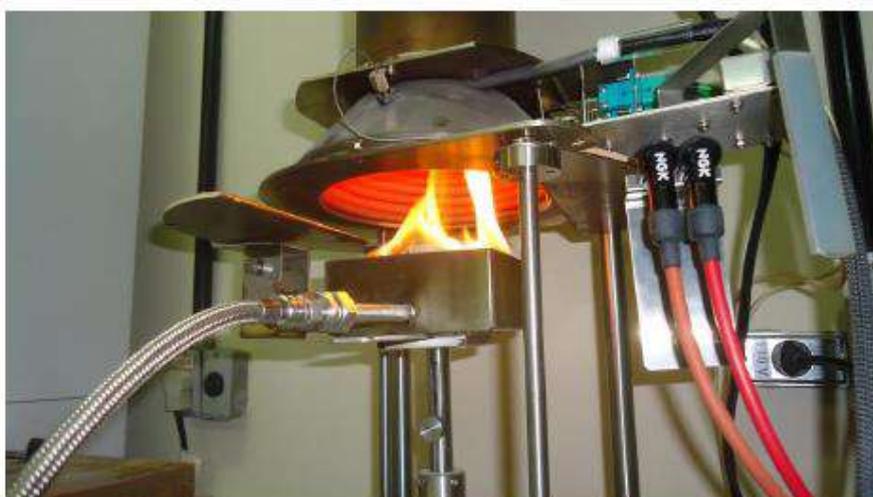
Antes de testar uma amostra ou a realização de uma calibração da taxa de liberação de calor, a temperatura do cone aquecedor foi ajustada para dar o fluxo de calor necessário. Um medidor de fluxo de calor foi colocado sob o cone aquecedor no ponto correspondente ao centro da superfície da amostra (Figura 3-7) e o controlador de temperatura ajustado até que o fluxo de teste requerido seja alcançado. Para os ensaios dessa tese, foi definido um fluxo de calor de  $50\text{kW/m}^2$  (os valores iniciais na caixa são 25, 30, 35, 50, 75 e  $100\text{kW/m}^2$ ), e uma distância de 25mm entre a superfície da amostra e o cone. Se um fluxo de calor ou uma distância diferente fosse necessário, esta lista poderia ser editada.



**Figura 3-7** - Imagem do medidor de fluxo de calor em uso.

## Taxa de liberação de calor

A fim de medir a taxa de liberação de calor, o sinal proveniente do sistema de termopilha de saída foi determinado para o fluxo de calor utilizado, nesse caso,  $50\text{kW/m}^2$  e a distância entre a superfície da amostra e o cone calorímetro para 25mm. Para determinar essa resposta, um dado fluxo de metano foi queimado sob a chaminé (Figura 3-8) e o sinal gravado no equipamento. Isto foi realizado por oito fluxos de metano correspondentes a 5kW, 4kW, 3kW, 2kW, 1kW, 0,75kW, 0,5kW e 0,25kW.



**Figura 3-8** - Imagem do início da calibração do HRR.

O fornecimento do metano foi liberado e a centelha elétrica acionada até o gás ter sido inflamado. O regulador de saída de gás metano foi ajustado com a vazão necessária para alcançar a velocidade de liberação de calor requerida, conforme demonstrado na Tabela 3.3.

**Tabela 3-3.** Tabela com fluxos e vazões de gás metano correspondente.

FLUXO (kW)	VAZÃO (l/min)
5	8,38
4	6,70
3	5,03
2	3,35
1	1,68
0,75	1,26
0,5	0,83
0,25	0,42

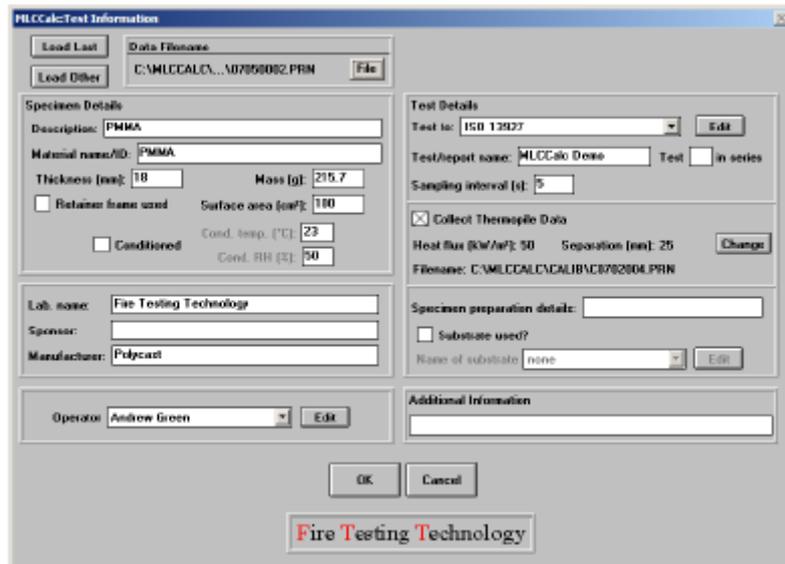
## **Verificação da taxa de liberação de calor**

Antes de iniciar efetivamente o teste, o sistema de calibração da taxa de liberação de calor foi verificado. No quadro principal do software, o item verificação do TLC foi acionado. Para essa verificação o fornecimento do gás metano foi liberado e a ignição acionada até o gás ter sido inflamado. O regulador foi ajustado para uma velocidade de 3kW (5,03 l/min) e os dados de base recolhidos por 60 segundos. Quando a taxa de liberação de calor ficou dentro dos limites,  $3\text{kW} \pm 5\%$ , um cronômetro foi acionado indicando o tempo que a taxa de liberação de calor ficou estabilizado.

## **Conduzindo o teste**

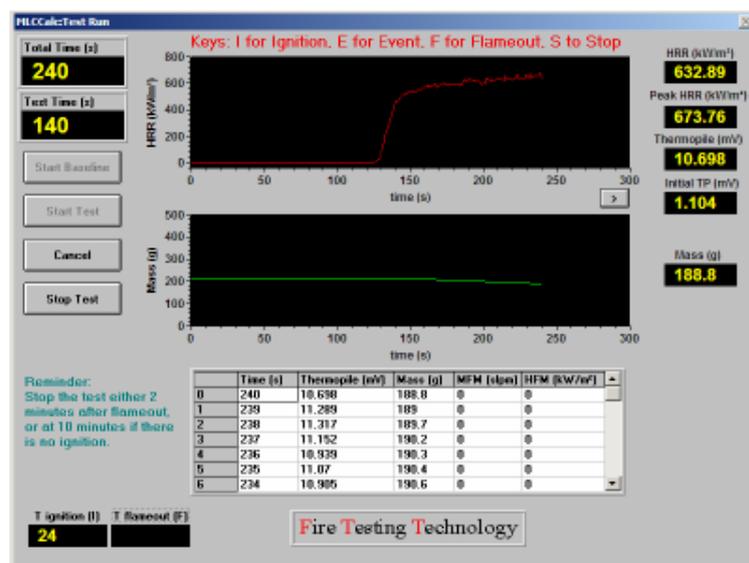
Para o procedimento dos testes experimentais, os seguintes procedimentos foram adotados:

- (i) Calibração da célula de carga: os ensaios começavam pela calibração da célula de carga. O suporte era colocado vazio sobre a balança para “zerar” o painel. Logo em seguida, posicionada a placa de 100g para o registro do valor de SPAN e conferência do peso da amostra;
- (ii) Aquecimento do cone calorímetro: durante esse processo o aquecedor funcionava a uma taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . e os três termopares localizados no equipamento mediam a temperatura do mesmo. O fluxo foi definido para  $50 \text{ kW}/\text{m}^2$  e a distância para 25mm;
- (iii) Controle do fluxo de calor: quando o cone atingia a temperatura pré-determinada, nesse caso  $783^{\circ}\text{C}$ , e acusava o valor do fluxo solicitado, eram aguardados 10 minutos para estabilização da temperatura;
- (iv) Início dos testes: depois de estabilizada a temperatura, o cone era fechado e o programa iniciado para obtenção dos dados. Os valores de entrada (número da amostra, teor de umidade, espessura, área, massa inicial e observações) eram inseridos no *software* (Figura 3-9) e logo em seguida, com o suporte do cone aberto, aguardados 60 segundos para que o aquecedor entrasse em equilíbrio térmico. Após esse tempo, o suporte era fechado e o corpo de prova colocado sobre a célula de carga para início dos ensaios. As leituras de perda de massa e HRR eram feitas simultaneamente logo após a reabertura do aquecedor;



**Figura 3-9** - Imagem do software – Painel de informações do teste a ser realizado.

- (v) Obtenção dos dados: para obtenção do tempo de ignição, foi necessária a observação e marcação manual. Em relação à temperatura de ignição, foi utilizado um termômetro infravermelho acionado sobre a superfície da amostra no momento da chama aparente. Todos os outros dados obtidos nesse presente trabalho foram retirados de gráficos acompanhados ao longo dos ensaios em função do tempo decorrido em uma frequência de 1hz (Figura 3-10). Esses dados de saída eram registrados automaticamente;
- (vi) Finalizando os testes: os ensaios eram encerrados 2 minutos após sinais de fim de combustão ou 10 minutos após o início do ensaio, caso não houvesse ignição.



**Figura 3-10** - Imagem do software – painel do teste em execução.

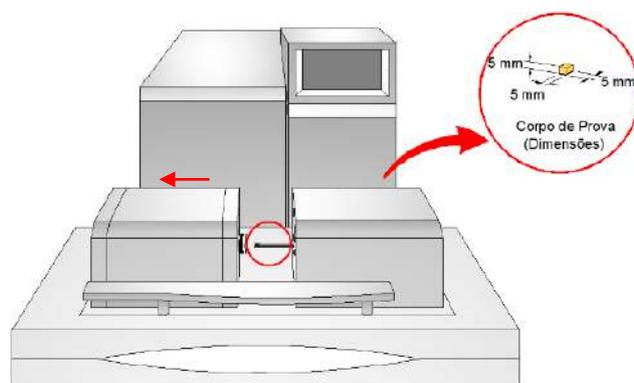
### 3.2.1 Análise simultânea de termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Foram realizadas análises simultâneas de termogravimétricas (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC), normatizado pela ISO 11357 (1997), nos materiais pultrudados PRFV contendo ou não aditivos retardantes de chama, para determinar a variação de massa e as variações de fluxo de calor em função da temperatura, respectivamente. Segundo CANEVAROLO (2004) a técnica de TGA permite verificar as alterações que o aquecimento pode provocar na massa das amostras, podendo-se estabelecer a faixa de temperatura em que ocorrem reações associadas à perda de massa, tais como aquelas de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, entre outras.

Os ensaios foram realizados em um analisador simultâneo TGA/DSC da TA *instrument* SDT-Q600, Figura 3-11a, a partir da temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) até cerca de 1000°C, em atmosferas de ar, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, conforme esquematizado na Figura 3-11b.



(a)



(b)

**Figura 3-11** – Imagens: (a) analisador termogravimétrico simultâneo da TA *instrument* SDT-Q600 e (b) representação esquemática do ensaio (Próprio autor).

### 3.2.2 Índice limite de oxigênio (LOI)

O equipamento LOI, normatizado pela ISO 4589-2 (1996), é um ensaio que permite determinar o teor mínimo de oxigênio necessário para a ignição e manutenção da combustão de um material tal qual a Eq. 3.2. Quanto menor seu valor, maior a facilidade com que os materiais sofrem ignição.

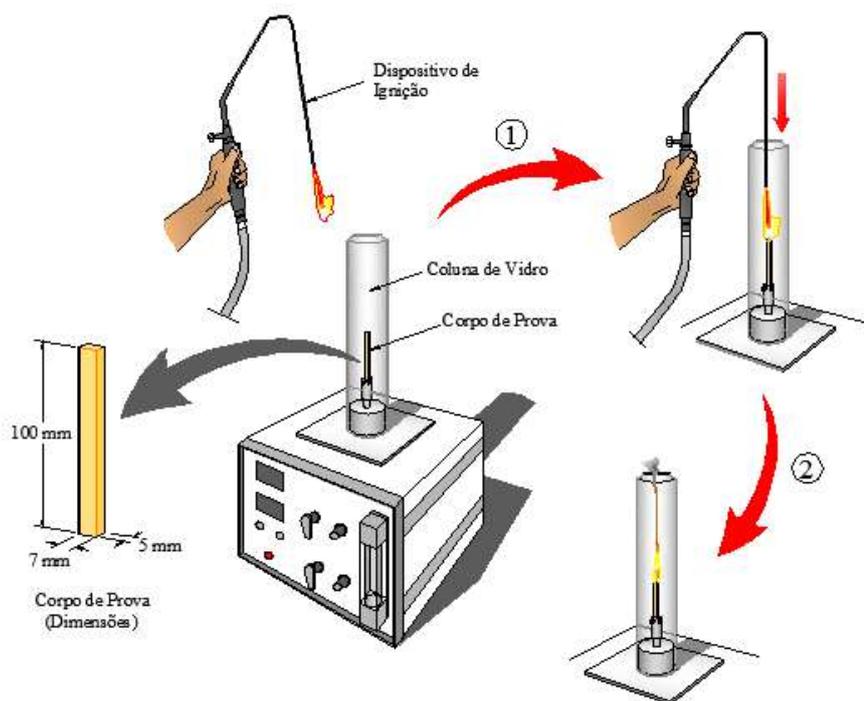
$$LOI = \frac{O_2}{O_2 + N_2} \times 100\% \quad \text{Eq (3.2)}$$

Neste ensaio, realizado em um aparelho da *Fire Testing Technology* (FTT) (Figura 3-12a) os corpos de prova são introduzidos em um cilindro de vidro contendo uma mistura de oxigênio e nitrogênio. Uma chama piloto de propano é inserida pelo topo do cilindro de modo a promover a ignição do corpo de prova (Figura 3-12b). O teor de oxigênio no meio é previamente ajustado de modo a se determinar o valor mínimo capaz de manter a combustão durante 3 minutos. As medidas realizadas têm a precisão de  $\pm 1$  unidade de LOI.

O LOI pode apresentar valores compreendidos entre 0 e 100, isto é, uma atmosfera sem oxigênio ( $[O_2] = 0$ ) e uma atmosfera sem nitrogênio ( $[N_2] = 0$ ). O ar contém cerca de 1/5 de oxigênio (mais exatamente 20,95% em volume). Isto significa que todos os materiais cujo valor LOI é igual ou inferior a 20,95% são facilmente inflamáveis. Os materiais que possuem valores de LOI superiores a 20,95% e iguais ou inferiores a 28,0% são geralmente considerados de combustão lenta. Os materiais com valores de LOI superiores a 28,0% e inferiores a 100% são em geral considerados auto extingüíveis. Os materiais com valores de LOI iguais a 100% são considerados intrinsecamente não combustíveis.



(a)



(b)

**Figura 3-12** – Imagens: (a) equipamento LOI e (b) esquema do ensaio (PRÓPRIO AUTOR).

### 3.2.3 Queima vertical (UL- 94)

Este procedimento classifica os materiais quanto à facilidade de ignição e de propagação de chama denominada UL-94 (Figura 3-13a). Na análise, normatizada pelo UL-94 (2003), o corpo de prova fica na posição vertical, que é a mesma direção em que

se propagam os produtos de pirólise, tornando, portanto, o teste bastante rigoroso, pois as condições de queima são propositalmente favoráveis.

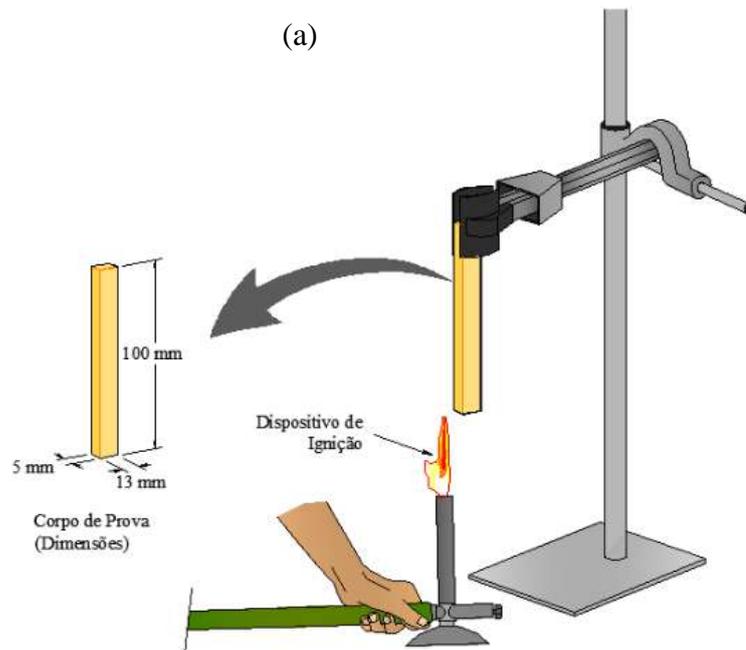
Neste ensaio, o corpo de prova é fixo na posição vertical, e uma chama de 20 mm de comprimento, proveniente da queima de metano, é colocada sob a extremidade inferior destes, seguindo o esquema apresentado na Figura 3-13b e mantida durante 10s. O tempo entre a retirada da chama e a autoextinção do fogo é registrado (t1). Após a extinção da chama, aplica-se novamente a chama por mais 10 segundos e registra-se novamente o tempo entre a retirada da chama e a autoextinção do fogo no corpo de prova (t2). Deve-se registrar também o tempo de incandescência do corpo de prova após a segunda aplicação (t3). Durante todo o teste, deve-se observar se houve queima ou inflamação do algodão que é colocado embaixo da amostra por gotas ou fagulhas emitidas. O procedimento é executado em 5 corpos de prova (CP), e então, a amostra é classificada como V0 (classificação máxima) podendo ser considerada como materiais não combustíveis, V1 ou V2, de acordo com os critérios listados na norma e apresentadas na Tabela 3-4.

**Tabela 3-4** - Critérios de classificação para o ensaio de UL-94 (*Underwriters Laboratory*, 2003).

Critério	V0	V1	V2
Tempo máximo de queima e cada corpo de prova (t1 ou t2)	<10s	<30s	<30s
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (t1 + t2)	<50s	<250s	<250s
Tempo da segunda queima de cada corpo de prova mais incandescência (t2 + t3)	<30s	<60s	<60s
Queima do algodão por gotejamento ou fagulhas emitidas	não	não	sim



(a)



(b)

**Figura 3-13** – Imagens: (a) Equipamento UL94 e (b) esquema do ensaio de queima vertical (PRÓPRIO AUTOR).

Foram analisadas, por esta técnica, amostras de PRFV contendo ou não compostos retardantes de chama. Os corpos de prova avaliados apresentavam comprimentos menores do que os exigidos pela norma, que é de 125 mm. Porém os resultados não foram influenciados, uma vez que os corpos de prova que apresentaram auto extinção

não consumiram metade dos exemplares ou os que apresentaram ignição sustentada, não conseguiram se auto extinguir.

### **3.2.4 Fio incandescente**

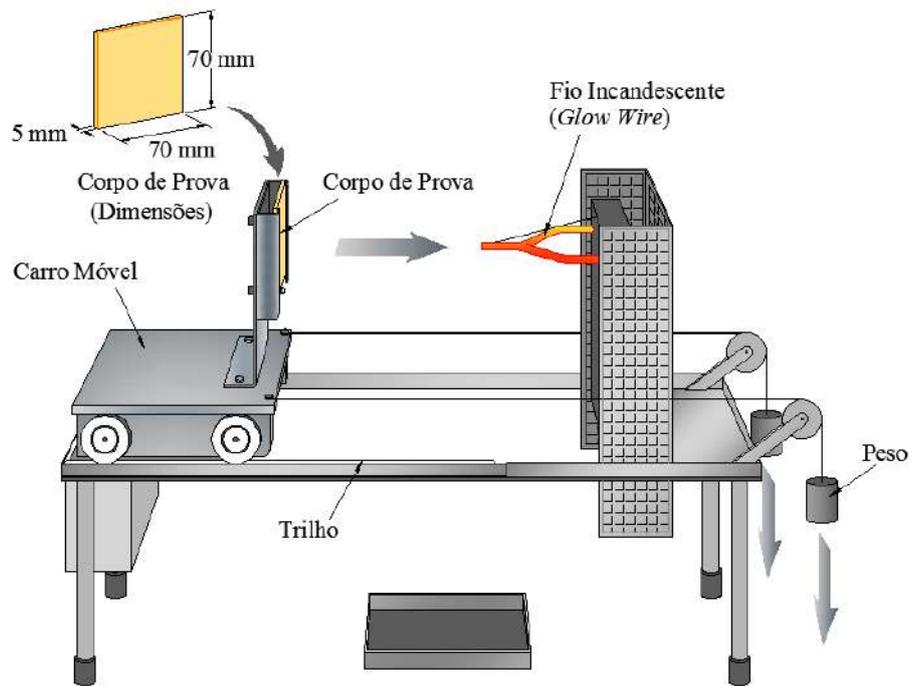
Este método de ensaio, normatizado pelas IEC 60695-2-10-12-13 (2000), permite verificar se um material dispõe de uma capacidade para inflamar-se e de propagar a chama. Durante o ensaio, uma ponta aquecida em temperatura pré-determinada entra em contato com o corpo de prova, simulando uma tensão térmica que pode ser gerada em componentes eletrotécnicos em decorrência de instalações elétricas inadequadas ou sobrecarga nos componentes elétricos.

Para as análises foi utilizado o equipamento fio incandescente *Ceast* modelo 6447A, apresentado na Figura 3-14a. Este equipamento permite o contato por 30 segundos de uma ponta incandescente, aquecida através de uma resistência elétrica, nas dimensões da norma IEC 60695-2-10. Além disso, o equipamento permite que a velocidade de aproximação e retirada da ponta seja de 10 mm/s a 25 mm/s, e que a força de contato da ponta com a amostra não exceda 1,0 N, conforme a norma IEC 60695-2-10 (Figura 3-14b).

O primeiro parâmetro, chamado de GWFI (índice de inflamabilidade), corresponde à maior temperatura de teste onde a chama, ou incandescência, se extingue até 30 segundos após a remoção da ponta incandescente, e que não há a ignição, por gotejamento, do papel posicionado abaixo do corpo de prova, em três ensaios consecutivos. Segundo ACQUASANTA *et al.* (2011) o GWFI mínimo é de 850°C para insumos poliméricos em contato ou próximos a condutores elétricos, onde a corrente elétrica seja maior do que 0,2 A. O segundo parâmetro medido é GWIT (temperatura de ignição) que corresponde a temperatura de 25°C acima da temperatura de teste na qual não ocorra a ignição do corpo de prova em três ensaios consecutivos. Para insumos poliméricos em contato ou próximos a condutores elétricos, onde a corrente elétrica seja maior do que 0,2 A, o GWIT mínimo é de 775°C.



(a)



(b)

**Figura 3-14** – Imagens: (a) Aparelho fio incandescente modelo 6447A e (b) representação esquemática do ensaio (Próprio autor).

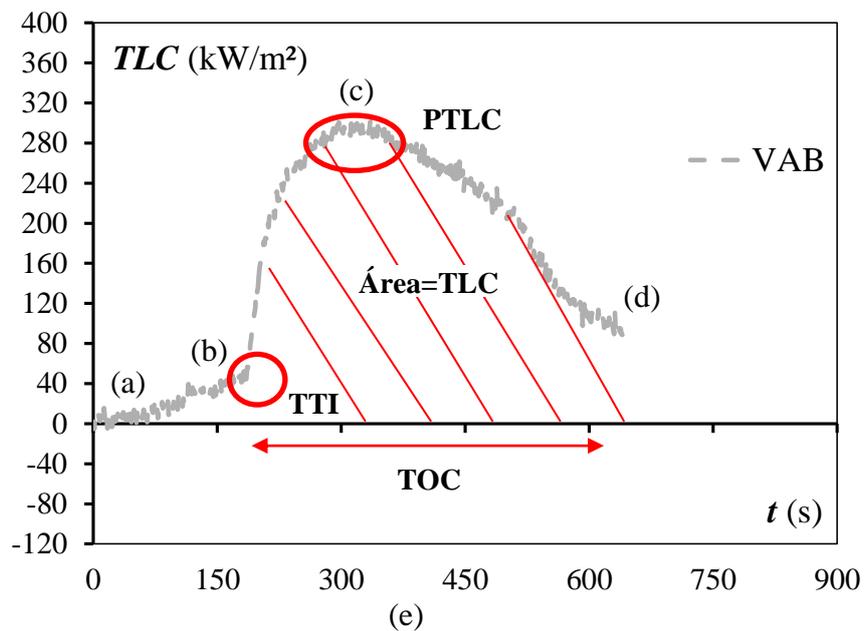
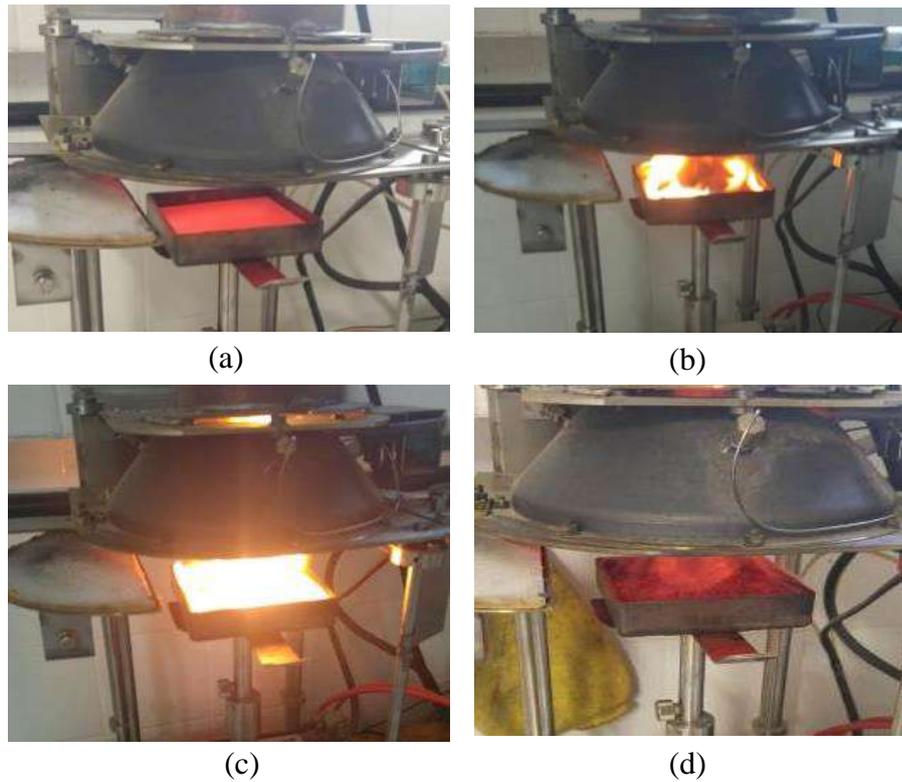
# 4

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS** **EXPERIMENTAIS**

Este capítulo reúne os resultados e discussões obtidos através da metodologia proposta pelo presente trabalho de pesquisa. São destacadas inicialmente as análises do equipamento CCPM, seguido pelo TGA/DSC, LOI, UL-94 e fio incandescente finalizando pelo.

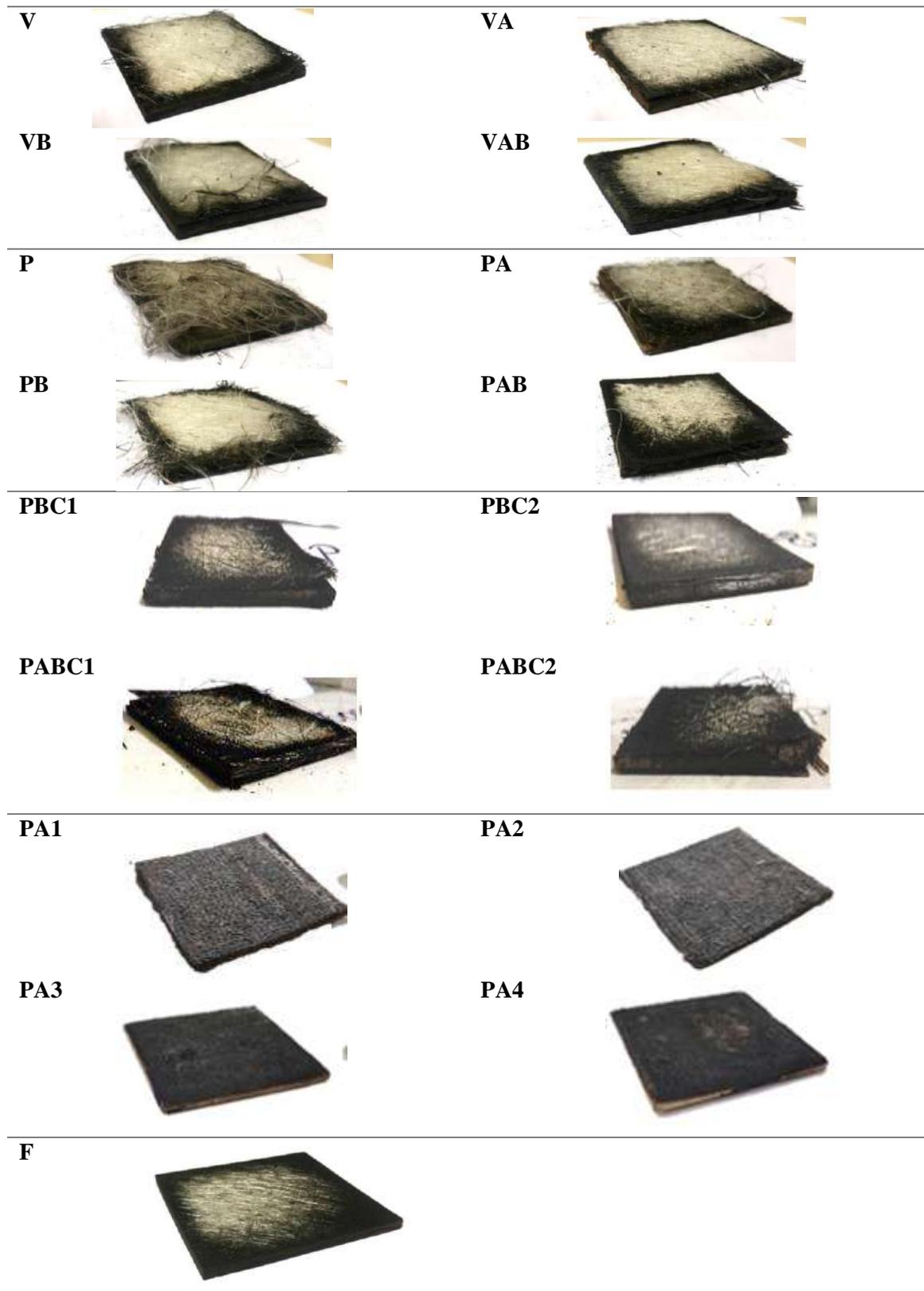
### **4.1 AVALIAÇÕES DA INFLAMABILIDADE ATRAVÉS DO CCPM PARA PRFV**

A Figura 4-1 (a-d) mostram as diferentes fases do teste de reação ao fogo do espécime VAB. Assim como CORREIA *et al.* (2010 parte A) e MOURITZ e MATHYS (2001) é possível observar que: em um primeiro estágio (Figura 4-1a), a superfície do PRFV começa a escurecer e a liberar produtos gasosos que, com o oxigênio do ar, formam uma mistura inflamável. O segundo estágio (Figura 4-1b) foi marcado pela ignição, seguido pelo pico de TLC e a chama remanescente na superfície superior do corpo de prova. Já em um terceiro estágio (Figura 4-1c) houve um período de intensa combustão com grande liberação de fumaça e calor. Toda a resina contida na parte superior da amostra foi consumida, restando apenas as fibras de vidro. No quarto e último estágio (Figura 4-1d), as chamas não estão mais presentes, não havendo sinais de decomposição térmica. A curva de TLC da amostra VAB apresentada na Figura 4-1e exemplifica esses quatro estágios.



**Figura 4-1** - Quatro estágios do comportamento de queima da amostra VAB: (a) primeiro, (b) segundo, (c) terceiro, (d) quarto estágio e (e) curva TLC com as respectivas correspondências dos estágios.

A Figura 4-2 mostra os espécimes após os ensaios, exemplificando os diferentes tipos de degradação observados.



**Figura 4-2** – Imagens dos corpos de prova de PRFV após os ensaios.

Assim como CORREIA *et al.* (2010 parte A), é possível observar três tipos de zonas no laminado de PRFV, associadas a diferentes níveis de dano térmico: (i) uma camada de material não danificado, partindo do fundo da amostra; (ii) uma região descolorida sem perda de material evidente, correspondendo a uma degradação térmica parcial; e (iii) uma camada de fibras de vidro e resíduo de combustão da resina (branco/preto, dependendo do nível de decomposição da resina), correspondendo à degradação térmica da resina superior da amostra. Quanto mais escuro o resíduo, melhor, sinal de que a chama cessou sem a completa degradação da matriz polimérica.

Embora as amostras apresentadas na Figura 4-2 estivessem muito semelhantes após o ensaio, foi observada a formação de cinzas (principalmente na parte superior da superfície) dos espécimes. Nas amostras de resina de estervinílica com e sem retardantes é visível somente as fibras de vidro (pouco resíduo da resina na cor cinza) na parte superior e uma camada de material não danificado, partindo do fundo da amostra.

Na resina poliéster, somente a partir da adição do  $Sb_2O_3$  é observado um resíduo escuro na parte superior das amostras, junto às fibras de vidro, indicando menor decomposição da matriz polimérica.

Os corpos de prova da resina fenólica e poliéster com adição de ATH acima de 47,75% resultaram em resíduos quase intactos, mantendo praticamente a espessura inicial.

#### **4.1.1 Propriedades da reação de fogo**

A Tabela 4-1 apresenta os principais dados obtidos no decorrer desta investigação (resultados completos no Anexo A), a respeito de: (i) a identificação das amostras usadas na descrição deste trabalho, o número de espécimes usados no CCPM e a massa; (ii) o PTLC, CTL, TPM, TTI e TOC medidos para todas as amostras. As amostras que não apresentaram ignição não possuem valores de PTLC, CTL, TTI e TOC.

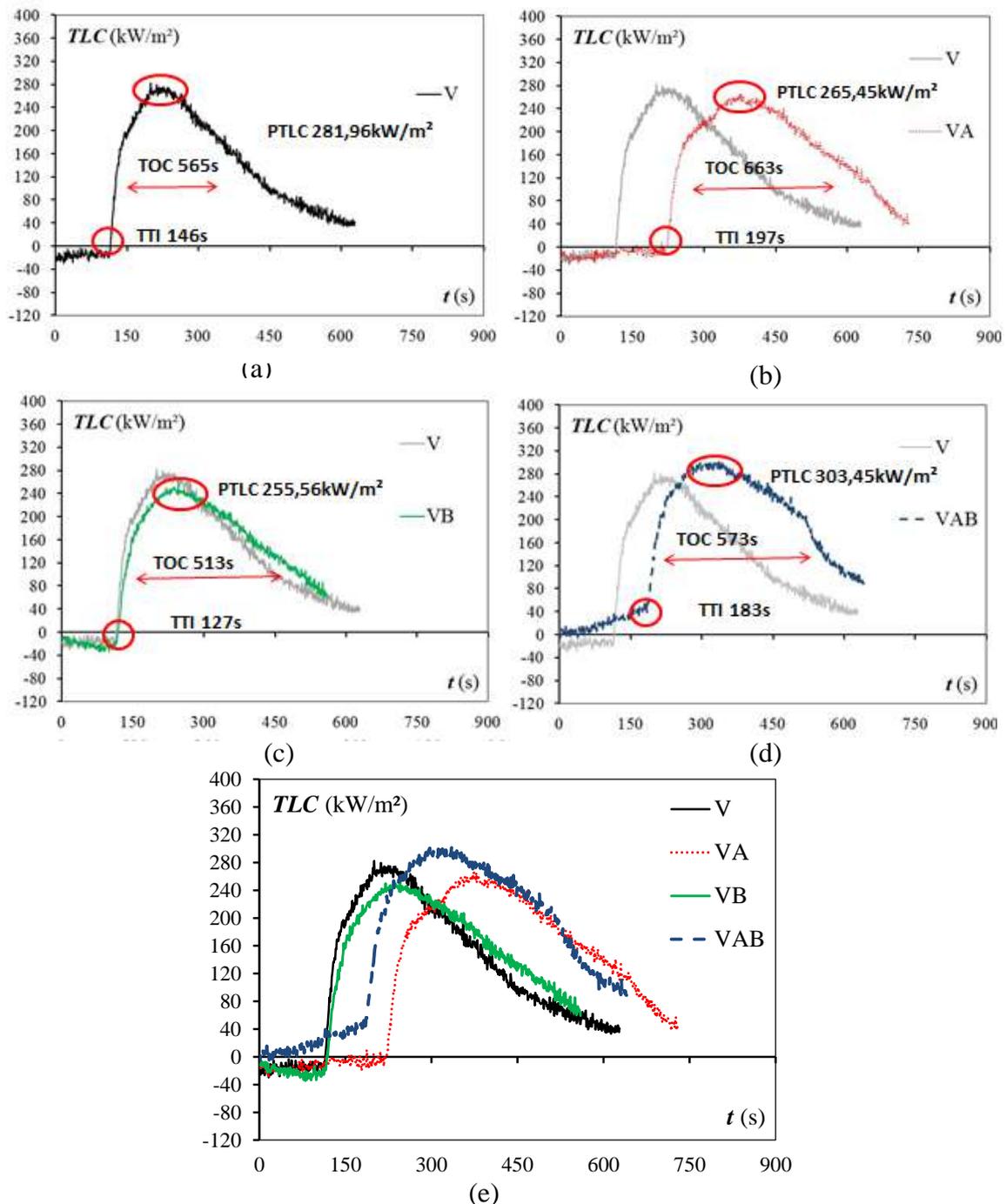
**Tabela 4-1**– Avaliação da inflamabilidade através do CCPM para PFRV.

<b>Id's</b>	<b>cp's</b>	<b>massa (g)</b>	<b>PTLC (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>CTL (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>TPM (%)</b>	<b>TTI (s)</b>	<b>TOC (s)</b>
V	1	61,1	281,96	70,9	31,2	110	512
	2	62,1	256,97	68	32,3	132	533
	3	62,1	244,35	59,1	30,7	141	565
VA	1	73	265,45	83,6	20,5	190	631
	2	71	242,38	81,7	23,9	172	649
	3	71	239,67	78,3	30,9	197	663
VB	1	68	206,96	62,5	27,9	127	680
	2	63	255,56	69,9	34,7	112	502
	3	63	239,05	68,7	32,6	122	513
VAB	1	72	303,45	89,7	31,9	182	532
	2	72	240,34	66,6	34,7	183	550
	3	73	237,11	73,7	32,8	138	573
P	1	66	339,77	92,4	37,8	111	610
	2	66	304,09	84	37,8	134	665
	3	66	309,82	88	37,8	99	656
PA	1	78	267,31	116,5	37,1	158	731
	2	78	271,09	122,5	39,7	116	710
	3	80	278,89	121	40	135	702
PB	1	73	278,72	105,9	39,7	115	581
	2	71	282,68	104,3	44,1	115	605
	3	72	269,17	94,2	43	126	581
PAB	1	80	275,89	115,5	42,5	135	678
	2	79	277,88	111	40,5	147	667
	3	79	276,41	107,6	40,4	133	628
PBC1	1	92	214,03	53,8	31,4	144	475
	2	96	171,73	29,8	26	157	407
	3	99	199,3	29,8	24,2	165	358
PBC2	1	103	155,82	20,3	21,3	161	347
	2	104	125,43	24,7	25	200	460
	3	106	121,92	17,1	18,8	150	333
PABC1	1	88	154,27	40,5	34	220	586
	2	89	133,19	27,1	31,4	215	479
	3	91	131,57	35,7	34	166	533
PABC2	1	83	140,62	36,4	34,9	166	533
	2	87	119,33	26,8	35,6	175	496
	3	88	116,51	23	31,8	173	457
PA1	1	85	–	–	29,7	–	–
	2	85	–	–	25,9	–	–
	3	87	–	–	20,9	–	–
PA2	1	86	–	–	28,4	–	–
	2	82	–	–	23	–	–
	3	82	–	–	21,8	–	–
PA3	1	85	–	–	24,1	–	–
	2	87	–	–	22,7	–	–
	3	86	–	–	27,6	–	–
PA4	1	88	–	–	17	–	–
	2	89	–	–	29,2	–	–
	3	88	–	–	28,4	–	–
F	1	0	3,6	8,4	0	–	–
	2	5,18	0	7,2	46,8	–	–
	3	23	0	6	77,5	–	–

## Taxa de liberação de calor – TLC

A taxa de liberação de calor (TLC) é a propriedade mais importante da reação ao fogo porque o calor liberado por um composto queimado pode fornecer energia térmica adicional apropriada para o crescimento e propagação do fogo (BABRAUSKAS e PEACOCK, 1992). Com relação à variação do TLC ao longo do tempo, segundo MOURITZ *et al.* (2006), há um período de retardo inicial antes do composto começar a liberar calor, e isso ocorre porque a temperatura do material está abaixo da temperatura de pirólise da matriz polimérica. Após este período inicial, o TLC sofre um rápido aumento devido à combustão de voláteis (pico de TLC). Após o PTLC, o TLC diminuiu gradualmente com o tempo, devido à diminuição do conteúdo de resina do espécime, e a formação e espessamento de uma camada de carvão de superfície que retarda a taxa de reação de decomposição no material subjacente. Finalmente, o TLC torna-se insignificante, e o último vestígio de resina é decomposto.

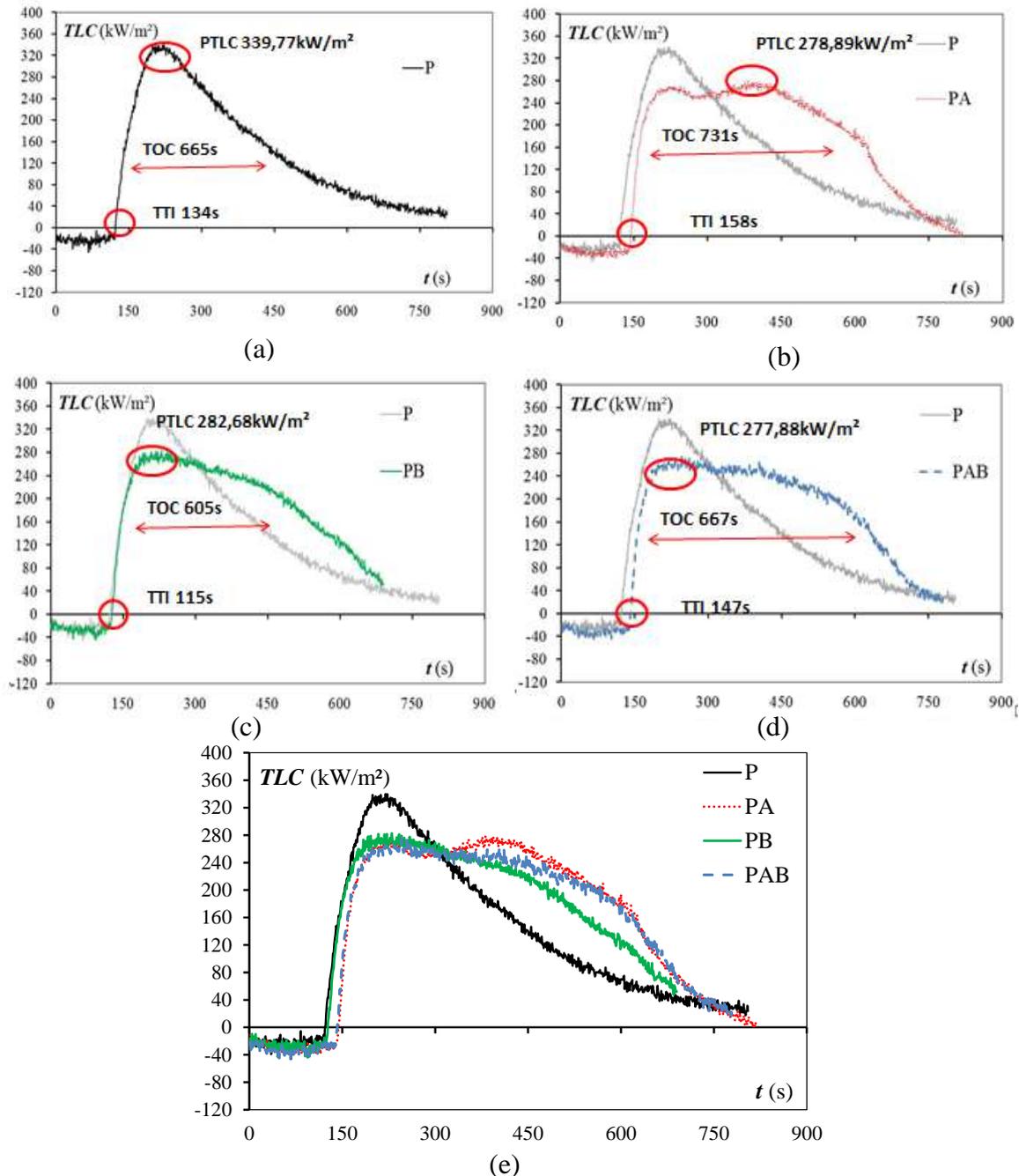
As Figuras 4-3, 4-4 e 4-5 mostram as curvas TLC medidos em função do tempo decorrido de ensaio no CCPM para PRFV com e sem retardantes de chamas (valores detalhados na Tabela 4.1). O valor mais alto de PTLC de uma das três amostras de cada resina foi o parâmetro para a escolha de representação da curva TLC como evidência da influência da ação dos retardantes de chama no desempenho dos compósitos. As análises destes cinco conjuntos de curvas de TLC demonstram que as curvas de taxa de liberação de calor para os materiais compósitos com uma matriz poliéster ou estervinílica foram semelhantes em perfil conforme apresentado nas Figura 4-3 e 4-4. A TLC foi maior para compósitos com uma matriz poliéster pura (Figura 4-4a), comparada àquelas com uma matriz estervinílica pura (Figura 4-3a). BROWN e MATHYS (1997) apresentaram resultados de PTLC semelhantes para compósitos com matriz estervinílica, reforçada com fibra de vidro (tecelagem tecidual contendo 69% de fibras) em um fluxo de 50 kW/m<sup>2</sup>. Também é possível observar que a adição de ATH e DBDE não diminuiu significativamente o PTLC em compósitos de resinas estervinílica (Figura 4-3(b, c)). Por outro lado, para a resina poliéster (Figura 4-3(b,c)), a adição de ATH (PA) e DBDE (PB) reduziu o PTLC. Portanto, para avaliar a ação sinérgica entre DBDE e Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em PRFV e avaliar a influência da concentração de ATH nas propriedades retardantes de chama em PRFV foi escolhida a resina poliéster.



**Figura 4-3** – Taxa de libertação de calor em função do tempo da matriz estervínica: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

Ainda é possível observar que a adição concomitante de ATH e DBDE (Figuras 4-3d e 4-4d) não levou a uma redução de PTLC em ambas as matrizes poliméricas (VAB e PAB) quando comparada aos valores obtidos quando foram adicionados sozinhos (Figuras 4-3(b,c) e 4-4(b,c)). HIRSCHLER e TSIKA (1983) sugerem que a ATH,

quando utilizada em copolímeros de acrilonitrila-butadieno-estireno contendo DBDE leva a uma diminuição significativa da temperatura do polímero, devido à desidratação endotérmica da ATH, podendo dificultar a ação da fase gasosa do DBDE. Assim, a adição concomitante de DBDE e ATH não parece ser a melhor alternativa para o aumento das propriedades retardantes de chama para o PRFV estudado.

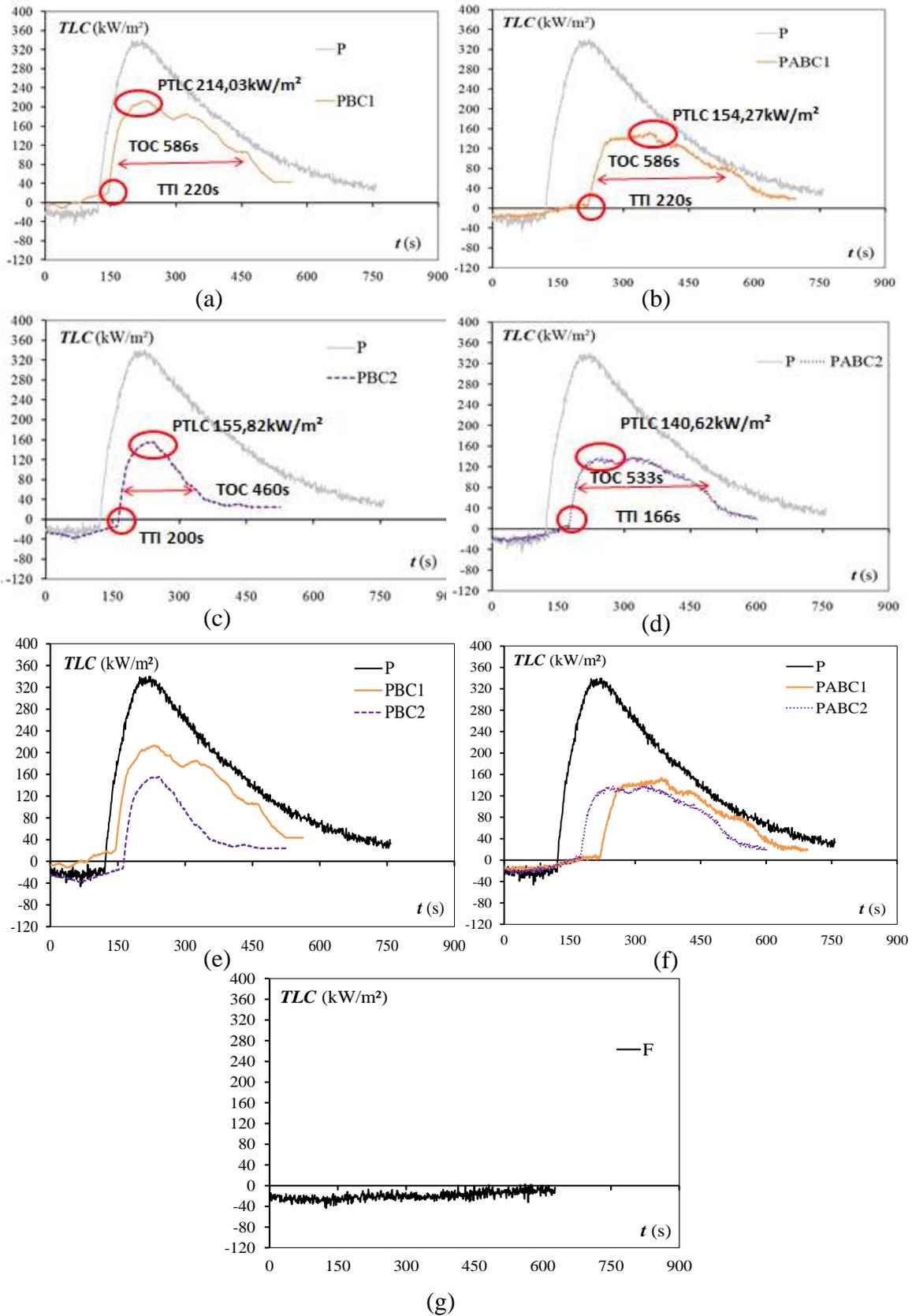


**Figura 4-4** – Taxa de libertação de calor em função do tempo da matriz poliéster: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

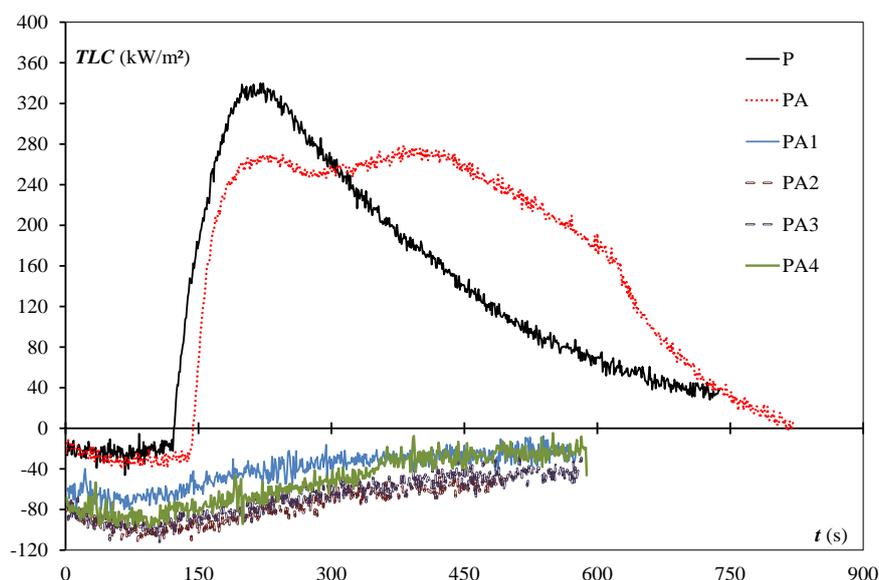
Por outro lado, a adição do  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  com DBDE na resina poliéster promoveu a redução do TLC para ambas as concentrações (PBC1 e PBC2) (Figura 4-5(a,c)), indicando uma ação sinérgica entre DBDE e  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Segundo MOURITZ e GIBSON (2006), este último composto é um retardante de chama fraco quando utilizado sozinho num polímero não halogenado, mas quando utilizado com compostos halogenados a sua eficiência retardante de chama é melhorada consideravelmente. O sinergismo ocorre através das interações na fase gasosa entre o composto halogenado e o óxido de antimônio. Durante a decomposição térmica, os voláteis de halogenato de bromo reagem com voláteis do antimônio para produzir halogeneto de antimônio ou compostos oxihalidetos. Este vapor de haleto de antimônio pode inibir o processo de combustão, capturando radicais H e OH.

Analisando os resultados para as amostras PABC1 e PABC2 respectivamente (Figura 4-5(b,d)), é possível observar que o TLC diminuiu quando comparada com o PBC1 e o PBC2, respectivamente. Assim, parece que a ATH na presença de  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  não interfere negativamente na ação do DBDE em fase gasosa. Como já mencionado, na amostra sem  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , mas contendo ATH e DBDE (PAB), não foi observada essa redução do TLC quando comparados aos valores obtidos quando foram adicionados sozinhos. Outra hipótese seria que a ATH teria um efeito de diluição, reduzindo a quantidade de resina em relação à amostra sem ATH (PBC1), e consequentemente reduziria o TLC. No entanto, apesar da redução do TLC com a adição concomitante de ATH, DBDE e  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  observada nas amostras PABC1 e PABC2, este não foi o melhor sistema devido ao TLC obtido, que apesar de baixo, não atingiu o nível de um polímero inerentemente retardante de fogo, como a resina fenólica apresentada na Figura 4-5g (ROTHON, 1999; BROWN e MATHYS, 1997; EGGLESTONE e TURLEY, 1994).

Assim, a resina poliéster com várias concentrações de ATH também foi avaliada. O aumento de 37% para 47,75% já permitiu que a amostra não entrasse em ignição durante o teste do cone calorímetro, mantendo, portanto o TLC próximo do zero (Figura 4-6). Este é um resultado excelente, melhor que o obtido com o sistema halogenado, mesmo contendo o agente sinérgico  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  como na amostra PABC1. Esses sistemas apresentaram comportamento semelhante ao da resina fenólica, que já possui inerentemente propriedades retardantes de chama.



**Figura 4-5** – TLC em função do tempo das amostras: (a) PBC1, (b) PABC1, (c) PBC2, (d) PABC2, (e) P, PBC1 e PBC2 sobrepostas (f) P, PABC1 e PABC2 sobrepostas e (g) matriz fenólica.



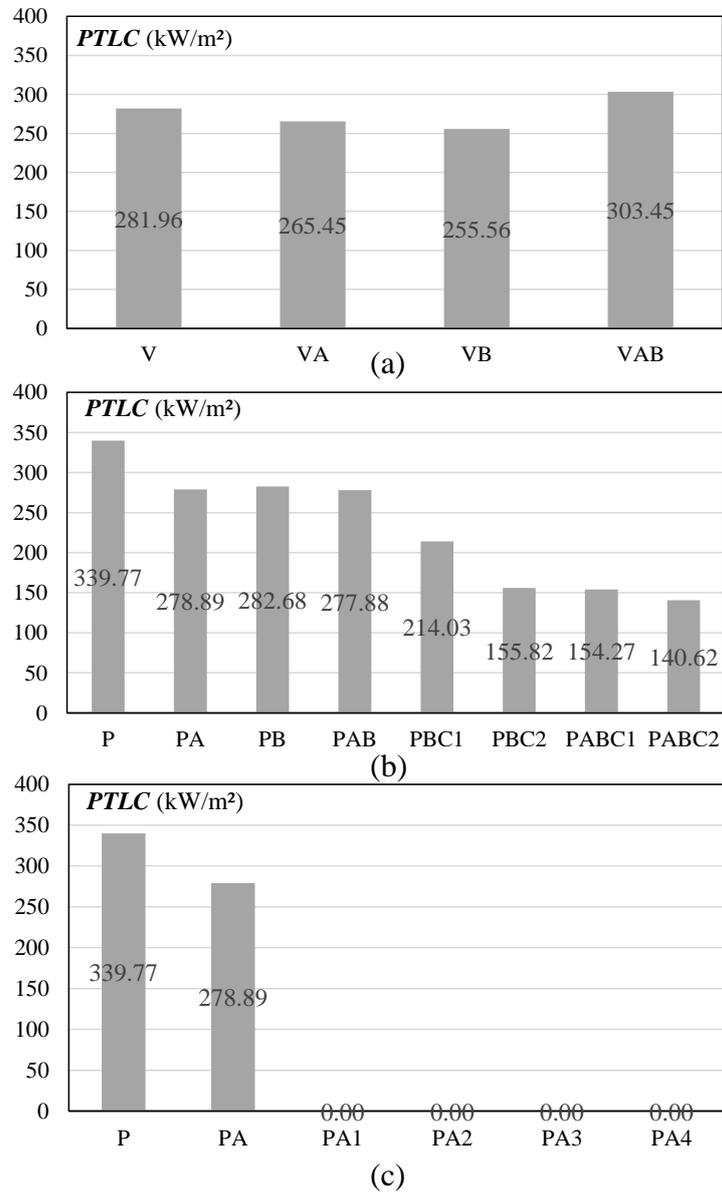
**Figura 4-6** – Taxa de liberação de calor em função do tempo das amostras de matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

#### **Pico da taxa de liberação de calor - PTLC**

O PTLC ocorre durante um período muito curto de tempo e, muitas vezes, logo após a ignição, e é uma boa indicação da inflamabilidade máxima composta (MOURITZ *et al.*, 2006). Observando o maior PTLC das três amostras de cada variação contendo a resina estervínlica (Figura 4-7a), é possível inferir que a adição de ATH ou DBDE (VA ou VB) não reduziu significativamente esse parâmetro, e que sua adição concomitante levou a aumento do PTLC. Portanto, como já discutido para TLC, a adição desses retardantes de chama a este tipo de resina não levou a melhorias significativas em relação à matriz pura.

A adição exclusiva de ATH ou DBDE à resina poliéster (PA ou PB) (Figura 4-7b) reduziu o PTLC, em comparação com os resultados para a resina pura, mas a adição concomitante (PAB) não alterou significativamente o parâmetro, como já observado para o TLC. A formulação PBC1 (material onde as quantidades do DBDE foram dobradas, com a adição de  $Sb_2O_3$  na proporção de 3:1) reduziu o PTLC em uma média de 37% e o PBC2 (as quantidades de DBDE foram triplicadas, com o acréscimo do  $Sb_2O_3$  na proporção de 3: 1) mostraram uma diminuição de 54%, em média, em relação à resina pura. Na sequência, a adição concomitante de ATH ao material com  $Sb_2O_3$  e

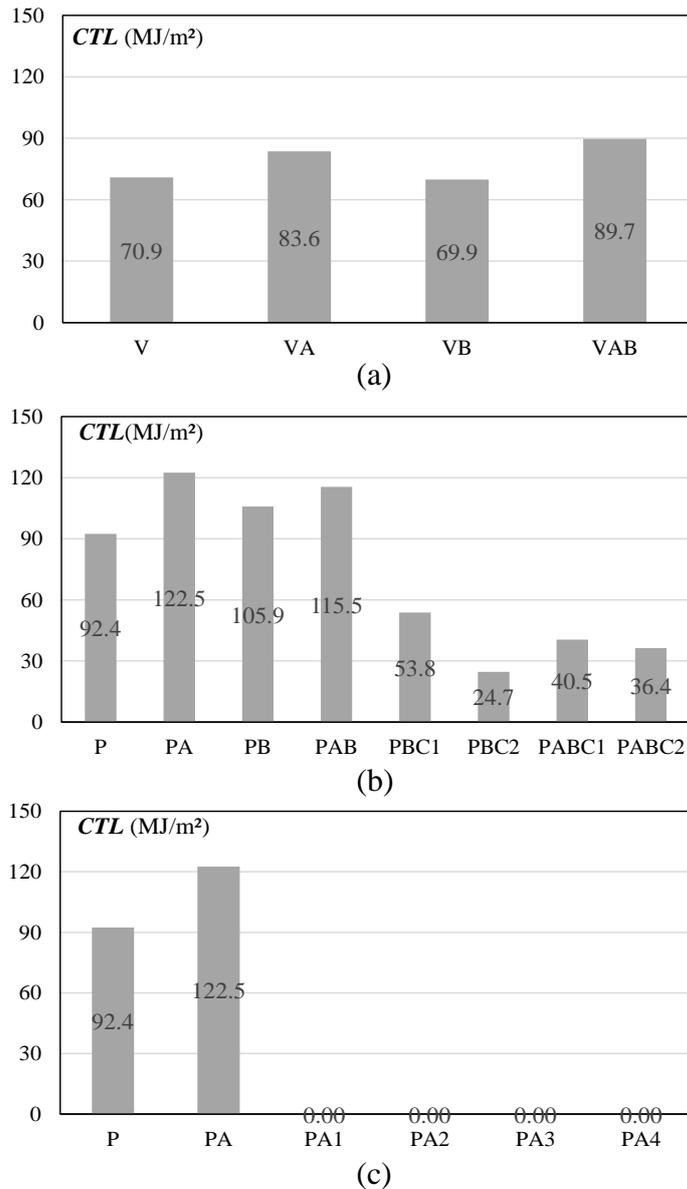
DBDE triplicado levou a uma redução de 59% do PTLC em relação à da resina pura (Figura 4-7b). Entretanto, como já discutido para o TLC, os melhores resultados foram obtidos pelos sistemas PA1 a PA4 contendo apenas ATH e resina fenólica que não se inflamaram durante o cone calorímetro (Figura 4-7c).



**Figura 4-7** - Redução dos valores de PTLC para: (a) matriz esterevinílica, (b) matriz poliéster e (c) matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

## Calor total liberado - CTL

O CTL durante o período de combustão é considerado a medida mais confiável da contribuição do calor para um incêndio prolongado (MOURITZ *et al.*, 2006). Na Figura 4-8(a) observa-se que somente a adição do DBDE adicionado isoladamente reduziu o CTL. Já na resina poliéster, o DBDE e a ATH quando adicionados isoladamente ou concomitantemente, produziram uma elevação do CTL, em comparação com o resultado para a matriz pura, diminuindo as propriedades retardantes de chama (Figura 4-8b).



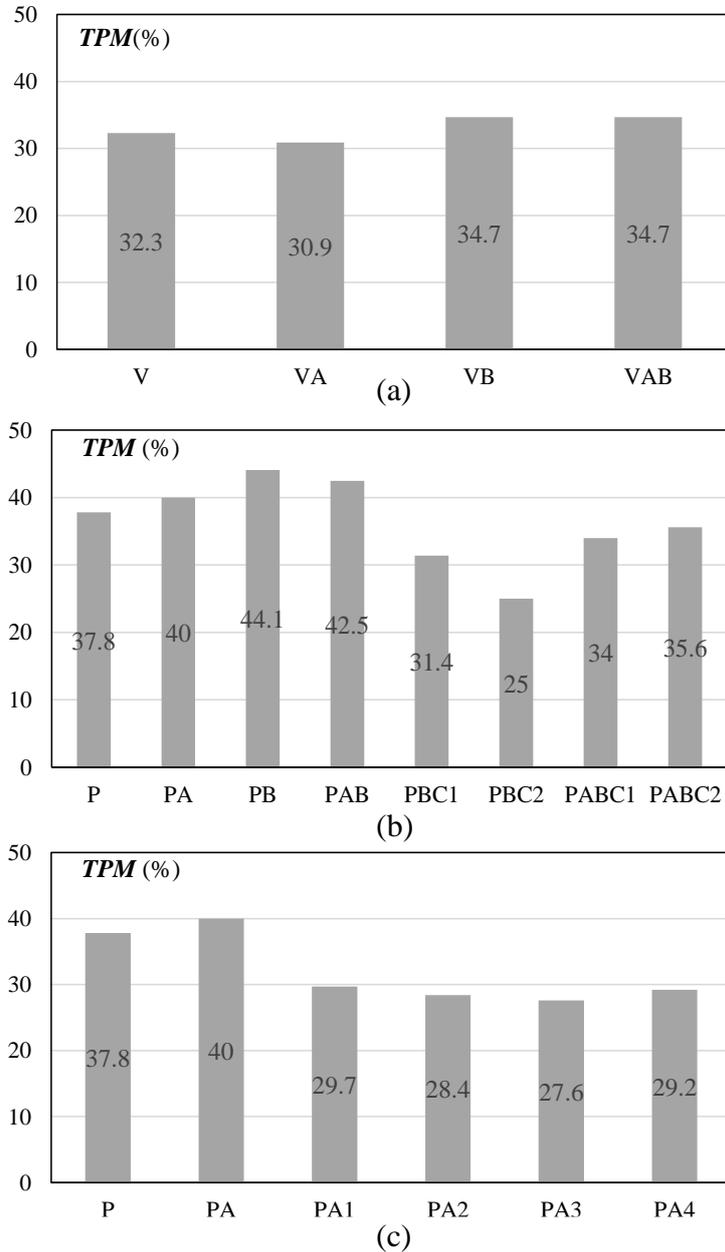
**Figura 4-8** - Valores de CTL para: (a) matriz esterevinílica, (b) matriz poliéster e (c) matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

No entanto, a adição de  $Sb_2O_3$  com DBDE (PBC1 e PBC2) reduziu o calor total liberado em relação à resina poliéster pura, aumentando as propriedades retardantes de chama. Na concentração mais baixa (PBC1), produziu uma redução em uma média de 42% e na concentração mais alta (PBC2) uma redução de 73%. A inclusão de ATH com o  $Sb_2O_3$  e o DBDE (PABC1 e PABC2) não levou a melhorias significativas neste parâmetro em relação a matriz pura. Por outro lado, todas as amostras com concentração de ATH acima de 47,75phr (PA1 a PA4) (Figura 4-8c) e resina fenólica apresentaram um valor de zero CTL, pois não inflamaram, apresentando novamente os melhores resultados e melhorando expressivamente o comportamento de reação ao fogo desses materiais.

### **Taxa de perda de massa - TPM**

A TPM da amostra é apresentada como uma porcentagem da massa original das amostras e é monitorada continuamente através de uma célula de carga que permite que a TPM seja determinada como uma função do tempo decorrido da duração do teste. A Figura 4-9a mostra que o material de resina estervínlica com apenas ATH (VA) foi o único que apresentou redução no valor de TPM em relação à matriz pura (V). Para a resina poliéster (Figura 4-9b) a adição de DBDE com  $Sb_2O_3$  apresentou os melhores resultados, reduzindo a TPM em 17% em média para a menor concentração (PBC1) e 34% para a maior (PBC2), em relação à matriz pura (P). Posteriormente, a inclusão de ATH em percentuais mais elevados também reduziu a massa total perdida em relação à matriz pura, como mostra a Figura 4-9c. A amostra de PA1 merece destaque por apresentar uma TPM próxima às demais amostras com maior conteúdo de ATH (PA2 a PA4). Além disso, a adição de ATH a 37phr (amostra PA) aumentou o TPM em relação ao da matriz pura (P), ou seja, não reduziu sua decomposição nessa concentração. Este aumento na perda de massa observado após a ignição da amostra de PA pode estar relacionado à perda de água da ATH e à decomposição da matriz polimérica. Por outro lado, a adição de 47,75phr a 80phr (PA1 a PA4) levou a valores muito semelhantes, uma vez que nenhuma dessas amostras incendiou. Assim, a perda de massa observada deve-se principalmente à perda de água resultante da desidratação da ATH que ocorre a temperaturas relativamente baixas. Este resultado é interessante porque acredita-se que uma menor quantidade de resina polimérica seja degradada nesses casos.

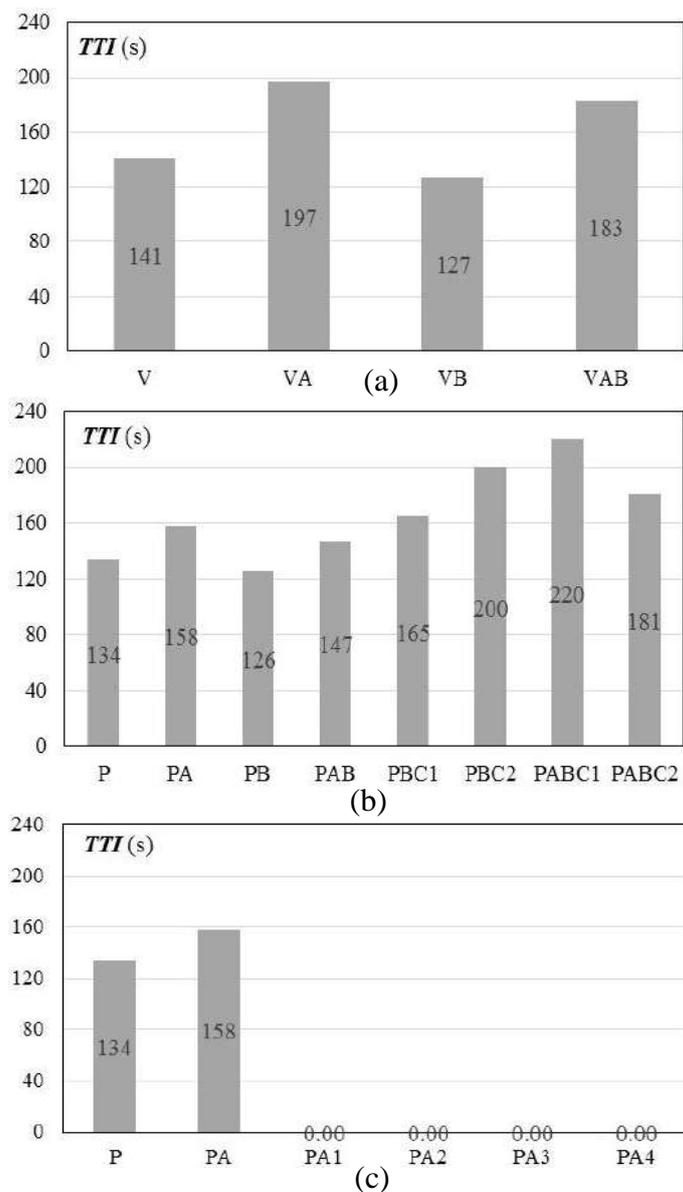
Já a resina fenólica apresentou uma perda de massa de apenas 7,20%. BROWN e MATHYS (1997) encontraram um TPM de 53,5% para resina fenólica com 66% de taxa de fibra de vidro. Vale ressaltar que a presente pesquisa utiliza uma matriz fenólica com 85% de fibra de vidro, justificando essa diferença.



**Figura 4-9** - Redução dos valores de pico de TPM para: (a) matriz estereínica, (b) matriz poliéster e (c) matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

## Tempo total de ignição- TTI

O TTI é uma importante propriedade de reação ao fogo, pois define o tempo que o material compósito pode suportar o fluxo de calor irradiado pelo fogo antes de sofrer combustão contínua (MOURITZ *et al.*, 2006). O TTI exhibe o tempo necessário para o início da chama na superfície das amostras. Em relação à resina estervinílica, pode-se observar na Figura 4-10a, que a única adição de ATH apresentou o melhor comportamento, elevando este parâmetro em média a 40% em relação à matriz pura.



**Figura 4-10** - Redução dos valores de pico de TTI para: (a) matriz estervinílica, (b) matriz poliéster e (c) matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

Para os compósitos de resinas poliéster, o melhor resultado foi obtido com a adição de óxido de ATH, mostrando um aumento em torno de 18% em relação à resina pura. A aplicação de DBDE e  $Sb_2O_3$  auxiliou o desempenho do polímero aumentando o tempo de ignição em uma média de 23% para a formulação de concentrações mais baixas e 49% para a maior. A adição de ATH aumentou significativamente esse parâmetro, em média 64% para a menor concentração (PBC1) e 35% para a maior concentração (PBC2), como pode ser visto na Figura 4-10b.

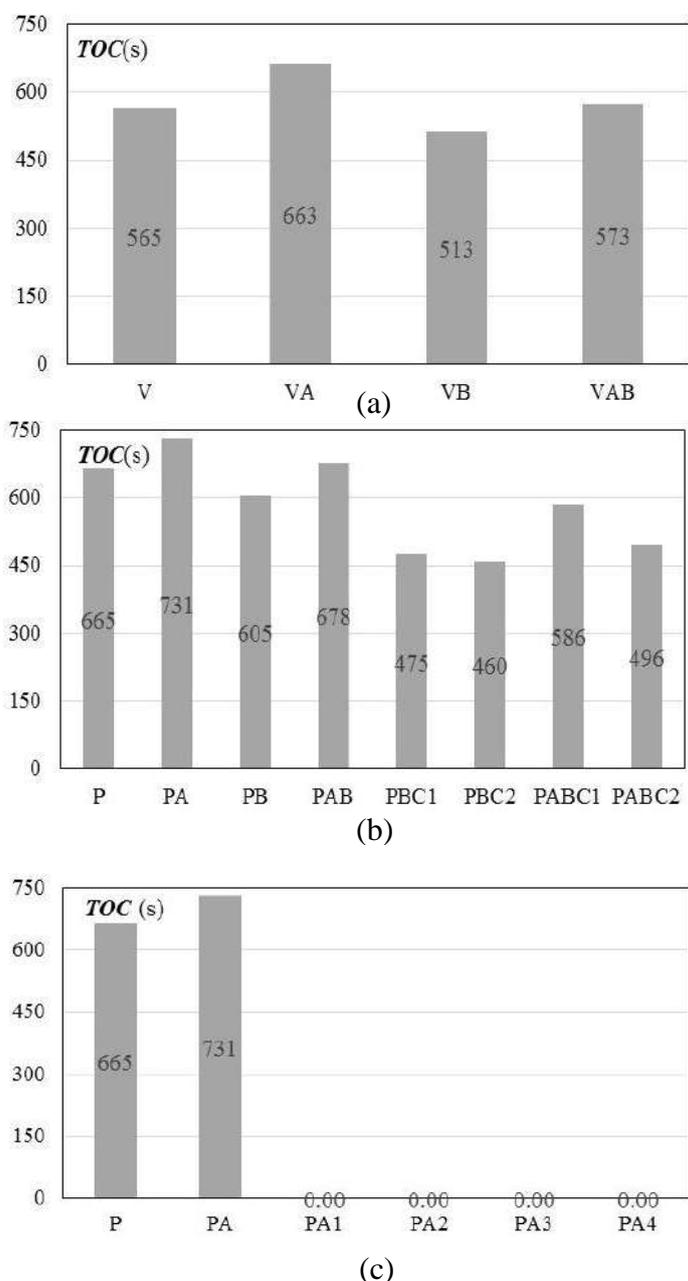
No entanto, a adição de ATH isoladamente nas concentrações de 47phr a 80phr produziu os compósitos com os melhores resultados do estudo, interrompendo a ignição (Figura 4-10c). A amostra PA1 merece destaque mais uma vez por apresentar este excelente resultado com a menor concentração de ATH dentre as amostras PA1 à PA4, sendo uma boa possibilidade para compostos de PRV retardantes de chama sem organohalogenados.

#### **Tempo total de combustão - TOC**

Os maiores tempos de combustão, tanto para a resina estervinílica quanto para a resina poliéster, foram para a adição da ATH isolada a 37phr de concentração, indicando uma propriedade de chama cessante deste compósito não tão boa quanto as outras amostras, como pode ser visto na Figura 4-11(a,b). No entanto, os materiais com adição de ATH em concentrações mais altas não apresentaram ignição, portanto, possuem valor zero para o TOC (Figura 4-11c). Este resultado demonstra novamente o potencial de adição de alumina no desenvolvimento de PRFV livre de halogênio.

Assim, os resultados do cone calorímetro de perda de massa mostraram que a adição exclusiva de ATH ou DBDE levou a um aumento discreto nas propriedades retardantes de chama, especialmente na redução de TLC e PTLC, particularmente na matriz poliéster (PA e PB). Estes aditivos tiveram pouca influência na matriz estervinílica (VA e VB). Além disso, foi observado que a adição concomitante de ATH e DBDE em ambas as matrizes poliméricas (VAB e PAB) não levou a melhorias nas propriedades retardantes de chama medidas através do cone calorímetro, indicando que um efeito sinérgico entre eles não foi detectado pela técnica. Neste caso, sugere-se que houve uma

diminuição significativa na temperatura do polímero, devido à desidratação endotérmica da ATH, e dificultou a ação da fase gasosa do DBDE (HIRSCHLER e TSIKA, 1983). Por outro lado, um efeito sinérgico foi observado entre o DBDE e o  $Sb_2O_3$  nas duas concentrações estudadas (PBC1 e PBC2). O sinergismo pode ocorrer através das interações na fase gasosa entre o aditivo halogenado e o óxido de antimônio (MOURITZ *et al.*, 2006).



**Figura 4-11** - Redução dos valores de pico de TOC para: (a) matriz estervinílica, (b) matriz poliéster e (c) matriz poliéster com variações apenas da concentração de ATH.

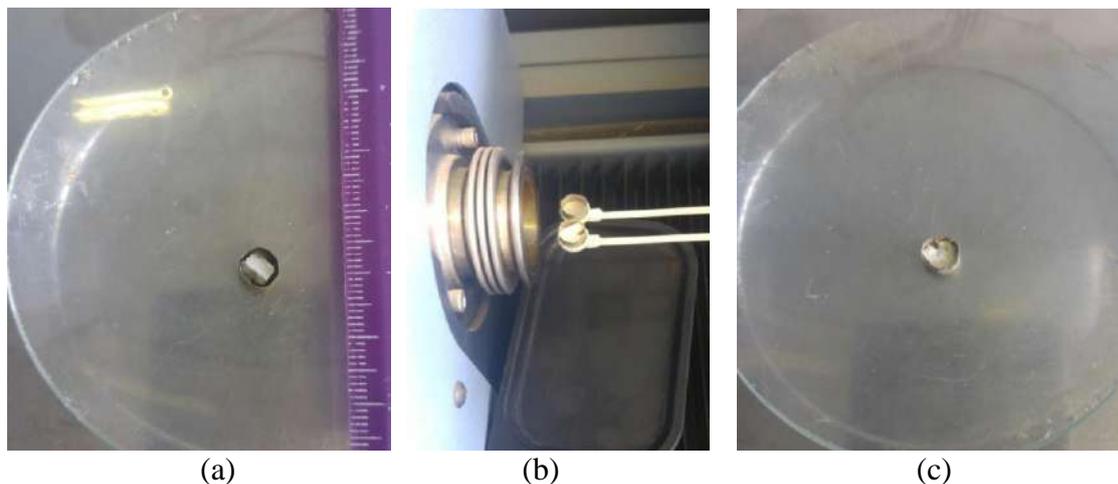
A adição concomitante de ATH, DBDE e  $Sb_2O_3$  levou a melhorias (redução de TLC, PTLT, CTL e TTI) indicando um efeito sinérgico, especialmente no compósito com menor concentração de aditivos (PABC1). Por outro lado, o aumento na perda de massa (TPM) de amostras contendo ATH, DBDE e  $Sb_2O_3$  (PABC1 e PABC2), quando comparado com aqueles sem ATH, mas com DBDE e  $Sb_2O_3$  (PBC1 e PBC2) pode ser devido à perda de água da decomposição térmica de ATH e não relacionado com uma decomposição da própria matriz polimérica. Finalmente, apesar dos efeitos sinérgicos observados, a adição de ATH em concentrações superiores a 47,5phr levou aos melhores resultados, especialmente a amostra PA1, que entre as amostras que não entraram em ignição teve a menor concentração de ATH. As amostras PA1 à PA4 tiveram resultados análogos aos da resina fenólica que é intrinsecamente incombustível.

## **4.2 AVALIAÇÕES DA INFLAMABILIDADE ATRAVÉS DOS EQUIPAMENTOS: TGA/DSC, LOI, UL-94 E FIO INCANDESCENTE**

Os ensaios descritos a seguir avaliaram outras propriedades retardantes de chama do material em foco, de forma a melhor explicar o comportamento do PRFV em altas temperaturas. Serão apresentados resultados das medições TGA e DSC normatizado pela ISO 11357 (1997), do equipamento LOI, normatizado pela ISO 4589-2 (1996), UL 94, normatizada pelo *Underwriters Laboratory* (2003) e ensaio do fio incandescente, normatizado pelas IEC 60695-2-10, 11, 12 (2000). O Anexo B apresenta os resultados de todas as amostras ensaiadas nesses equipamentos.

### **4.2.1 Análise simultânea TGA e DSC**

A Figura 4-12 apresenta as fases do ensaio em um analisador simultâneo TGA/DSC onde o corpo de prova é introduzido no suporte e posteriormente no equipamento junto a outro suporte vazio que servirá de referência.



**Figura 4-12** – Fases do ensaio em um analisador simultâneo TGA/DSC: (a) corpo de prova inserido no suporte, (b) corpo de prova ao lado do suporte vazio de referência e (c) corpo de prova após o ensaio.

A Tabela 4-2 apresenta o resumo dos resultados (todas as planilhas geradas pelo equipamento estão no Anexo C) e as Figura 4-13 à Figura 4-20 correspondem aos gráficos com as análises termogravimétricas (TGA) e de calorimetria de varredura diferencial (DSC).

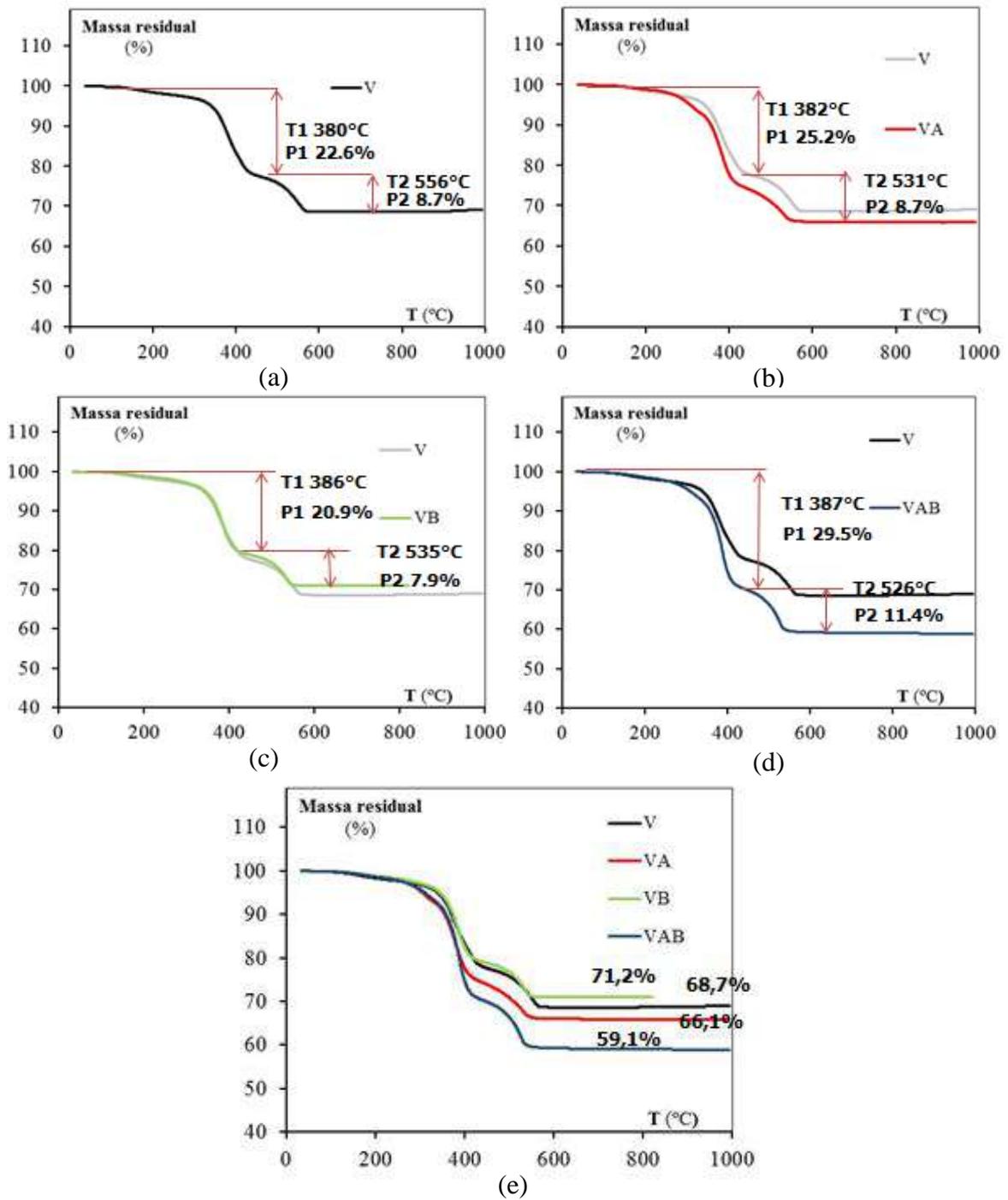
**Tabela 4-2** - Resumo dos resultados das análises TGA/DSC.

ID's	TGA					DSC			
	Temperatura das etapas (°C)		Perda da massa (%) 30-450°C	Perda da massa (%) 450-800°C	Resíduo à 800°C (%)	Temperatura dos picos (°C)		Entalpia (J/g)	
	T1	T2				T1 <sub>(endo)</sub>	T2 <sub>(exo)</sub>	E1 <sub>(endo)</sub>	E2 <sub>(exo)</sub>
V	380	556	22,6	8,7	68,7	-	543	-	-1995
VA	382	531	25,2	8,7	66,1	309	525	+85,1	-2064
VB	386	535	20,9	7,9	71,2	-	530	-	-1773
VAB	387	526	29,5	11,4	59,1	312	521	+63	-2297
P	379	524	32	3,9	64,1	-	523	-	-1333
PA	383	513	26,8	4,8	68,4	309	508	+35,9	-1116
PB	394	521	35,6	4,4	60	-	520	-	-1118
PAB	397	526	42,3	6,7	51	326	522	+20,1	-1459
PBC1	357	538	35,9	6,3	57,8	-	537	-	-1677
PBC2	359	562	42	8,1	49,9	-	546	-	-1945
PABC1	370	529	40,2	8,6	51,2	324	526	+73,1	-1846
PABC2	367	537	38,9	9,1	52	323	532	+40,5	-2029
F	528	567	7,7	2	90,3	-	561	-	-1747
PA1	398	520	28	4,8	62,5	304	521	+64,0	-2132
PA2	400	530	30	5,3	61,9	340	513	+119,2	-1536
PA3	395	525	27,1	4,1	64	324	515	+102,4	-1947
PA4	325	512	34,7	6,1	59	323	513	+102,2	-1459

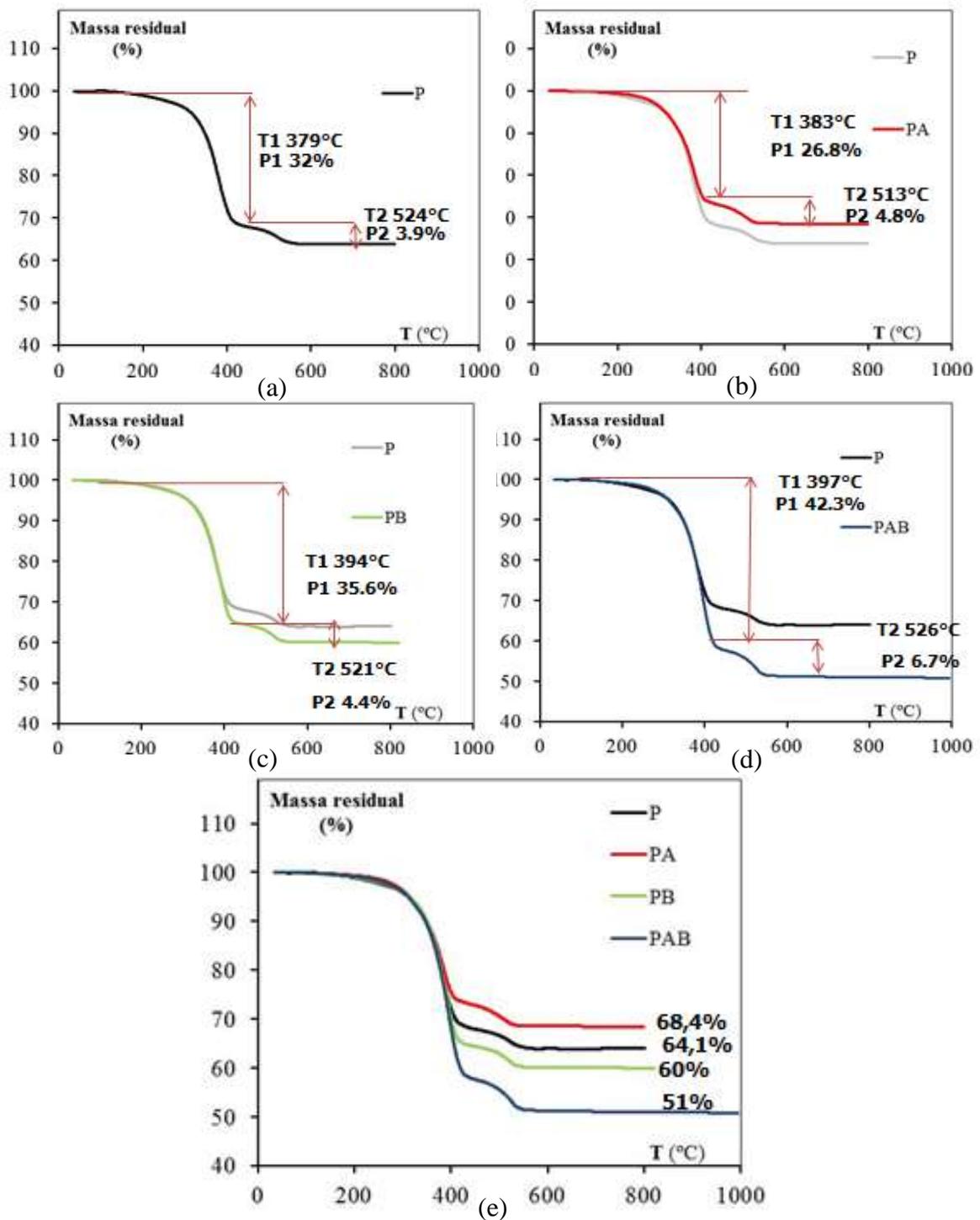
A curva de TG da matriz estervinílica, Figura 4-13a, apresenta um perfil de degradação com duas etapas correspondentes à decomposição da matriz polimérica. Segundo CORREIA *et al.* (2010 parte A), essas duas etapas na curva de TG têm uma correspondência na curva de DSC, Figura 4-15a, onde podem ser identificados dois picos exotérmicos e associado ao calor liberado quando o material entra em combustão. Ainda em CORREIA *et al.* (2010) (partes A e B), resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho foram obtidos, como o percentual de perda de massa próximo de 30% e também as duas etapas de degradação, para a resina poliéster pura. A adição dos retardantes de chama não alterou o perfil de degradação da resina estervinílica, mantendo a temperatura de degradação referente ao primeiro pico, em torno de 380°C, mas reduziu em torno de 20°C a temperatura do segundo pico, indo de 556°C (V) para 526°C com ATH e DBDE (VAB).

A adição do DBDE, Figura 4-13c, aumentou o resíduo em alta temperatura em relação a matriz pura (68,7%), fazendo com que o resíduo a 800°C fosse maior, variando para 71,2%. Contudo, a ATH adicionada isoladamente (Figura 4-13b) manteve o resíduo da matriz pura e a adição concomitante com o DBDE (Figura 4-13d) reduziu o resíduo, chegando a 59,1% de massa final. Esse mesmo efeito antagônico do DBDE junto com a alumina foi observado pelo cone calorímetro. Apesar de não constar diretamente na Tabela 4-2, é observada uma perda de massa em torno de 2% na faixa de 30 a 200°C, que corresponde à perda de solvente, proveniente do processo de pultrusão.

A curva TG da resina poliéster pura, Figura 4-14a, assim como a estervinílica, apresentou uma curva com duas etapas de degradação.



**Figura 4-13** – Curvas TG da matriz estervínica: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

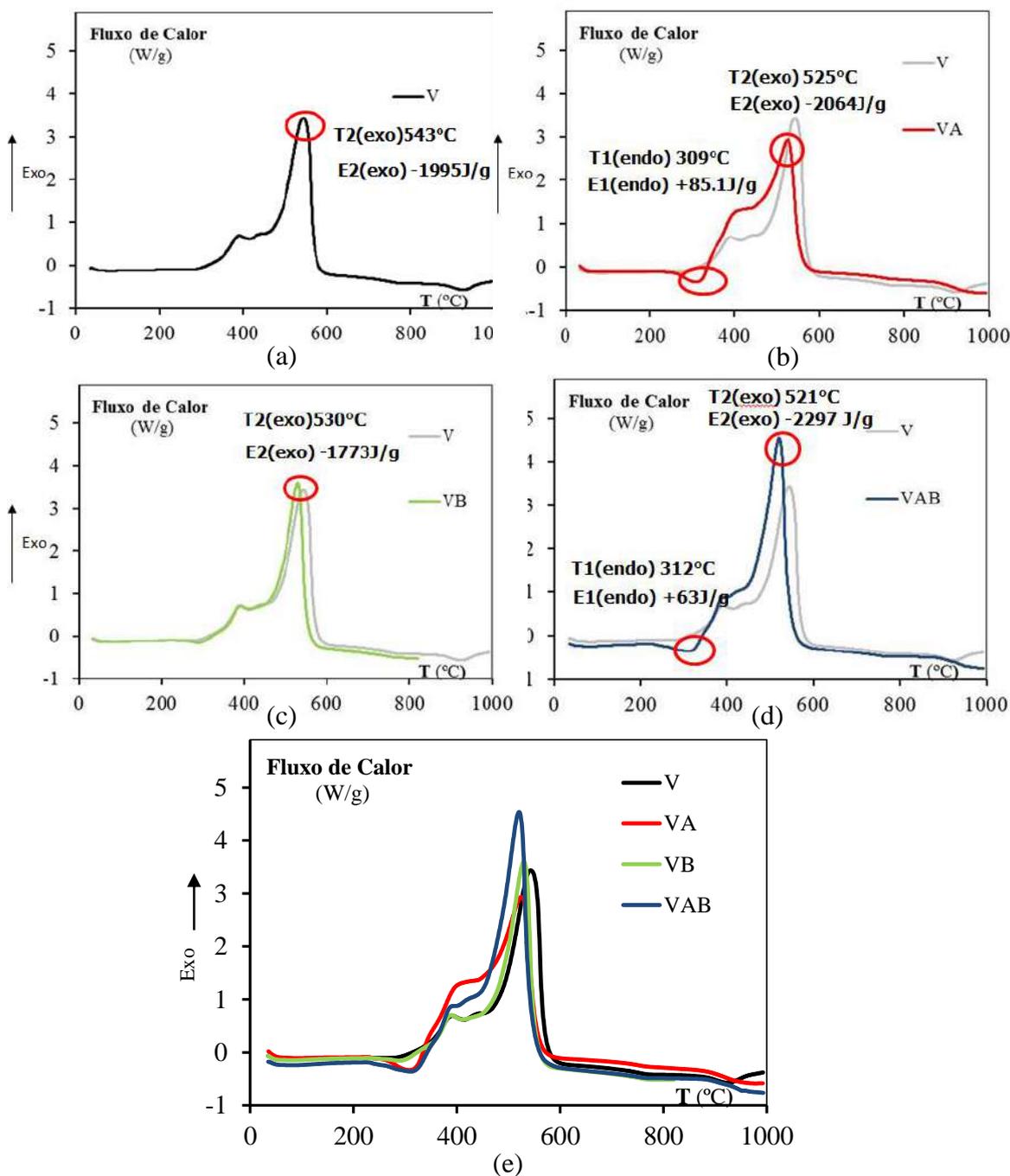


**Figura 4-14** – Curvas TG da matriz poliéster: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

A adição isolada da ATH à matriz poliéster (PA) apresentou um aumento na porcentagem de resíduo a 800°C, indo de 64,1% para 66,1%, ao contrário dos resultados obtidos com a adição isolada do DBDE que diminuiu o resíduo para 60%. A adição concomitantemente do DBDE com ATH diminuiu o resíduo para 51%, o que também demonstra o efeito antagônico da mistura em poliéster indicado pela curva DSC.

A curva de DSC das amostras contendo a resina estervinílica pura, Figura 4-15a, apresenta dois picos exotérmicos, na faixa de 300 à 800°C. Estes picos estão associados às duas degradações observadas pelo TGA, sendo que a segunda degradação, apesar de menor perda de massa, apresentou uma maior liberação de energia. A adição de ATH isoladamente e concomitantemente (VA e VAB) ocasionou um pico endotérmico em torno de 309°C (T1) e uma perda de massa em torno de 7%, na faixa de 200 a 350°C, correspondente à perda de água (GALLO e AGNELLI, 1998). Após 350°C, o perfil de entalpia de combustão permanece com dois picos exotérmicos, mantendo o perfil da resina pura. A ação da ATH absorve calor, libera água e cria uma camada protetora de óxido de alumínio. Por conta dessa camada protetora, o segundo pico das amostras com ATH (VA e VAB) apresentaram temperatura menor do que com a matriz pura (V).

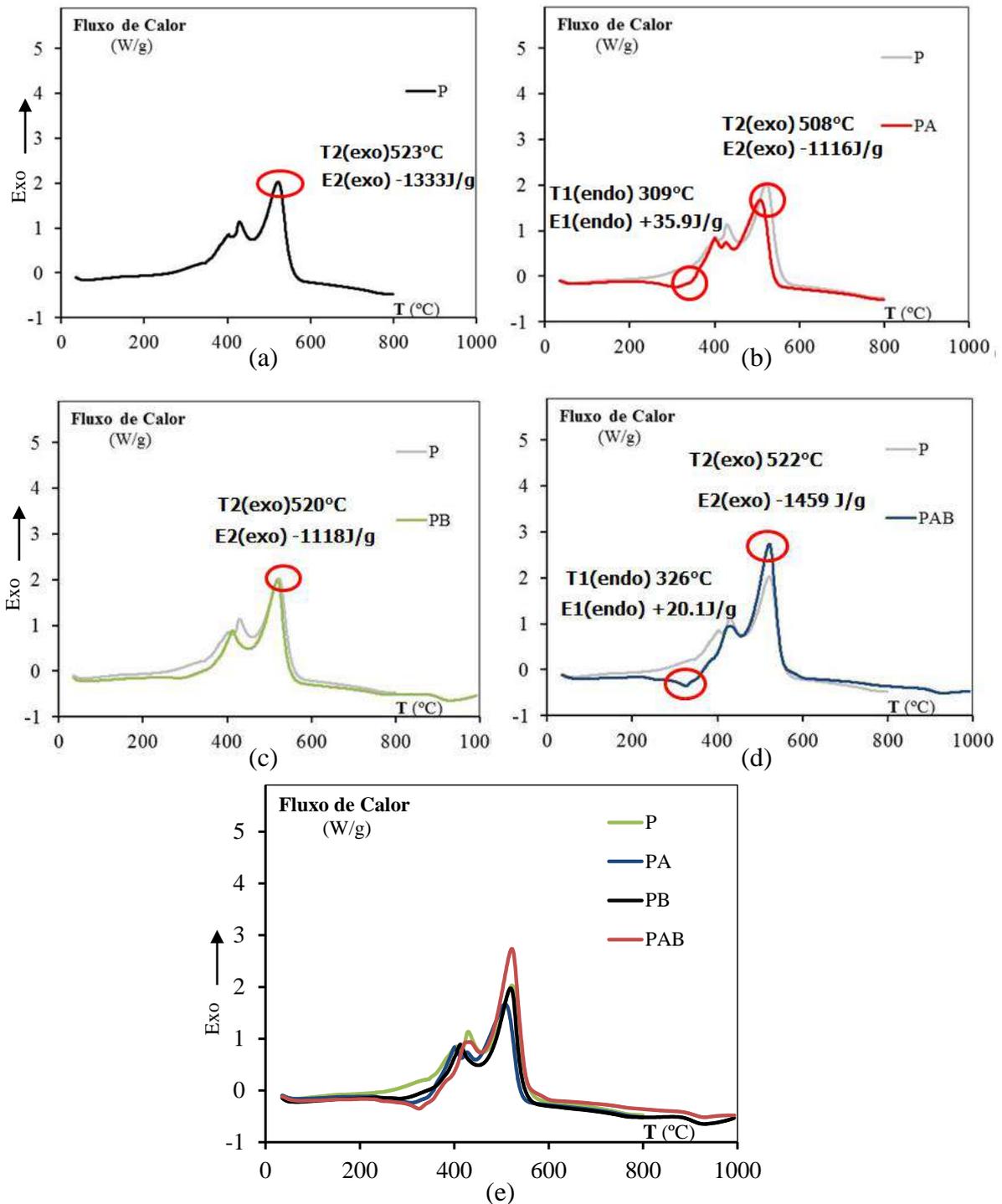
A adição do DBDE à resina estervinílica, Figura 4-15c, na faixa de 30 a 300°C, não apresentou nenhum pico de liberação ou absorção de energia, o que corresponde ao comportamento da matriz pura. Em relação à entalpia de combustão, o DBDE reduziu os valores em relação a matriz pura, indo de 1995 J/g para 1773 J/g. Já a adição concomitante do DBDE e a ATH elevou a entalpia para 2297 J/g, fato também observado pelo cone calorímetro no parâmetro PTLC, discutido no item 4.1.1, indicando novamente uma possível ação antagônica.



**Figura 4-15** – Curvas DSC da matriz estervinílica: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

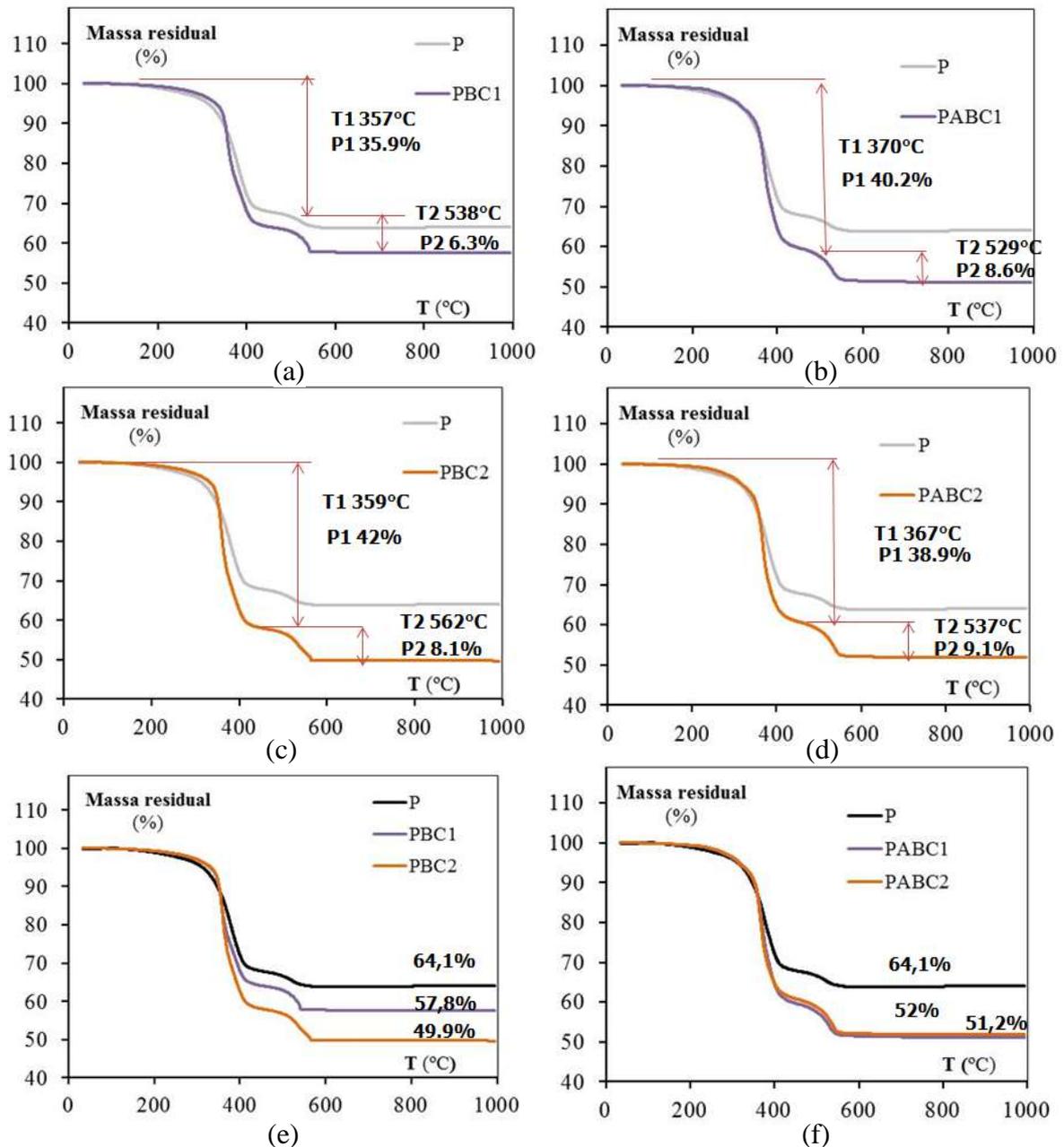
A curva de DSC do poliéster puro, Figura 4-16a, apresentou dois picos exotérmicos na faixa de 300 à 600°C. A adição da ATH não alterou o perfil da resina pura, porém reduziu a entalpia do segundo pico, indo de 1333 J/g para 1116 J/g. Já o DBDE adicionado isoladamente e concomitantemente com a ATH pode estar interferindo no

mecanismo de decomposição térmica da resina poliéster. Desta forma, sugere-se que durante a decomposição do poliéster, os produtos de decomposição do DBDE estejam reagindo com os radicais de alta energia  $H\cdot$  e  $OH\cdot$  de forma mais eficaz, a ponto de alterar o processo de combustão da resina.



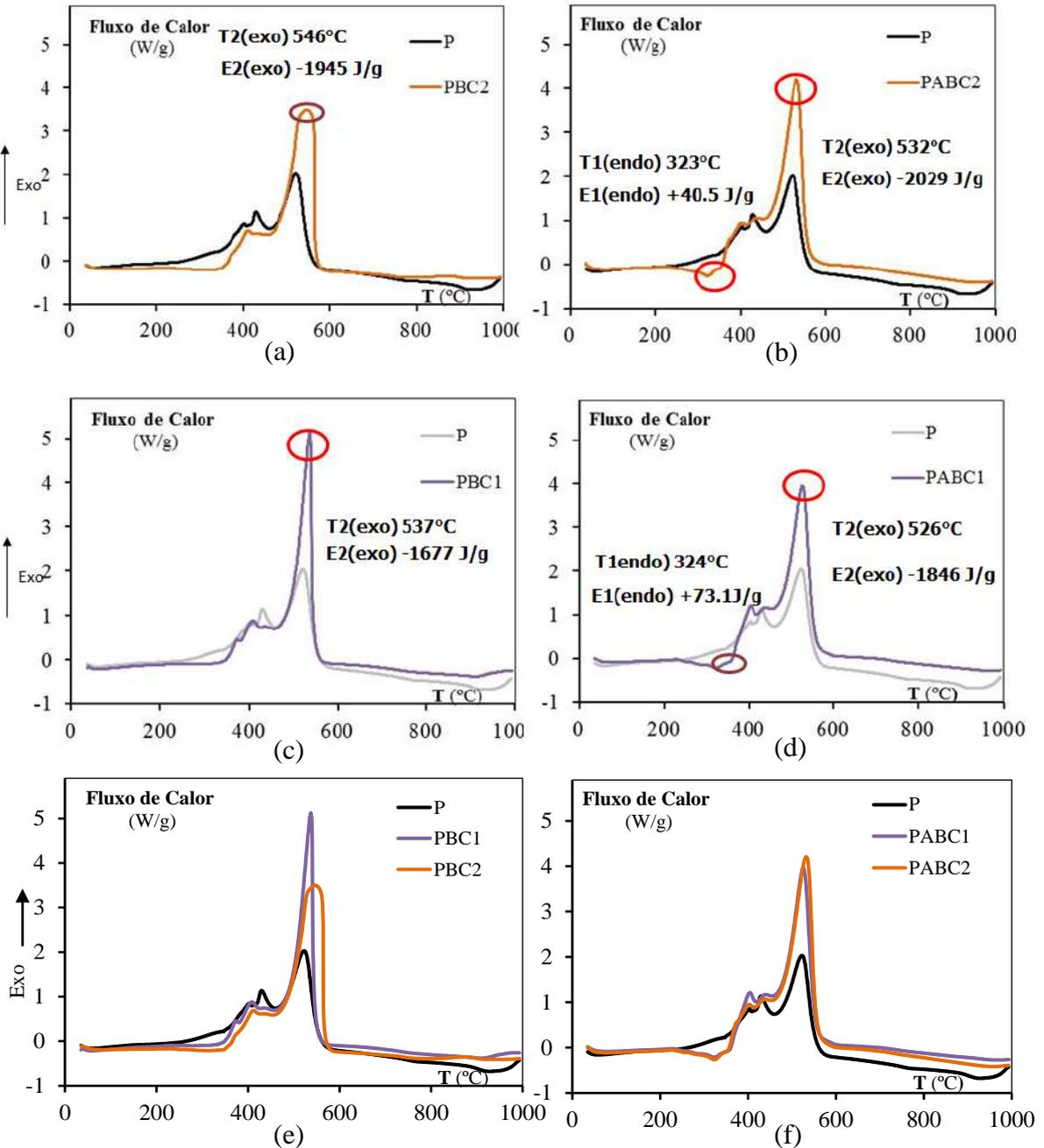
**Figura 4-16** – Curvas DSC da matriz poliéster: (a) sem retardante, (b) com adição de ATH em 37phr, (c) com adição de DBDE, (d) com adição concomitante de ATH e DBDE e (e) todas as amostras sobrepostas.

A Figura 4-17a mostra que a inclusão do  $Sb_2O_3$  e de DBDE na resina poliéster manteve a curva com duas etapas de degradação, mas reduziu o resíduo em alta temperatura em relação a matriz pura, tanto para a primeira concentração (PBC1) de 13%, indo para 57,8% de resíduo, quanto para a segunda concentração (PBC2) de 19,5%, indo para 49,9% de resíduo. A adição da ATH nesse sistema, Figura 4-17(b, d), manteve o mesmo padrão de resíduo em alta temperatura descrito anteriormente. A primeira concentração (PABC1) foi para 51,2% e a segunda (PABC2) para 52% de resíduo.



**Figura 4-17** – Curvas TGA da matriz poliéster com: (a) 13phr DBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$ , (b) 37phrATH, 13phrDBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$ , (c) 19,5phr DBDE e 6,5phr  $Sb_2O_3$ , (d) 37phrATH, 13phrDBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$  e (e) (f) amostras sobrepostas.

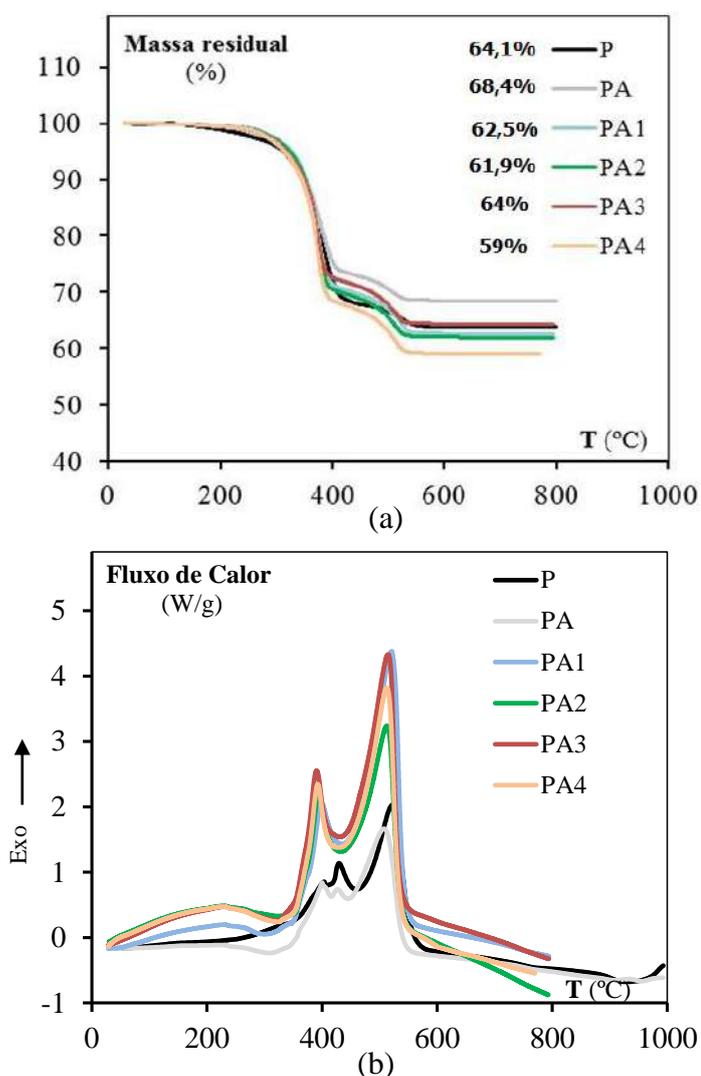
O perfil da curva de entalpia da combustão (Figura 4-18) foi alterado com a adição do  $Sb_2O_3$ , para as duas porcentagens, comparado com a adição do DBDE isoladamente, indicando a influência desse agente de sinergia no sistema e uma possível modificação no mecanismo de degradação desta matriz de poliéster. A entalpia final foi maior nesse sistema comparado com a resina pura, para as duas porcentagens, variando de 1677 J/g a 1945 J/g.



**Figura 4-18** – Curvas TGA da matriz poliéster com: (a) 13phr DBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$ , (b) 37phrATH, 13phrDBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$ , (c) 19,5phr DBDE e 6,5phr  $Sb_2O_3$ , (d) 37phrATH, 13phrDBDE e 4,3phr  $Sb_2O_3$  e (e) (f) amostras sobrepostas.

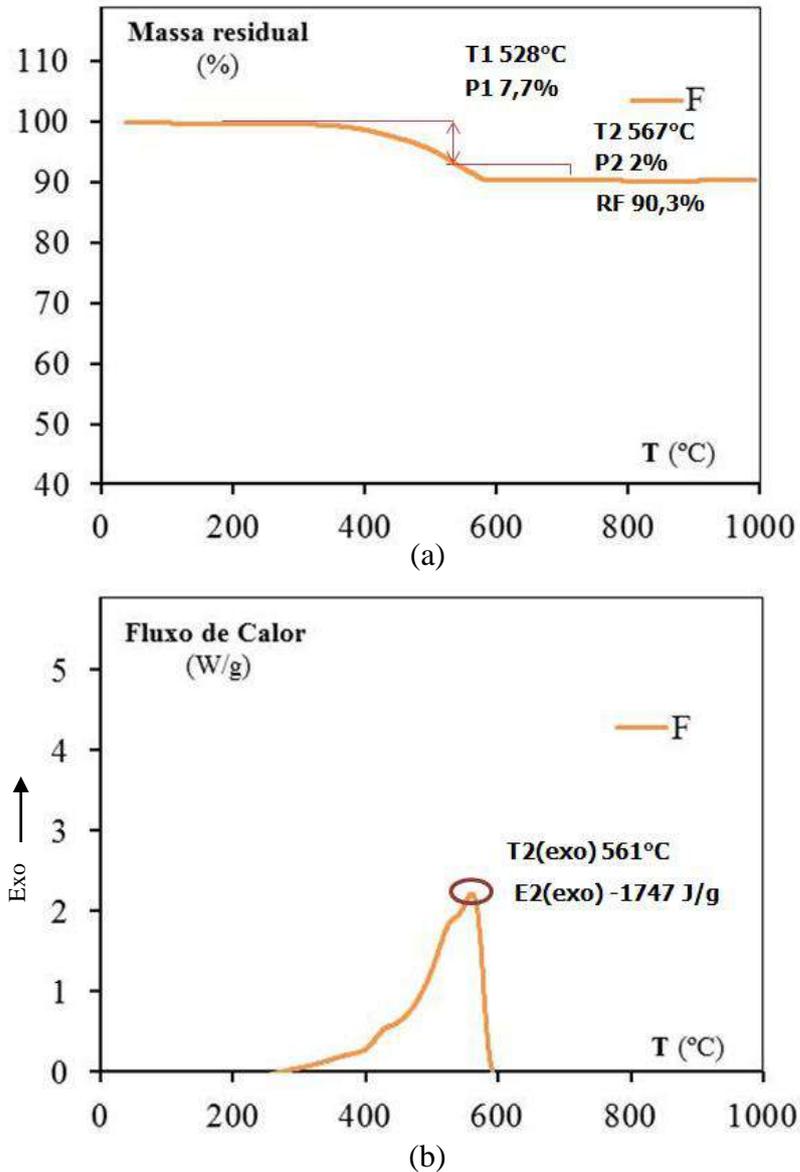
A adição da ATH no sistema junto ao DBDE e o  $Sb_2O_3$ , Figura 4-18d, também apresentou o pico endotérmico, referente a perda de água, mas não alterou o perfil de combustão comparado a resina pura. Assim como o sistema anterior sem a ATH, este também elevou o valor da entalpia para ambas as porcentagens, variando de 846 J/g a 2029 J/g.

As variações das concentrações de ATH do PA1 à PA4 levaram a resíduos a 800°C medidos por TGA menores comparados à resina pura, sendo o PA4 com menor resíduo, Figura 4-19a. Parte da perda de massa observada nessas amostras é devido a perda de água de ATH e não, necessariamente, por conta da degradação da resina. Em relação à entalpia do segundo pico exotérmico, Figura 4-19b, as maiores concentrações de ATH (PA1 à PA4) elevaram o fluxo de calor liberado, aproximando-se ao sistema com  $Sb_2O_3$ .



**Figura 4-19** - Curvas da resina poliéster com ATH: (a) massa residual (TGA) e (b) fluxo de calor (DSC) em função da temperatura.

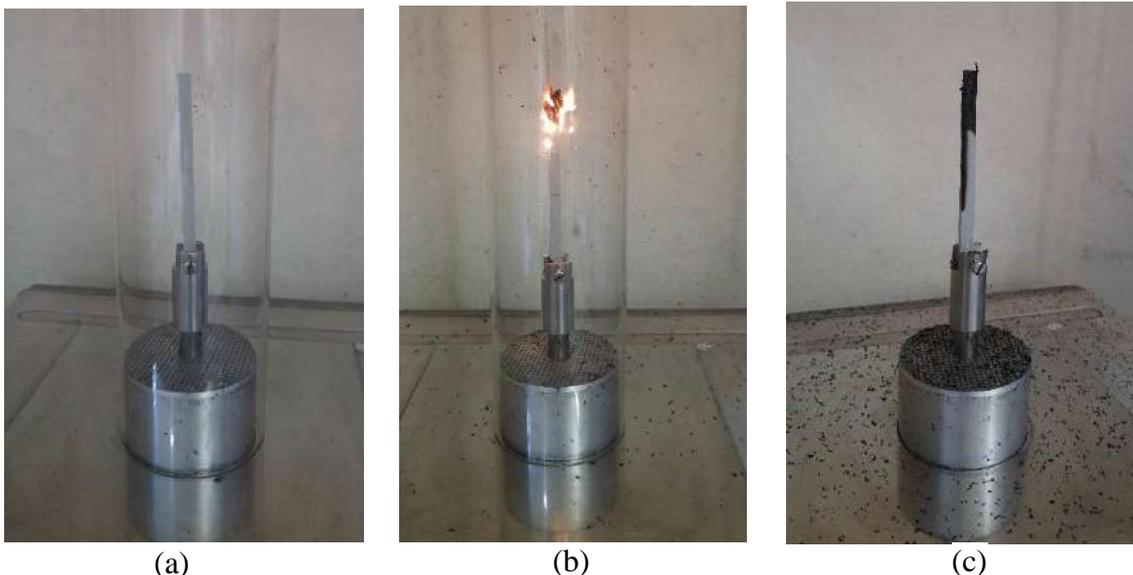
Em sequência, a resina fenólica apresentou maior resíduo a 800°C, cerca de 90,3% e duas etapas de degradação (Figura 4-20a). A curva de DSC (Figura 4-20b) apresentou três picos exotérmicos na faixa de 300 a 600°C, alcançando a entalpia de 1747 J/g.



**Figura 4-20** - Curvas da resina fenólica: (a) massa residual (TGA) e (b) fluxo de calor (DSC) em função da temperatura.

#### 4.2.2 Índice Limite de Oxigênio (LOI)

A Figura 4-21(a-c) ilustra os espécimes antes, durante e após os testes experimentais. A amostra PB apresentou ignição e teve cessar chamas forçado.



**Figura 4-21** - Fases do ensaio LOI com matriz poliéster e composto decabromodifenil eter: (a) início do ensaio, (b) corpo de prova com chama aparente e (c) corpo de prova após cessar chama forçado.

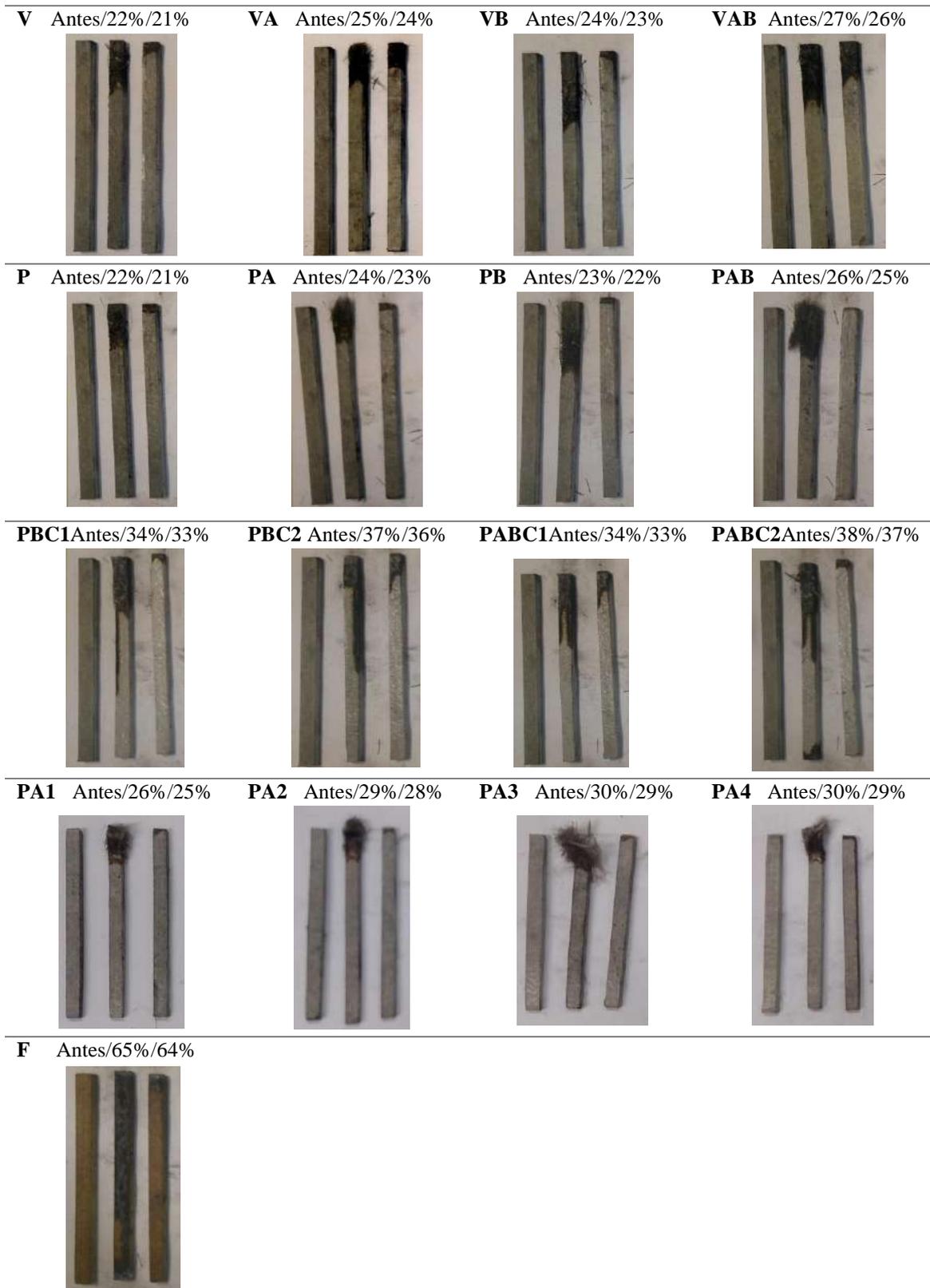
A Tabela 4-3 reporta os resultados dos testes de LOI. Os experimentos demonstraram que não houve diferença entre o comportamento das resinas de poliéster e estervinílica. Ambos os materiais apresentaram uma LOI de 21%, isto é, inflamaram e propagaram facilmente a combustão, já que 21% é um percentual de oxigênio muito próximo da concentração na nossa atmosfera. Por outro lado, os materiais com adição de ATH mostraram o melhor desempenho em ambas as matrizes, em comparação ao DBDE, aumentaram o valor do LOI da resina estervinílica de 21% para 24% e o poliéster para 23%. Observa-se também que a mistura de ATH e DBDE em ambas as resinas aumentou o índice de limite de oxigênio, 26% para estervinílica e 25% para poliéster. Apesar do aumento observado nos valores de LOI, eles ainda são valores consideravelmente baixos para sistemas retardadores de chama. Posteriormente, a adição do composto  $Sb_2O_3$  ao DBDE na matriz poliéster aumentou consideravelmente esse parâmetro, atingindo o índice de 33% para a menor concentração (PBC1) e 36% para o maior (PBC2). Na sequência, a adição da ATH com DBDE e  $Sb_2O_3$  (PBCA1 e PBCA2) manteve a melhora observada anteriormente, indicando a não interferência da ATH no sistema. Vale a pena notar que os valores de 36 e 37% do LOI são valores que podem ser comercialmente desejados. Para fios e cabos, por exemplo, o valor de LOI desejado é 30% (GALLO e AGNELLI, 1998).

**Tabela 4-3** – Resultados de testes LOI de compósitos estervinílica e poliéster

Id's	LOI (%)
V	21
VA	24
VB	21
VAB	26
P	21
PA	23
PB	22
PAB	25
PBC1	33
PBC2	36
PABC1	33
PABC2	37
PA1	26
PA2	29
PA3	30
PA4	30
F	64

A Tabela 4-3 mostra que todas as concentrações de ATH do PA1 a PA4 também elevaram o LOI atingindo 30% com PA3 e PA4. No entanto, considerando o erro de  $\pm 1\%$  da técnica, a amostra PA2 com 29% de LOI merece destaque, pois apresenta menor percentual de alumina em relação às amostras PA3 e PA4. Nos testes de LOI, o valor comercialmente desejado de 30% (GALLO e AGNELLI, 1998), devido a precisão de  $\pm 1$ , foi atingido apenas para a amostra de PA2 com uma maior porcentagem de alumina do que PA1. Por outro lado, as amostras PA1 à PA4 tiveram desempenho semelhante no cone calorímetro, pois não inflamaram. CAMINO *et al.* (1995) estudaram o mecanismo do comportamento de combustão de materiais poliméricos em vários testes de incêndio em escala de bancada, incluindo cone calorímetro e LOI, e não encontraram uma correlação entre os resultados. Assim, devido às grandes diferenças entre esses testes de fogo, uma forte correlação entre eles não pode ser alcançada. Já a matriz fenólica, mesmo sem a adição de retardantes de chamas, apresentou o melhor resultado com um LOI de 64%. A Figura 4-22 apresenta as amostras antes do ensaio, com ignição e sem ignição (valor do LOI). Nota-se que os corpos de prova V, VA, VB, VAB, P, PA, PB, PAB, PBC1, PBC2, PABC1, PABC2 e F, que apresentaram ignição, estão queimados além da metade do seu comprimento, ultrapassando o limite máximo de consumo do corpo de prova exigido em norma e também o limite do tempo. Os corpos de prova do sistema contendo alumina isolada em maiores concentrações (PA1 à PA4) apresentaram

uma chama sustentada sem consumo rápido da amostra, comparadas com as demais, ultrapassando somente o tempo limite de 3 minutos exigido pela norma.



**Figura 4-22** - Imagens dos corpos de prova de PRFV antes e após os ensaios LOI.

### 4.2.3 Queima Vertical - UL- 94

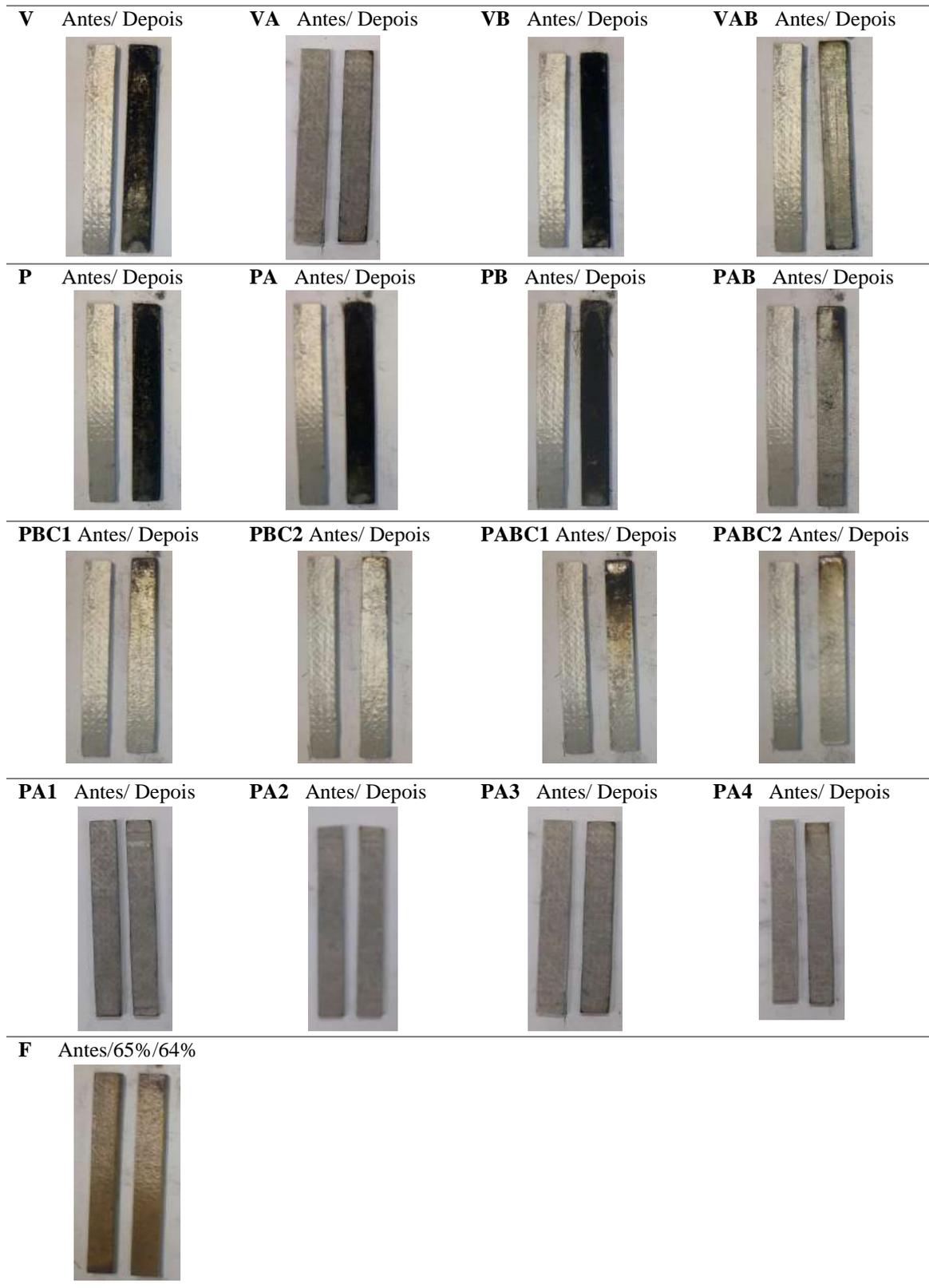
A Tabela 4-4 reporta a classificação do teste de queima vertical UL94. O retardante de chama ATH foi o que apresentou o melhor resultado na matriz estervinílica, levando à classificação UL-94 de V0 (que é a classificação máxima de acordo com a norma). Com a resina poliéster, apenas a adição concomitante de DBDE e ATH se tornou V0 (PAB), uma classificação comercialmente desejada. O resultado da LOI também mostrou o efeito positivo da mistura de ATH e DBDE sobre a resina poliéster (PAB), que não foi evidenciada no cone calorímetro. Este resultado pode indicar que a ação desta mistura de retardantes de chama atua predominantemente em propriedades tais como a viscosidade de fundido (influenciando o comportamento de gotejamento, tão importante no LOI e UL-94).

A adição de  $Sb_2O_3$  com DBDE, em ambas as concentrações, e posteriormente a adição de ATH também levaram à classificação V0 para a resina poliéster. Além disso, a adição de ATH nas concentrações usadas em PA1 a PA4 também levou à classificação desejada de V0. O aumento da porcentagem de ATH de 37 para 47,5% empregada levou à classificação máxima de V0, onde não há gotejamento da amostra e uma auto-extinção rápida da chama.

**Tabela 4-4** – UL-94 de compostos estervinílica e poliéster

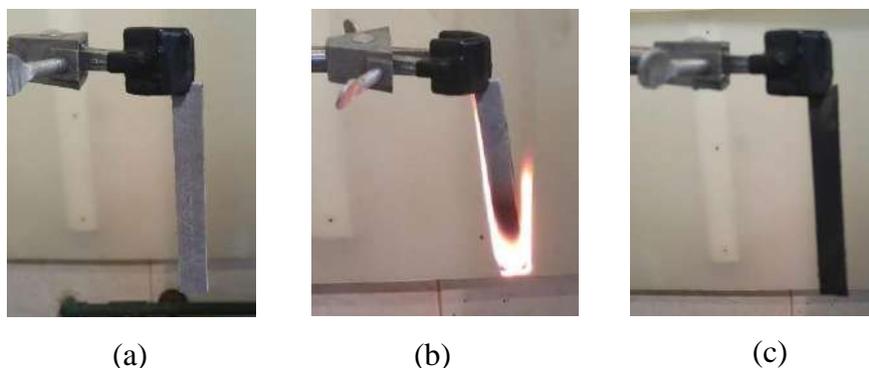
<b>Amostras</b>	<b>UL-94</b>
V	não classifica
VA	V0
VB	não classifica
VAB	V0
P	não classifica
PA	não classifica
PB	não classifica
PAB	V0
PBC1	V0
PBC2	V0
PABC1	V0
PABC2	V0
PA1	V0
PA2	V0
PA3	V0
PA4	V0
F	V0

As Figura 4-23 apresentam os corpos de prova antes e após o ensaio e as Figura 4-24 (a-c) ilustram o progresso dos testes realizados em termos de imagens tiradas durante as investigações experimentais.



**Figura 4-23** - Imagens dos corpos de prova de PRFV antes e após os ensaios UL-94.

As amostras não classificadas (V, VB, P, PA e PB) ficaram totalmente carbonizadas. O fogo consumiu completamente os corpos de prova, se estendendo ao prendedor, necessitando de cessar chama forçado. Já as amostras classificadas em V0, que não apresentaram chama sustentada por mais de 10 segundos, encontram-se apenas com a extremidade queimada.



**Figura 4-24** - Diferentes fases do ensaio UL-94 para resina poliéster sem retardante de chamas: (a) início do ensaio, (b) corpo de prova com chama aparente e (c) corpo de prova após cessar chama.

#### 4.2.4 Fio incandescente

O fio incandescente vem sendo usado em estudos para avaliar as propriedades retardantes de chama de PRFV. Por exemplo, BOURBIGOT *et al.* (2018) utilizou o fio incandescente para avaliar o papel fundamental do tratamento de superfície com hidróxido de magnésio no retardamento de chama da poliamida reforçada com fibra de vidro (PA-6). Os poliésteres aromáticos semi-cristalinos da engenharia são amplamente utilizados como materiais isolantes em aparelhos elétricos e eletrônicos, e as propriedades de retardamento de chama são avaliadas por testes de fio incandescente. ACQUASANTA *et al.* (2011) estudaram vários polímeros e misturas tais como poli butileno tereftalato (PBT), pol (tereftalato de etileno (PET), bisfenol A, policarbonato (PC) contendo 30% de fibras de vidro. Os aditivos retardantes de chama foram baseados em polifosfato de melamina (MMP) e composto bromado. Apesar destas pesquisas utilizando o fio incandescente, não foram encontrados estudos que avaliassem a influência da concentração de ATH e a interação entre DBDE e  $Sb_2O_3$  e ATH na PRFV

através do teste do fio incandescente. A Tabela 4-5 reporta os resultados do teste de fio incandescente e a Figura 4-25 apresenta a ponta incandescente do equipamento em contato com o corpo de prova durante o ensaio.

**Tabela 4-5** – GWFI e GWIT para compósitos de resinas poliéster e estervínlica.

Amostras	GWFI (°C)	GWIT (°C)
V	960	850
VA	960	850
VB	960	850
VAB	960	750
P	800	850
PA	960	875
PB	960	875
PAB	960	875
PBC1	960	930
PBC2	960	930
PABC1	960	930
PABC2	960	930
PA1	960	875
PA2	960	875
PA3	960	875
PA4	960	875
F	960	960



**Figura 4-25** – Ponta incandescente do equipamento em contato com a amostra com resina poliéster sem retardante de chamas.

Em relação à matriz de estervinílica pura, as amostras apresentaram a temperatura máxima de ensaio, atingindo um GWFI de 960°C, mantida pela adição dos retardantes de chama. Em contrapartida, a resina poliéster pura atingiu 800°C e depois de adicionado o DBDE e ATH demonstrou uma melhora significativa, atingindo também a temperatura máxima do teste. Em sequência, a adição de Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com DBDE e posteriormente o ATH também elevou a temperatura máxima de teste em relação à matriz poliéster pura. Variações das concentrações de ATH (PA1 à PA4) também atingiram GWFI de 960°C. A resina fenólica, mesmo sem retardante, apresentou também a temperatura máxima do teste.

O segundo parâmetro medido e apresentado na Tabela 4-5 foi o GWIT, onde a adição exclusiva de ATH e DBDE manteve o GWIT da matriz de estervinílica (V) a 850°C. A adição concomitante de DBDE e ATH na amostra de VAB reduziu o valor para 750°C. Este efeito antagônico também foi observado no cone calorímetro, especialmente no PTLC e CTL. Com a resina poliéster, todas as variações iniciais de retardante de chama melhoraram este parâmetro, aumentando de 850°C para 875°C, bem como todas as variações das concentrações de ATH do PA1 à PA4. Em sequência, a adição de Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> também elevou consideravelmente a temperatura de ignição da resina poliéster, indo para 930°C, apresentando os melhores resultados. No entanto, o GWFI mínimo é de 850°C para entradas poliméricas em contato, com ou perto, de condutores elétricos onde a corrente elétrica é maior que 0,2A (ACQUASANTA *et al.*, 2011). Considerando a toxicidade do DBDE e o GWFI máximo de 960°C atingido, a amostra de PA merece destaque, pois contém 37%, a menor porcentagem de ATH utilizada neste estudo, e mesmo assim, obteve um resultado comercial desejado para fios e cabos. A resina fenólica atingiu as temperaturas máximas para ambos os testes, GWIT e GWFI.

A Figura 4-26 apresenta os corpos de prova antes e após os ensaios de cada parâmetro (primeiro GWFI seguido por GWIT). O parâmetro GWFI pode apresentar chama sustentada, porém deve se auto-extinguir em até 30 segundos, os corpos de prova exibem uma marca de queima muito maior que os do ensaio GWIT. No entanto, as amostras PA1 à PA4 e fenólica não indicam esse comportamento em nenhum dos dois parâmetros medidos. Os corpos de prova exibem apenas a marca de contato da ponta incandescente pois não apresentaram uma chama sustentada.



# 5

## CONCLUSÕES

Os estudos realizados na presente pesquisa de doutorado relataram os resultados de testes de reação a fogo de laminados de PRFV, desprotegidos ou protegidos com os diferentes sistemas de proteção passiva contra incêndio.

Como parte dos objetivos pretendidos, os resultados experimentais tratados nesta tese permitiram a obtenção de conhecimento mais aprofundado sobre o comportamento de diferentes resinas de PRFV com e sem influência de retardantes de chamas usuais, assim como a obtenção de uma base para uma futura proposição de um material de proteção passiva contra o fogo. Além das várias observações apontadas no decorrer deste trabalho, as seguintes conclusões merecem ser especialmente mencionadas:

- i. A adição concomitante de ATH e DBDE em ambas as resinas (PAB e VAB) teve efeito antagônico nas propriedades retardantes de chama medidas pelo cone calorímetro. Neste caso, sugere-se que houve uma diminuição significativa na temperatura do polímero, devido à desidratação endotérmica da ATH, dificultando a ação da fase gasosa do DBDE. No entanto, os resultados LOI, UL-94 e fio incandescente mostraram um efeito positivo desta mistura ATH e DBDE. Estes resultados podem indicar que a ação desta mistura de retardantes de chama também atua em propriedades como a viscosidade do fundido, influenciando o comportamento de gotejamento, tão importante na LOI e UL-94 e no fio incandescente (GWFI).
- ii. Um efeito sinérgico foi observado entre DBDE e  $Sb_2O_3$  nas duas concentrações estudadas (PBC1 e PBC2). O sinergismo pode ocorrer através das interações na fase gasosa entre o aditivo halogenado e o óxido de antimônio. Além disso, a adição concomitante de ATH, DBDE e  $Sb_2O_3$

(PABC1 e PABC2) levaram a melhorias (redução de TLC, PTLC, CTL e TTI) indicando um efeito sinérgico, especialmente no compósito com menor concentração de aditivos (PABC1). Parece que a ATH na presença de  $Sb_2O_3$  não interfere negativamente na ação do DBDE em fase gasosa. Outra hipótese seria que a ATH teria um efeito de diluição, reduzindo a quantidade de resina em relação à amostra sem ATH (PBC1). Nas análises de LOI, UL-94 e fio incandescente das amostras de PABC1 e PABC2 foram mantidos os melhores resultados já obtidos pelos sistemas contendo apenas DBDE e  $Sb_2O_3$  (PBC1 e PBC2).

- iii. Os melhores resultados encontrados foram aqueles em que a ATH foi adicionada sozinha em altas concentrações (47,75% a 80%) e com a resina fenólica. Porém, a matriz fenólica apresenta elevado custo operacional (BORGES, 2004) e, conseqüentemente, seu valor comercial é alto comparado com as outras resinas. Já as amostras com ATH em altas concentrações exibiram inibição de ignição no CCPM e UL-94, resultando nas melhores propriedades de reação, além de serem livres de halogênio. Os resultados foram melhores do que os obtidos pelos sistemas contendo ATH, DBDE e  $Sb_2O_3$  concomitantemente (PABC1 e PABC2), com exceção dos resultados da LOI. Assim, a única adição de ATH nos sistemas estudados em concentrações acima de 47,5% geralmente levou a melhores propriedades do que as obtidas com os sistemas contendo DBDE,  $Sb_2O_3$  e ATH. É importante notar que, dependendo da aplicação, a redução das propriedades mecânicas que seriam esperadas com altas concentrações de ATH deve ser levada em consideração. Assim, os materiais com menores concentrações de ATH, como PA1 com 47,5%, podem se tornar interessantes, quando comparados às demais composições, pois a ATH é um material amplamente utilizado como elemento de carga devido ao seu baixo custo e baixa toxicidade.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras envolvendo PRFV:

- i. Avaliação das propriedades mecânicas (ensaios de tração direta, flexão, compressão e cisalhamento interlaminar) dos PRFV's com concentrações de ATH antes e após o aquecimento;
- ii. Execução de testes em altas temperaturas envolvendo elementos estruturais como barras na compressão axial e vigas em PRFV com concentrações de ATH;
- iii. Avaliação da influência do véu de acabamento com retardante de chamas em apenas um lado das amostras de PRFV nas propriedades de reação ao fogo;

# 6

## **BIBLIOGRAFIA**

ACQUASANTA, F., BERTI, C., COLONNA, M., FIORINI, M. “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, pp. 566-573, 2011.

ARCHIEXPO. *Fechamento de fachada em fibra de vidro, Betsinor*: Produtos, 2018. Disponível em: <http://www.archiexpo.com/pt/prod/betsinor/product-57855-986579.hTPM>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 12:10:10.

BABRAUSKAS, V., PEACOCK, R.D. “Heat release rate: the single most important variable in fire hazard”, *Fire Safety Journal*, v.18, pp. 255-272, 1992.

BABRAUSKAS, V. “Engineering Variables to Replace the Concept of ‘Noncombustibility’”, *Fire Technology*, v.53, pp. 353–373, 2017.

BAINS, R. S., CUSACK, P. A., MONK, A. W. “A comparison of the fire-retardant properties of zinc hydroxystannate and antimony trioxide in brominated polyester resins containing inorganic fillers”, *Europe. Polymer. Journal*, v.26, n.11, pp.1221-1227, 1990.

BANNISTER, M. “Challenges for composites into the next millennium, a reinforcement perspective”, *Composites* 32 (a), pp. 901-910, 2001.

BP. *Informação atualizada sobre a indústria do plástico*: Catálogos, 2016. Disponível em: <https://blogdoplastico.wordpress.com/2016/01/11/laboratorio-da-uerj-e-montado-com-paineis-pultrudados-pre-fabricados/>. Acesso em: 10 jan. 2018, 12:10:10.

BANK, L. C. (2006). "Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials", *John Wiley and Sons*, Chichester, West Sussex, UK, 2006.

BORGES, S.G., 2004, *Síntese e caracterização de resinas fenólicas líquidas do tipo novolaca aplicáveis no processo de pultrusão*. Dissertação de M. Sc., PPGEM, Porto Alegre, RS, Brasil.

BOURBIGOT, S., CASETTAA, M., MICHAUXA, G., OHLB, B., DUQUESNEA, S. “Key role of magnesium hydroxide surface treatment in the flame retardancy of glass fiber reinforced polyamide 6”, *Polymer degradation stability*, v.148, pp. 95-103, 2018.

BROUTMAN, L.J., *Modern Composite Materials*. Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

BROWN, J.R., MATHYS, Z. “Reinforcement and matrix effects on the combustion properties of glass reinforced polymer composites”, *Elsevier’s Science and Technology - Composites PartA*, v.8, pp. 675-681, 1997.

BURCHILL, P. J., MATHYS, Z., GARDINER, C.P. “An analysis of the burning of polyester and vinylester fibre glass composites”, *Fire and Materials*, v.29, pp. 249-264, 2005.

CAMINO, G., LEVCHIK, S. V., COSTA, L., LEVCHIK, G. F. “Mechanism of action of phosphorus-based flame retardants in nylon 6. I. Ammonium polyphosphate”, *Fire and materials*, v.19, pp.133-142, 1995.

CANEVAROLO, J.S.V. “Técnicas de Caracterização de Polímeros”, São Paulo: Artliber, pp.488, 2004.

COGUMELO S/A. *Produtos pultrudados e injetados em fibra de vidro: Catálogos*, 2017. Disponível em: <<http://cogumelo.com.br/links-uteis/catalogos.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 12:10:10.

COSTA, N.P.A., 2013, *Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito*. Dissertação de M.Sc., UFAM, Manaus, Amazonas, Brasil.

COSTA, C. N., SILVA, V. P. “Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais”. In: *V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto*. Anais. São Paulo: EPUSP, 2003.

CORREIA, J.R. *GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour*. PhD thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, 2008.

CORREIA, J.R., BRANCO, F.A., FERREIRA, J.G. “The effect of different passive fire protection systems on the fire reaction properties of GFRP pultruded profiles for civil construction”, *Elsevier’s Science and Technology - Composites: Part A*, v.41, pp. 441-452, 2010.

CORREIA, J.R., BRANCO, F.A., FERREIRA, J.G., BAI, Y., KELLER, T. “Fire protection systems for building floors made of pultruded GFRP profiles Part 1: Experimental investigations”, *Elsevier’s Science and Technology - Composites: Part B*, v.41, pp. 617-629, 2010.

CORREIA, J.R., BAI, Y., KELLER, T. “A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications”, *Elsevier’s Science and Technology - Composite Structures*, v.127, pp. 267-287, 2015.

CUSACK, P. A., HEER, M. S., MONK, A. W. “Zinc hydroxystannate as an alternative synergist to antimony trioxide in polyester resins containing halogenated flame retardants”, *Elsevier’s Science and Technology - Polymer Degradation and Stability* v.58, pp. 229-237, 1997.

DANIEL, I.M., ISHA, O. “Engineering Mechanics of Composite Materials”, *Oxford University Press Company*, 1994.

EGGLESTONE, G. T., TURLEY, D. M. “Flammability of GRP for Use in Ship Superstructures”, *Fire and materials*, v.18, pp. 255-260, 1994.

EUROCOMP DESIGN CODE AND HANDBOOK. *Structural Design of Polymer Composites*, Edited by John L. Clark. London: Chapman e hall, 1996.

FRANCHINI, C., MESSORI, M., ORI, G., SILIGARDI, C. “Flame retardant SBS-clay nanocomposites”, In: *Cambridge: Cambridge Books online: University Cambridge*, c.4, pp. 360-382, 2011.

GALLO, J.B., AGNELLI J.A.M. “Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. v.8, pp.23-37, 1998.

GAZETA. *Ponte para o futuro: Jornal*, 2009. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/mundo/ponte-para-o-futuro-byvzxsuzuye6t7b5wj96671vy/>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 12:10:10.

G1 – O portal de notícias da Globo. *Tragédia em Santa Maria: Jornal*, 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/tragedia-incendio-boate-santa-maria/platb/>>. Acesso em: 06 jul. 2017, 10:25:16.

G1 – O portal de notícias da Globo. *Prédio de 24 andares pega fogo em Londres: Jornal*, 2017. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/predio-de-24-andares-pegafogo-em-londres.ghTPM>>. Acesso em: 21 abr. de 2017, 10:25:16.

HAKKARAINEN, T. “Rate of Heat Release and Ignitability Indices in Predicting SBI Test Results”, *Journal of Fire Sciences*, v. 19, 2001.

HSHIEH, F.Y., BEESON, H.D. “Flammability Testing of Flame-retarded Epoxy Composites and Phenolic Composites”, *Fire and materials*, v. 21, pp. 41-49, 1997.

HIRSCHLER, M.M., TSIKA, O. “The effect of combinations of aluminium (III) oxides and decabromobiphenyl on the flammability of and smoke production from acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer”, *Europe Polymer J.* Vol 19, no.5, pp. 375-380, 1983.

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)*. ISO; 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 13927. *Plastics - Simple heat release test using a conical radiant heater and a thermopile*. ISO; 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 4589-2. *Plastics- Determination of Burning Behaviour by Oxygen Index- Part 2: Ambient-Temperature Test*. Geneva, 1996.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 60695-2-10. *Fire Hazard Testing- Part 2-10: Glowing/Hot -Wire Based Test Methods- Glow-Wire Ignitability Test Method for Materials*. Geneva: 2000.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 60695-2-12. *Fire Hazard Testing- Part 2-12: Glowing/Hot -Wire Based Test Methods- Glow-Wire Ignitability Test Method for Materials*. Geneva: 2000.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 60695-2-13. *Fire Hazard Testing- Part 2-13: Glowing/Hot -Wire Based Test Methods- Glow-Wire Ignitability Test Method for Materials*. Geneva: 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 17554. *Reaction to fire tests -- Mass loss measurement*. 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 13927. *Plastics -- Simple heat release test using a conical radiant heater and a thermopile detector*. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 11357. *Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 1: general principles*. Genève: 1997.

JUNHYUN, K., JEON, H.L., SUMIN, K. “Estimating the fire behavior of wood flooring using a cone calorimeter”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v.110, pp.677-683, 2012.

KHALILI, P., TSHAI, K.Y., HUI, D., KONG, I. “Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite”, *Composites Part B*, v.114, pp. 101–110, 2017.

LAU, D., QIU, Q., ZHOU, A., CHOW, C.L. “Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures”, *Construction and Building Materials* 126, pp. 573–585, 2016.

LAOUTID, F., BONNAUD, L., ALEXANDRE, M., LOPEZ, C. J-M., DUBOIS P. “New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites”, *Materials Science and Engineering Review*. n. 63, 2009, pp. 100-125.

LEWIN, M. “Physical and Chemical Mechanisms of Retarding of Polymers”. In: *Fire Retardancy of Polymers: the use of Intumescence*. Londres: The Royal Society of Chemistry, pp.3-32, 1998.

MARTINS, L.M.; MARTINS B., 2011, *Manual control of quality and durability of structures in GFRP*. M.Sc. Dissertation, Lisboa; Instituto Superior Técnico.

MITCHELL, B. S. “An Introduction to Materials Engineering and Science for Chemical and Materials Engineers”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2004.

MORGAN, A. B., GILMAN, J. W. “An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions”, *Fire and materials*, v.37, pp. 259–279, 2016.

MOSALLAM, A. S., BAYRAKTAR, A., ELMIKAWI, S. P., ADANUR, S. “Polymer Composites in Construction: An Overview”, *SOJ/Materials Science & Engineering*, 2014.

MOURITZ, A.P., MATHYS, Z. “Post-fire mechanical properties of glass-reinforced polyester composites”, *Compos Sci Technol*, v. 61, pp. 475–90, 2001.

MOURITZ, A.P., MATHYS, A., GIBSON, A.G. “Heat release of polymer composites in fire”, *Elsevier’s Science and Technology- Composites Part A*, v.37, pp.1040–1054, 2006.

MOURITZ, A.P., GIBSON, A.G. “Fire Properties of Polymer Composite Materials”, *New York: Springer*, cap.3, pp.59-101, 2006.

NGO, T. D., NGUYEN, Q. T., NGUYEN, P. T., TRAN, P. “Effect of Nanoclay on Thermomechanical Properties of Epoxy/Glass Fibre Composites”, *Arab J Sci Eng*, v.41, pp.1251–1261, 2016.

NGO, T. D., NGUYEN, Q. T., TRAN, P. “Heat release and flame propagation in prefabricated modular unit with GFRP composite facades”, *Build simul*, v. 9, pp. 607–616, 2016.

NGUYEN, Q. T., NGO, T., MENDIS, P., TRAN, P. “Composite Materials for Next Generation Building Façade Systems”, *Civil Engineering and Architecture*, v.1, pp. 88-95, 2013.

NGUYEN, Q. T., TRAN, P., NGO, T. D., MENDIS, P. “Experimental and computational investigations on fire resistance of GFRP composite for building façade”, *Elsevier’s Science and Technology - Composites Part B*, v.62, pp.218–229, 2014.

NGUYEN, Q. T., NGO, T. D., TRAN, P. A., MENDIS, P., ZOBEC, M., AYE, L. “Fire performance of prefabricated modular units using organoclay/glass fibre reinforced polymer composite” *Elsevier’s Science and Technology - Construction and Building Materials*, v.129, pp.204–215, 2016.

NGUYEN, Q. T., NGO, T. D., BAI, Y., TRAN, P. A. “Experimental and numerical investigations on the thermal response of multilayer glass fibre/unsaturated polyester/organoclay composite”, *Fire and materials*, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/fam.2364, 2016.

OHLEMILLER, T.J., SHIELDS, J.R. “The effect of surface coating on fire growth over composite materials in a corner configuration”, *Fire Safety Journal*, v.32, pp. 173–193, 1999.

PEREIRA, C.M.C., HERRERO, M., LABAJOS, F.M., MARQUES, A.T., RIVES, V. “Preparation and properties of new flame retardant unsaturated polyester nanocomposites based on layered double hydroxides”, *Polymer Degradation and Stability*, v.94, pp. 939–946, 2009.

RIBEIRO, L. M., LADCHUMANANANDASIVAM, R., GALVÃO, A. O., BELARMINO, D. D. “Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf)”, *HOLOS*, Ano 29, Vol 1, 2013.

RIBEIRO, S.P.S., 2012, *Ação sinérgica de aluminossilicatos na retardância de chama de nanocompósitos poliméricos intumescentes*, Tese de Doutorado, Instituto de Química, UFRJ, Rio de Janeiro.

ROCHA, M. A. F., LANDESMANN, A. “Combustion properties of Brazilian natural wood species”, *Fire and Materials*, v.40, pp. 219–228, 2015.

ROTHON, R. N. “Mineral Fillers in thermoplastics”. *Filler manufacture and characterization*, v.139, pp.67-107, 1999.

SANTOS, G. M., GOMES C. A., ARAKAK F. K. “Análise da Propriedade Mecânicas de Tração e Compressão em Perfis Estruturais Pultrudados em Fibra de Vidro e Resina Termofixa”, In *XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação* – Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

SCUDAMORE, M.J. “Fire performance studies on glass-reinforced plastic laminates”, *Fire Material*, v.18, pp.313–325, 1994.

SERUTI, C. A., 2013, *Caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados*, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SIQUEIRA, B. G. LEILA L. Y. VISCONTE, REGINA C. R. N. “Propriedades mecânicas e resistência à chama de composições SBR/negro de fumo/ hidróxido de alumínio”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. v. 11, n. 2, pp. 89-93, 2001.

SOUZA, F. S., 2017, *Influência de Temperaturas Elevadas no Comportamento à Flexão de Compósitos Poliméricos Pultrudados Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV)*, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil.

UNDERWRITERS' LABORATORIES. *Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances- UL-94*. Northbrook, 2003.

WÅHLIN. *Cable-Stayed Bridges of Europe: A Pictorial*, 2011. Disponível em: <[www.pwpei.cs.se](http://www.pwpei.cs.se)>. Acesso em: 10 julho. 2017, 15:30:41.

WANGA, X., KALALIA, E. N., WANA, J., WANGA, D. “Carbon-family materials for flame retardant polymeric materials”, *Progress in Polymer Science*, v.69, pp. 22–46, 2017.

WILKIE, C.A., MORGAN, A.B., “Retardancy of Polymeric Materials”. USA: CRC Press, 2 ed., p.853 2009.

WIKIPEDIA. *Incêndio no Museu Nacional do Brasil em 2018*: Enciclopédia, 2018. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Inc%C3%AAndio\\_no\\_Museu\\_Nacional\\_do\\_Brasil\\_em\\_2018](https://pt.wikipedia.org/wiki/Inc%C3%AAndio_no_Museu_Nacional_do_Brasil_em_2018)>. Acesso em: 17 de setembro de 2018, 09:45:35;

ZHANG, L., BAI, Y., CHEN, W., DING, F., FANG, H. “Thermal performance of modular GFRP multicellular structures assembled with fire resistant panels”, *Elsevier’s Science and Technology - Composite Structures*, v.172, pp. 22–33, 2017.

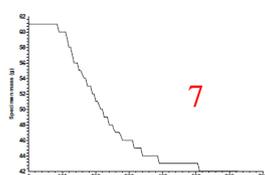
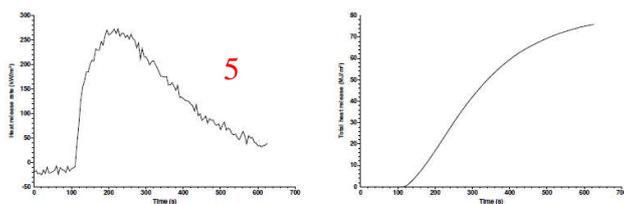
ZHANG, J., DELICHATSIOS, M. “Further Validation of a Numerical Model for Prediction of Pyrolysis of Polymer Nanocomposites in the Cone Calorimeter”, *Fire Technology*, v.46, pp. 307–319, 2010.



## Anexo A: resultados de medições experimentais com CCPM

Este anexo traz todos os resultados experimentais obtidos pelo CCPM no curso da campanha experimental desenvolvida. Abaixo segue um modelo explicando como se apresenta o relatório emitido pelo equipamento. Os relatórios obedecem a ordem das amostras tratadas na Tabela 4.1, ou seja, V, VA, VB, VAB, P, PA, PB, PAB, PBC1, PBC2, PABC1, PABC2, PA1, PA2, PA3, PA4 e F.

<b>Specimen information</b> Thickness 5 mm Initial mass 61.1 g Surface area 98.78 cm <sup>2</sup> Conditioned? No Temperature N/A RH N/A		Specimen number Manufacturer Sponsor Edge frame used? Yes Fixed to substrate? No Substrate N/A		1																
<b>Test</b> Standard used ISO 13927 Date of test 12 July 2016 Time of test 11:51 Date of report 12 July 2016 Sampling interval 5 s		Heat flux 50 kW/m <sup>2</sup> Separation 25 mm HRR Calibration filename C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN Gradient 0.766518 mV/kW Intercept 0 kW		2																
<b>Test times</b> Time to ignition 110 s Time to flameout 512 s End of test time (for calculations) 512 s		<b>Test results (between 0 and 512 s)</b> Total heat release 70.1 MJ/m <sup>2</sup> Initial mass 61.1 g Mass at EOT 42.0 g Mass lost 19.1 g Specific mass lost 1.93 kg/m <sup>2</sup> Percentage mass lost 31.2 %		3																
<b>Test results (between 110 and 512 s)</b> Total heat release 70.1 MJ/m <sup>2</sup> Mass at sustained flaming 60.0 g Mass at EOT 42.0 g Mass lost 18.0 g Specific mass lost 1.82 kg/m <sup>2</sup> Percentage mass lost 30.0 % Average specific MFR 6.48 g/(m <sup>2</sup> ·s)		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mean</th> <th>Peak</th> <th>at time (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Heat release rate (kW/m<sup>2</sup>)</td> <td>174.07</td> <td>273.05</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>Effective heat of comb. (MJ/kg)</td> <td>38.70</td> <td>70.62</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>Mass loss rate (g/s)</td> <td>0.044</td> <td>0.235</td> <td>130</td> </tr> </tbody> </table>			Mean	Peak	at time (s)	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	174.07	273.05	225	Effective heat of comb. (MJ/kg)	38.70	70.62	215	Mass loss rate (g/s)	0.044	0.235	130	4
	Mean	Peak	at time (s)																	
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	174.07	273.05	225																	
Effective heat of comb. (MJ/kg)	38.70	70.62	215																	
Mass loss rate (g/s)	0.044	0.235	130																	
<b>Test averages</b> from ignition to ignition plus... 180 s 300 s Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> ) 221.50 202.54 Effective heat of comb. (MJ/kg) 28.12 35.31 Mass loss rate (g/s) 0.077 0.056																				



- 1 – Dados de entrada como: espessura, massa, área da superfície, condicionamento, temperatura e umidade da amostra.
- 2 – Informações sobre o ensaio como: norma utilizada, data e hora do ensaio, intervalo de aquisição de dados, fluxo utilizado, espaçamento entre a amostra e aquecedor, nome do arquivo gerado e gradiente utilizado.
- 3 – Resultados obtidos como: tempo de ignição (*time to Ignition*), tempo de combustão (*time to flameout*), calor total liberado (*total heat release*), massa inicial, massa final, massa perdida, massa específica perdida e porcentagem de massa perdida (*total mass lost*).
- 4 – Resultados obtidos após ignição como: calor total liberado, massa, massa final, massa perdida, média e massa específica perdida, porcentagem de massa perdida, média, pico e no tempo da taxa de liberação de calor (*heat release rate*), do calor efetivo de combustão e da taxa de perda de massa. Além disso, entre os tempos de 180 e 300 segundos, a taxa de liberação de calor, do calor efetivo de combustão e da taxa de perda de massa.
- 5 – Gráfico da taxa de liberação de calor ( $\text{kW/m}^2$ ) em função do tempo decorrido do ensaio.
- 6 – Gráfico do calor total liberado em função do tempo decorrido do ensaio.
- 7 – Gráfico da perda de massa em função do tempo decorrido do ensaio.

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	61.1 g	Manufacturer	
Surface area	98.78 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:51	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	110 s
Time to flameout	512 s
End of test time (for calculations)	512 s

### Test results (between 0 and 512 s)

Total heat release	70.1 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	61.1 g
Mass at EOT	42.0 g
Mass lost	19.1 g
Specific mass lost	1.93 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	31.2 %

### Test results (between 110 and 512 s)

Total heat release	70.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	60.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	174.07	273.05	225
Mass at EOT	42.0 g	Mass loss rate (g/s)	38.70	70.62	215
Mass lost	18.0 g		0.044	0.235	130
Specific mass lost	1.82 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	30.0 %				
Average specific MIR	6.48 s/(m <sup>2</sup> ·s)				

### Test averages

from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	221.50	202.54
Effective heat of comb. (MJ/kg)	28.12	35.31
Mass loss rate (g/s)	0.077	0.056

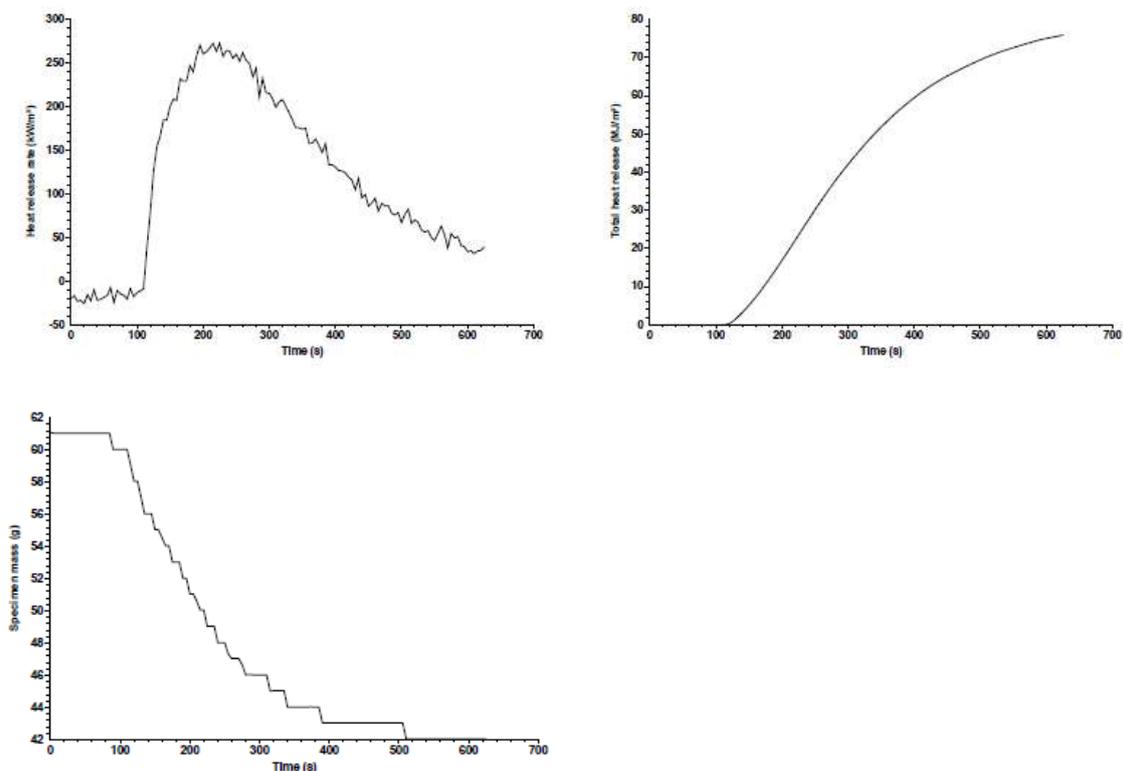


Figura A1: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra V-1.

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	62.1 g	Manufacturer	
Surface area	98.93 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:12	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	132 s
Time to flameout	533 s
End of test time (for calculations)	533 s

### Test results (between 0 and 533 s)

Total heat release	68.2 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	62.1 g
Mass at EOT	42.0 g
Mass lost	20.1 g
Specific mass lost	2.03 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	32.3 %

### Test results (between 132 and 533 s)

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	68.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	171.52	255.25	215
Mass at sustained flaming	59.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	39.88	42.96	245
Mass at EOT	42.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.042	0.118	240
Mass lost	17.0 g				
Specific mass lost	1.72 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	28.8 %				
Average specific MIR	6.88 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> )		212.92	195.25
Effective heat of comb. (MJ/kg)		29.12	36.19
Mass loss rate (g/s)		0.071	0.053

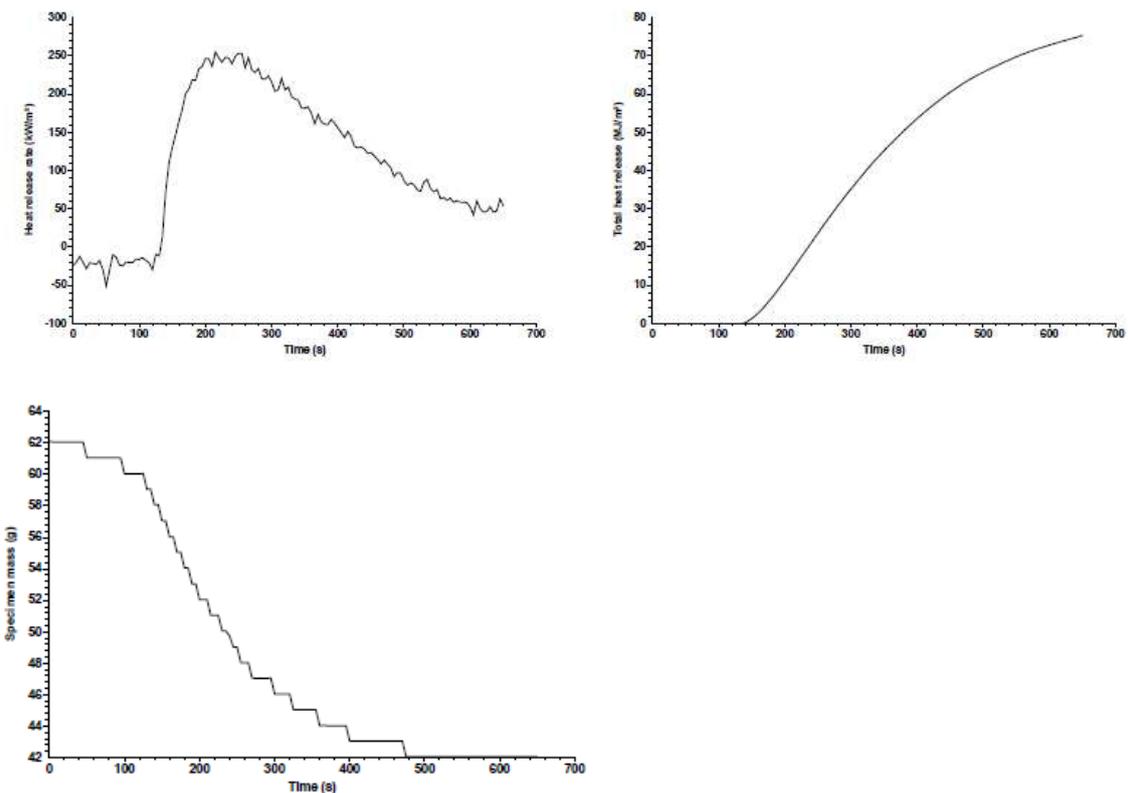


Figura A2: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra V-2.

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	62.1 g	Manufacturer	
Surface area	99.46 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:32	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	141 s
Time to flameout	565 s
End of test time (for calculations)	565 s

### Test results (between 0 and 565 s)

Total heat release	56.9 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	62.1 g
Mass at EOT	43.0 g
Mass lost	19.1 g
Specific mass lost	1.92 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	30.7 %

### Test results (between 141 and 565 s)

Total heat release	56.9 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	59.1 g		135.41	237.55	240
Mass at EOT	43.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	37.65	21.28	200
Mass lost	16.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.036	0.119	265
Specific mass lost	1.61 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	27.1 %				
Average specific MIR	6.44 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> )	191.88	165.34
Effective heat of comb. (MJ/kg)	28.56	35.16
Mass loss rate (g/s)	0.068	0.048

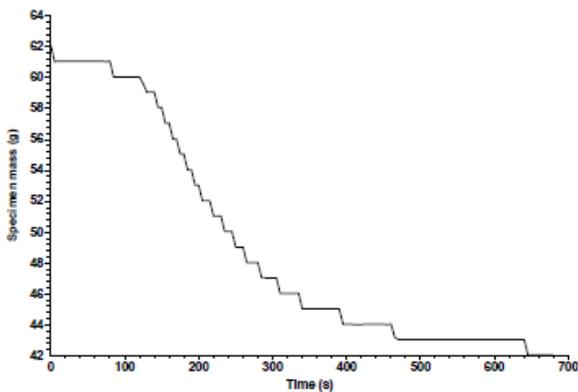
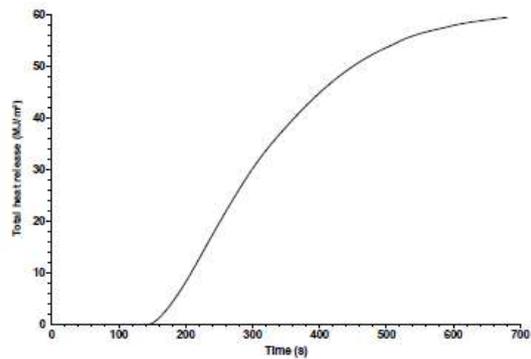
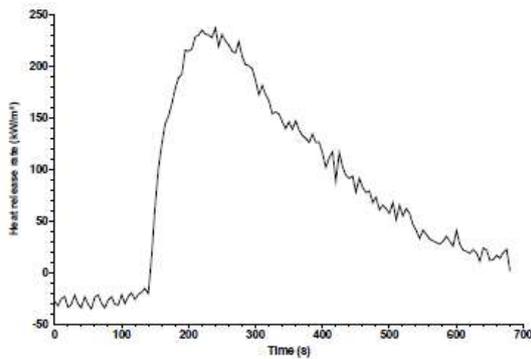


Figura A3: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra V-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	71 g	Manufacturer	
Surface area	99.5 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:19	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	172 s
Time to flameout	649 s
End of test time (for calculations)	649 s

**Test results (between 0 and 649 s)**

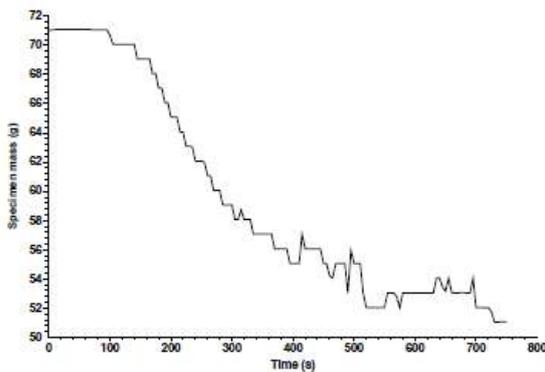
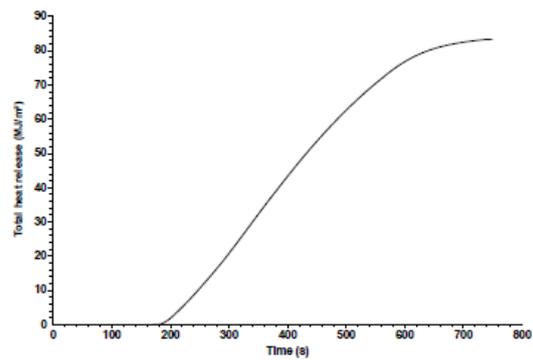
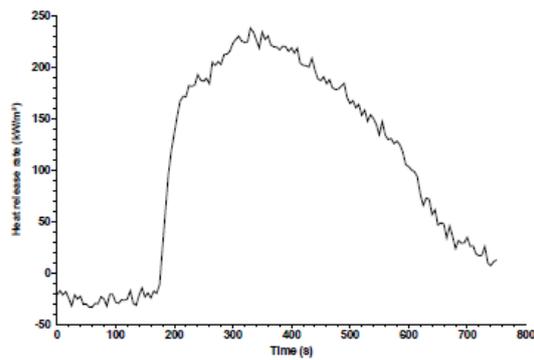
Total heat release	80.3 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	71.0 g
Mass at EOT	53.4 g
Mass lost	17.6 g
Specific mass lost	1.77 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	24.7 %

**Test results (between 172 and 649 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	80.3 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	169.54	238.38	330
Mass at sustained flaming	68.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	53.82	75.28	565
Mass at EOT	53.4 g	Mass loss rate (g/s)	0.030	0.352	515
Mass lost	14.6 g				
Specific mass lost	1.47 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	21.5 %				
Average specific MI R	6.19 α/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		185.17	193.76
Effective heat of comb. (MJ/kg)		30.18	44.52
Mass loss rate (g/s)		0.060	0.042



**Figura A4: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VA-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	73 g	Manufacturer	
Surface area	99.7 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	10:57	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	190 s
Time to flameout	631 s
End of test time (for calculations)	631 s

**Test results (between 0 and 631 s)**

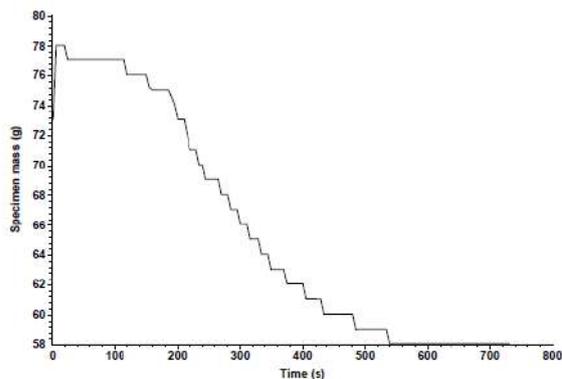
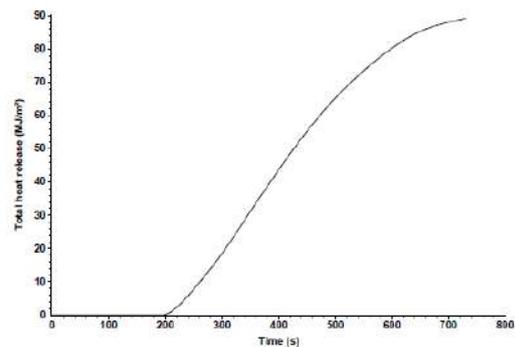
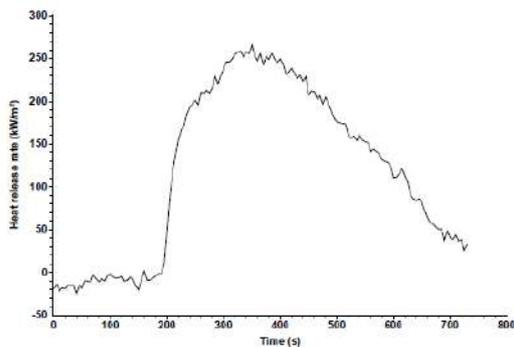
Total heat release	83.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	73.0 g
Mass at EOT	58.1 g
Mass lost	14.9 g
Specific mass lost	1.50 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	20.4 %

**Test results (between 190 and 631 s)**

	Mean	Peak	at time (s)
Total heat release	83.5 MJ/m <sup>2</sup>		
Mass at sustained flaming	74.6 g		
Mass at EOT	58.1 g		
Mass lost	16.5 g		
Specific mass lost	1.66 kg/m <sup>2</sup>		
Percentage mass lost	22.1 %		
Average specific MLR	4.14 g/(m <sup>2</sup> ·s)		
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	188.67	265.22	350
Effective heat of comb. (MJ/kg)	50.67	22.93	350
Mass loss rate (g/s)	0.037	0.233	215

**Test averages**

	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		201.34	211.42
Effective heat of comb. (MJ/kg)		31.34	40.75
Mass loss rate (g/s)		0.065	0.052



**Figura A5: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VA-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	71 g	Manufacturer	
Surface area	99.5 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:37	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	197 s
Time to flameout	663 s
End of test time (for calculations)	663 s

**Test results (between 0 and 663 s)**

Total heat release	77.8 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	71.0 g
Mass at EOT	49.0 g
Mass lost	22.0 g
Specific mass lost	2.21 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	30.9 %

**Test results (between 197 and 663 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	77.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	167.70	238.80	365
Mass at sustained flaming	65.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	48.42	34.39	555
Mass at EOT	49.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.034	0.135	430
Mass lost	16.0 g				
Specific mass lost	1.61 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	24.6 %				
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> )		186.24	194.35
Effective heat of comb. (MJ/kg)		33.32	43.92
Mass loss rate (g/s)		0.054	0.044

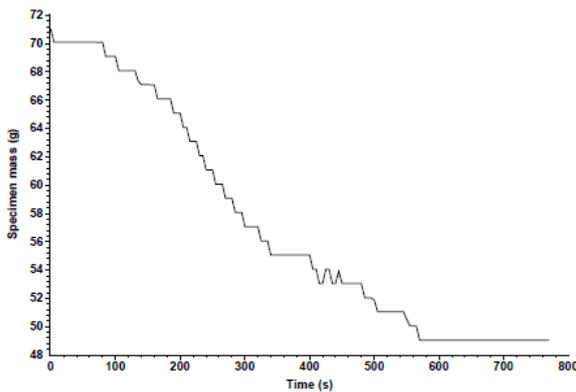
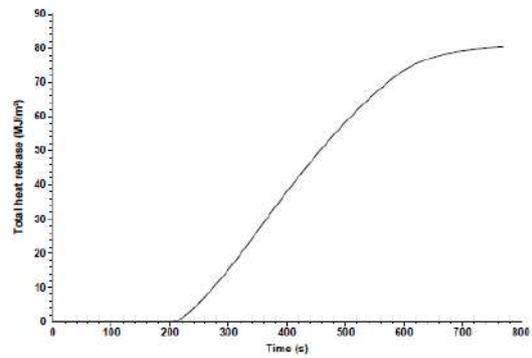
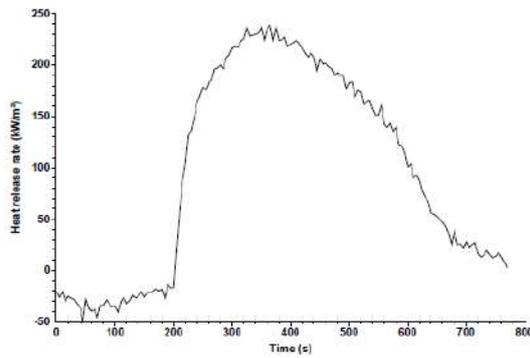


Figura A6: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VA-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	68 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:37	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	127 s
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	680 s

**Test results (between 0 and 680 s)**

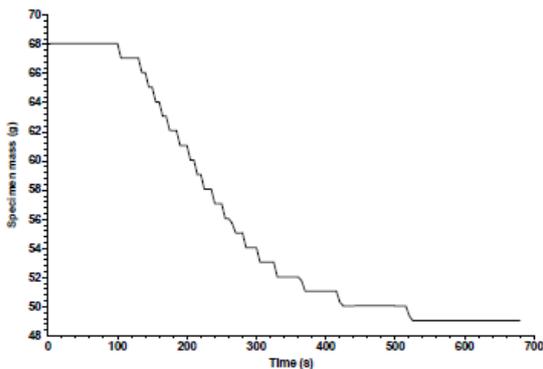
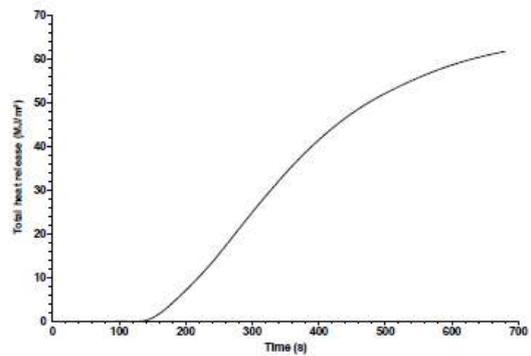
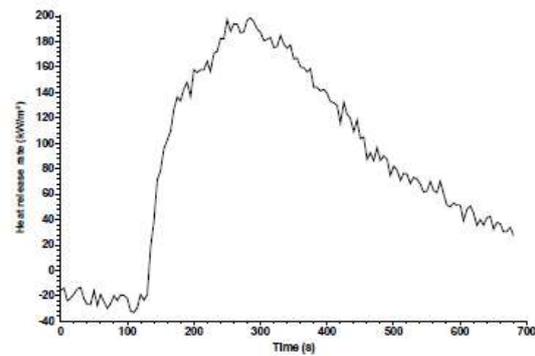
Total heat release	61.8 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	68.0 g
Mass at EOT	49.0 g
Mass lost	19.0 g
Specific mass lost	1.90 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	27.9 %

**Test results (between 127 and 680 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	61.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	112.35	198.31	285
Mass at sustained flaming	67.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	34.28	77.60	360
Mass at EOT	49.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.032	0.118	250
Mass lost	18.0 g				
Specific mass lost	1.80 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	26.9 %				
Average specific MI R	6.27 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	180 s	300 s
from ignition to ignition plus...		
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	149.01	151.34
Effective heat of comb. (MJ/kg)	19.12	26.68
Mass loss rate (g/s)	0.077	0.056



**Figura A7: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VB-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	63 g	Manufacturer	
Surface area	99.15 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:55	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	112 s
Time to flameout	502 s
End of test time (for calculations)	502 s

**Test results (between 0 and 502 s)**

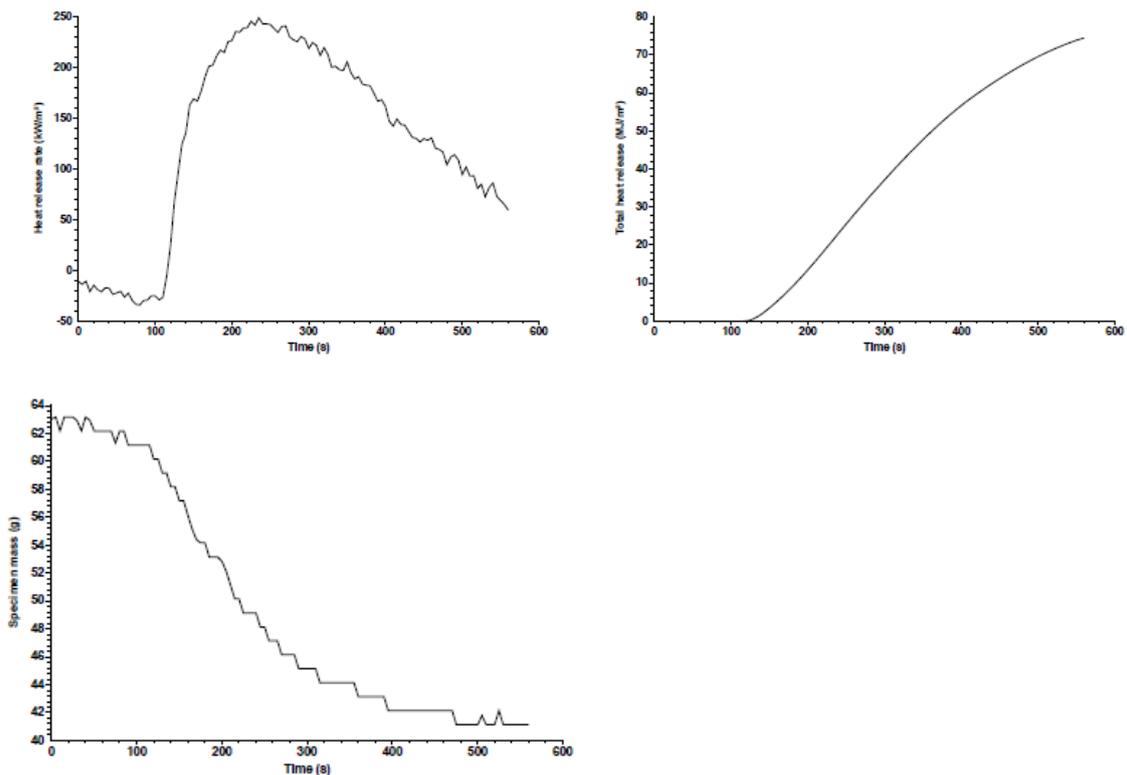
Total heat release	69.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	63.0 g
Mass at EOT	41.1 g
Mass lost	21.9 g
Specific mass lost	2.21 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	34.7 %

**Test results (between 112 and 502 s)**

Total heat release	69.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	61.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	179.69	249.25	235
Mass at EOT	41.1 g	Mass loss rate (g/s)	35.91	28.36	215
Mass lost	20.0 g		0.050	0.221	160
Specific mass lost	2.02 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	32.7 %				
Average specific MI R	8.28 α/(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> )	200.33	196.64
Effective heat of comb. (MJ/kg)	22.34	30.79
Mass loss rate (g/s)	0.088	0.063



**Figura A8: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VB-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	63 g	Manufacturer	
Surface area	98.85 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:10	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	122 s
Time to flameout	513 s
End of test time (for calculations)	513 s

**Test results (between 0 and 513 s)**

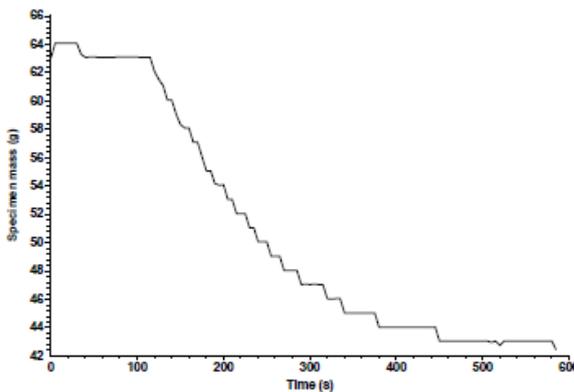
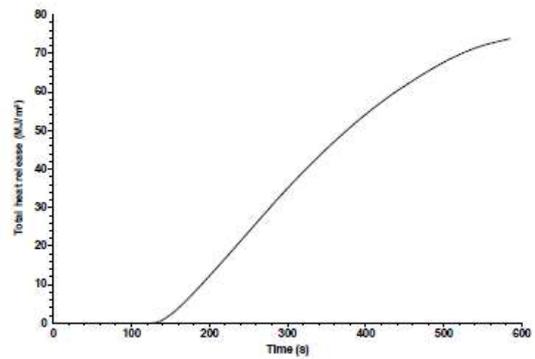
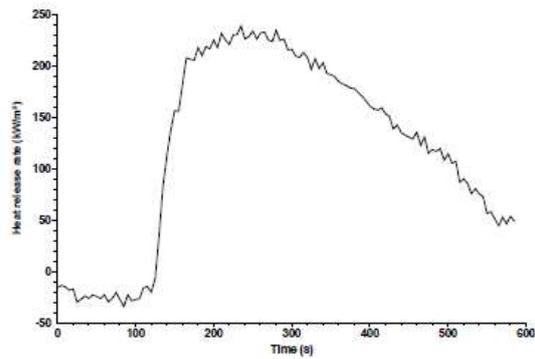
Total heat release	68.8 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	63.0 g
Mass at EOT	43.0 g
Mass lost	20.0 g
Specific mass lost	2.03 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	31.8 %

**Test results (between 122 and 513 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	68.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	177.67	239.36	235
Mass at sustained flaming	62.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	37.13	25.47	180
Mass at EOT	43.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.048	0.233	175
Mass lost	19.1 g				
Specific mass lost	1.93 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	30.8 %				
Average specific MIR	7.36 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> )		200.75	193.81
Effective heat of comb. (MJ/kg)		24.73	32.92
Mass loss rate (g/s)		0.080	0.058



**Figura A9: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VB-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	72 g	Manufacturer	
Surface area	99.9 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:04	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	182 s
Time to flameout	532 s
End of test time (for calculations)	532 s

**Test results (between 0 and 532 s)**

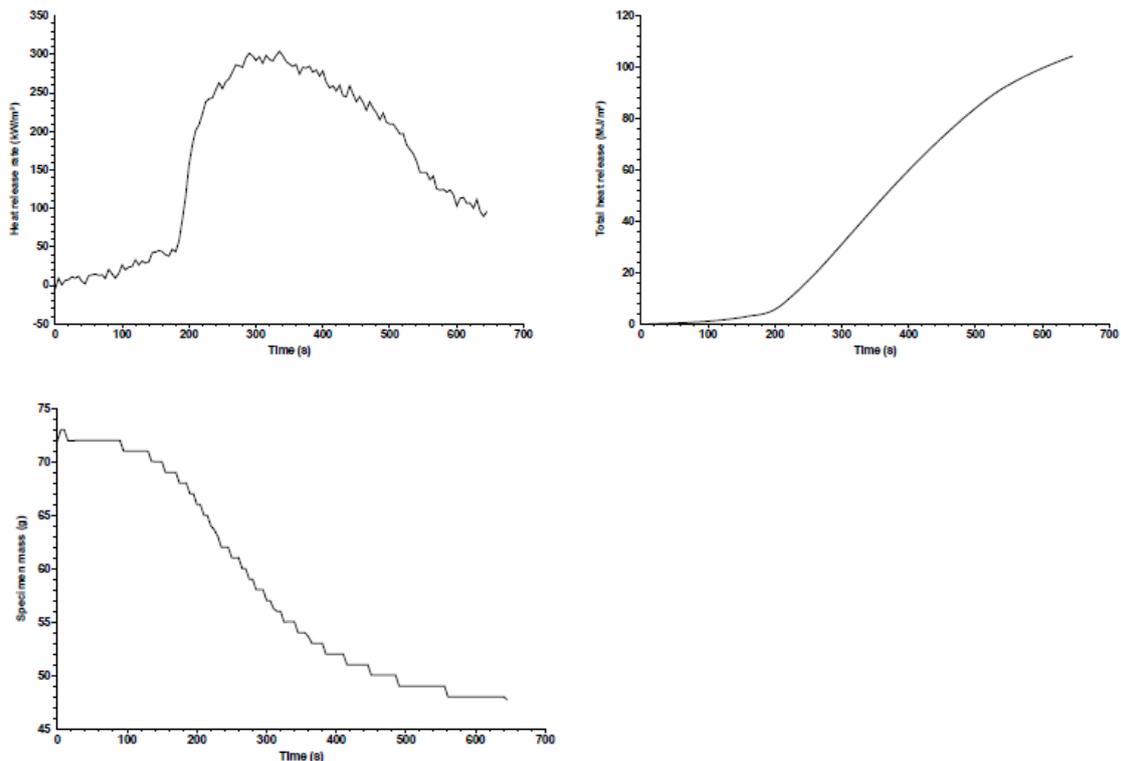
Total heat release	90.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	72.0 g
Mass at EOT	49.0 g
Mass lost	23.0 g
Specific mass lost	2.30 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	31.9 %

**Test results (between 182 and 532 s)**

Total heat release	86.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	68.1 g		247.92	304.16	335
Mass at EOT	49.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	45.58	42.96	305
Mass lost	19.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.054	0.185	230
Specific mass lost	1.90 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	27.9 %				
Average specific MIR	7.43 s/(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> )	255.85	255.80
Effective heat of comb. (MJ/kg)	30.66	42.58
Mass loss rate (g/s)	0.082	0.060



**Figura A10: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VAB-1.**

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	72 g	Manufacturer	
Surface area	99.8 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:20	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	25 November 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	183 s
Time to flameout	550 s
End of test time (for calculations)	550 s

### Test results (between 0 and 550 s)

Total heat release	66.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	72.0 g
Mass at EOT	47.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.50 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	34.7 %

### Test results (between 183 and 550 s)

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	66.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	181.14	240.34	330
Mass at sustained flaming	68.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	31.57	74.90	353
Mass at EOT	47.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.057	0.598	298
Mass lost	21.0 g				
Specific mass lost	2.11 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	30.9 %				
Average specific MI R	8.06 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> )	182.36	189.04
Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.45	28.26
Mass loss rate (g/s)	0.089	0.067

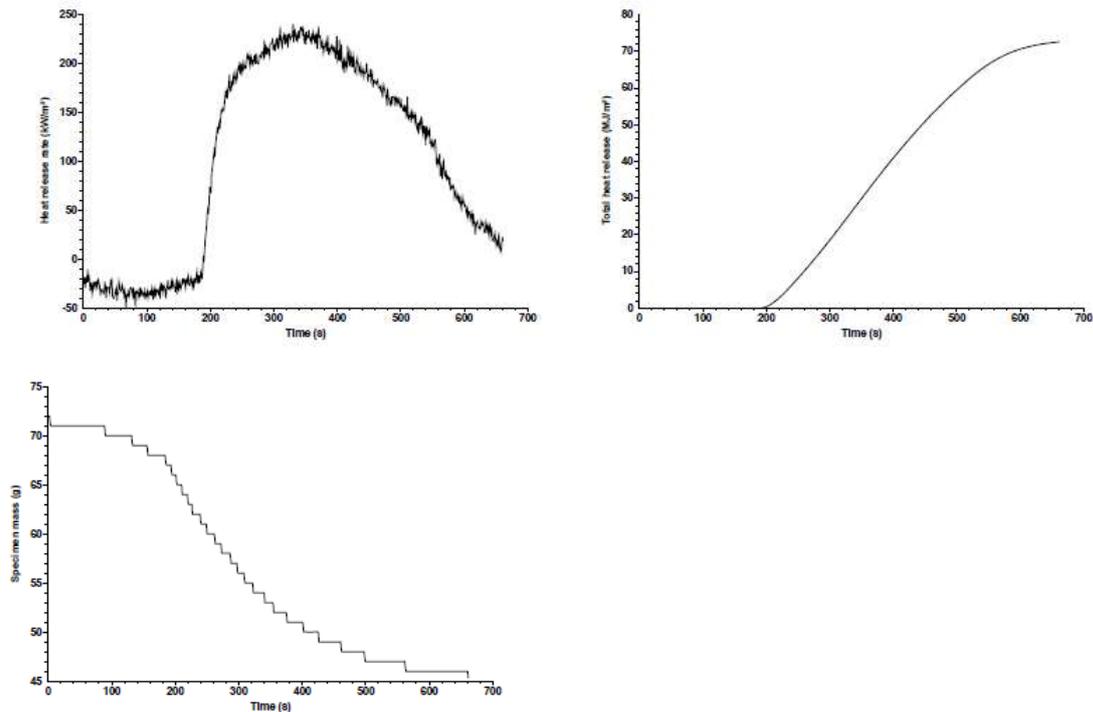


Figura A11: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VAB-2.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	73 g	Manufacturer	
Surface area	99.8 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:38	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	138 s
Time to flameout	573 s
End of test time (for calculations)	573 s

**Test results (between 0 and 573 s)**

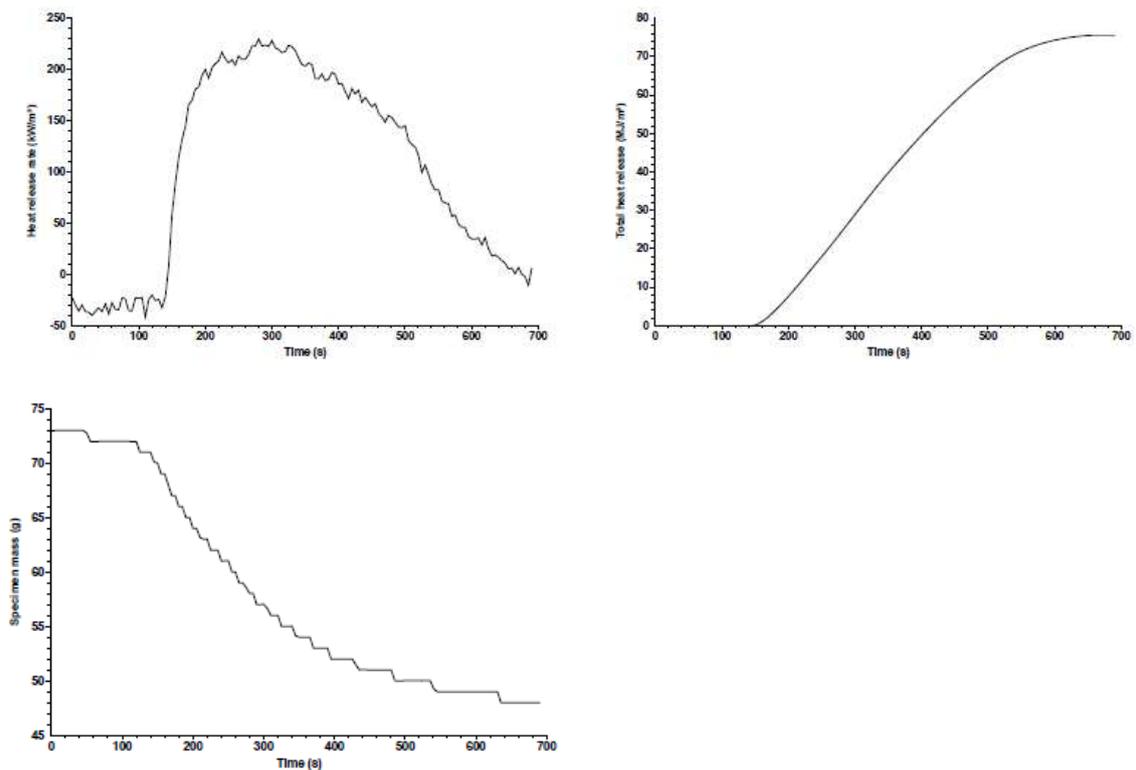
Total heat release	72.9 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	73.0 g
Mass at EOT	49.0 g
Mass lost	24.0 g
Specific mass lost	2.40 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	32.8 %

**Test results (between 138 and 573 s)**

Total heat release	72.9 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	71.1 g		168.01	229.77	280
Mass at EOT	49.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	33.12	69.54	300
Mass lost	22.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.050	0.233	165
Specific mass lost	2.21 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	31.0 %				
Average specific MIR	7.85 s/(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> )	185.17	188.89
Effective heat of comb. (MJ/kg)	22.16	28.28
Mass loss rate (g/s)	0.084	0.066



**Figura A12: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra VAB-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	66 g	Manufacturer	
Surface area	98.38 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:27	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	111 s
Time to flameout	610 s
End of test time (for calculations)	610 s

**Test results (between 0 and 610 s)**

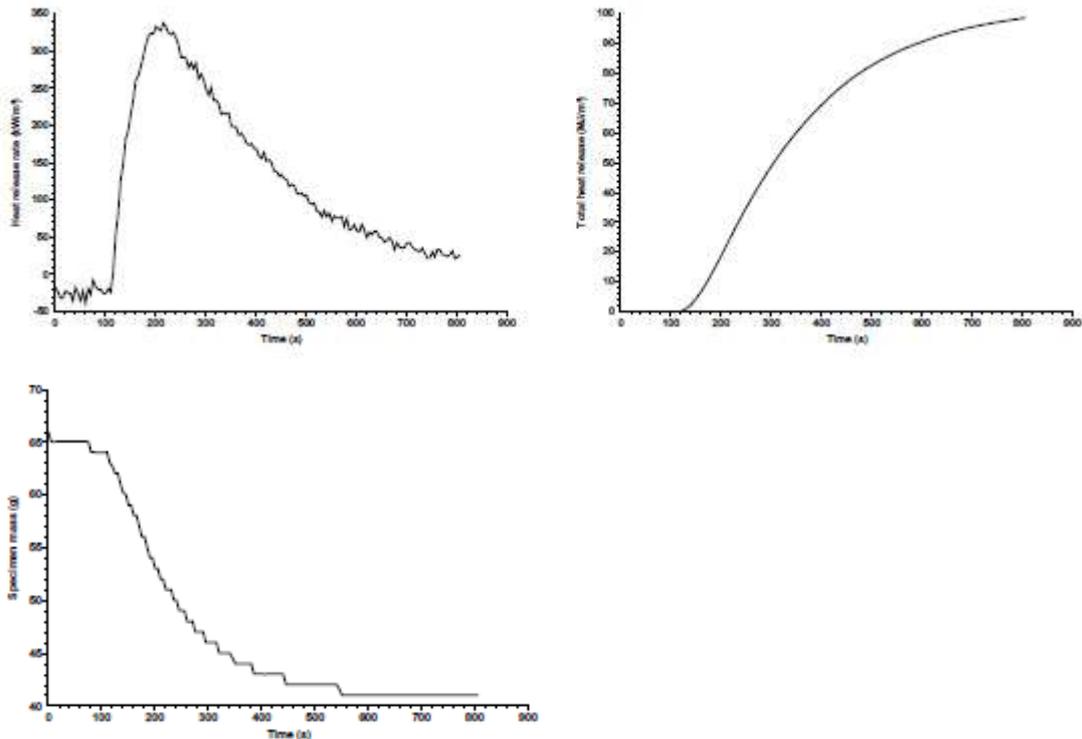
Total heat release	91.3 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	66.0 g
Mass at EOT	41.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.54 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	37.8 %

**Test results (between 111 and 610 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	91.3 MJ/m <sup>2</sup>				
Mass at sustained flaming	64.0 g				
Mass at EOT	41.0 g				
Mass lost	23.0 g				
Specific mass lost	2.34 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	35.9 %				
Average specific MLR	9.13 g/(m <sup>2</sup> ·s)				
		Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	184.39	337.59	215
		Effective heat of comb. (MJ/kg)	40.77	41.89	340
		Mass loss rate (g/s)	0.045	0.236	170

**Test averages**

	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		264.69	239.67
Effective heat of comb. (MJ/kg)		27.54	35.35
Mass loss rate (g/s)		0.094	0.067



**Figura A13: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra P-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	66 g	Manufacturer	
Surface area	99.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:49	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	134 s
Time to flameout	665 s
End of test time (for calculations)	665 s

**Test results (between 0 and 665 s)**

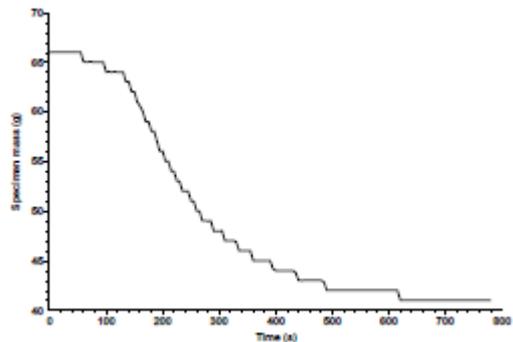
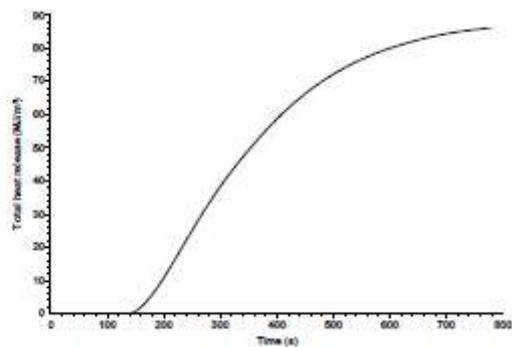
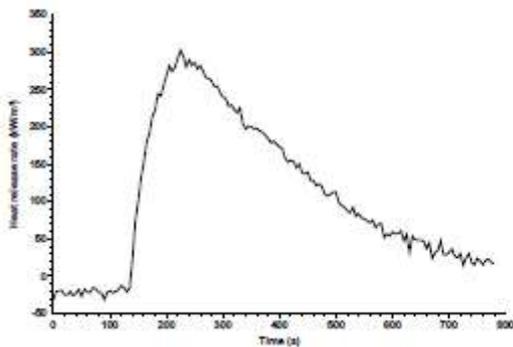
Total heat release	83.1 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	66.0 g
Mass at EOT	41.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.51 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	37.8 %

**Test results (between 134 and 665 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	83.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	156.80	302.76	225
Mass at sustained flaming	64.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	37.51	30.08	195
Mass at EOT	41.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.042	0.236	190
Mass lost	23.0 g				
Specific mass lost	2.32 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	35.9 %				
Average specific MLR	8.23 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

from ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	232.12	213.65
Effective heat of comb. (MJ/kg)	25.94	33.15
Mass loss rate (g/s)	0.091	0.065



**Figura A14: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra P-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	66 g	Manufacturer	
Surface area	98.75 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	16:10	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	99 s
Time to flameout	656 s
End of test time (for calculations)	656 s

**Test results (between 0 and 656 s)**

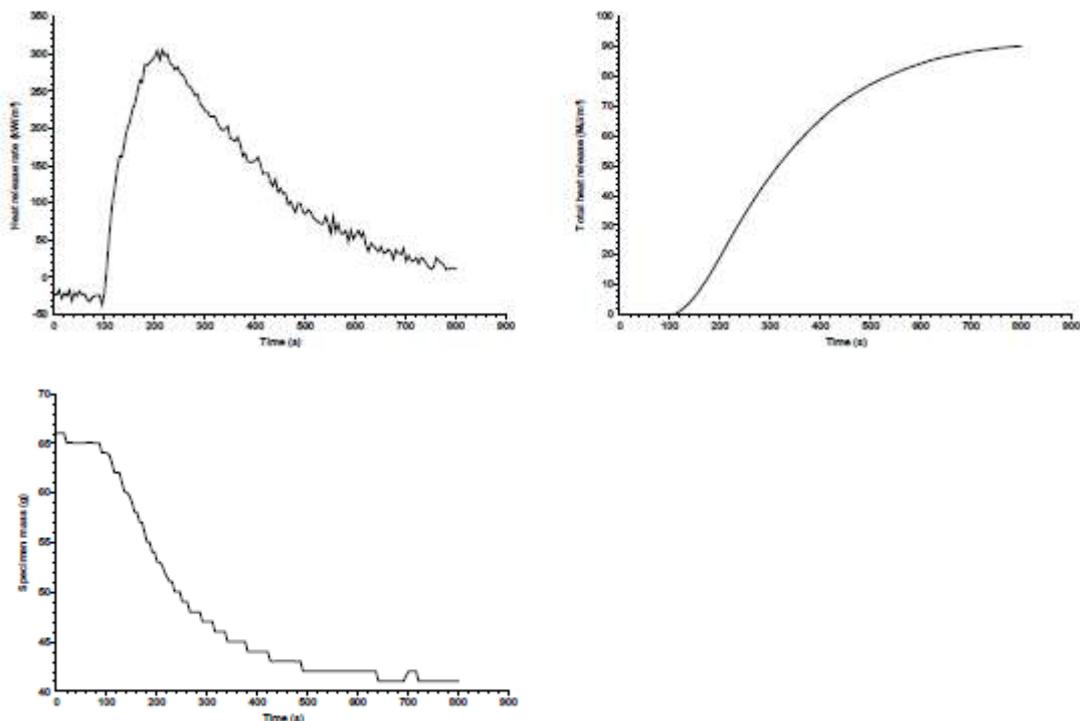
Total heat release	86.9 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	66.0 g
Mass at EOT	41.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.53 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	37.8 %

**Test results (between 99 and 656 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	86.9 MJ/m <sup>2</sup>				
Mass at sustained flaming	64.1 g				
Mass at EOT	41.0 g				
Mass lost	23.0 g				
Specific mass lost	2.33 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	35.9 %				
Average specific MLR	8.11 g/(m <sup>2</sup> ·s)				
		Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	155.30	305.27	215
		Effective heat of comb. (MJ/kg)	37.31	65.15	140
		Mass loss rate (g/s)	0.041	0.233	175

**Test averages**

	from ignition to ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		232.39	218.23
Effective heat of comb. (MJ/kg)		25.78	32.29
Mass loss rate (g/s)		0.089	0.067



**Figura A15: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra P-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	78 g	Manufacturer	
Surface area	99.8 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:56	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	158 s
Time to flameout	731 s
End of test time (for calculations)	731 s

**Test results (between 0 and 731 s)**

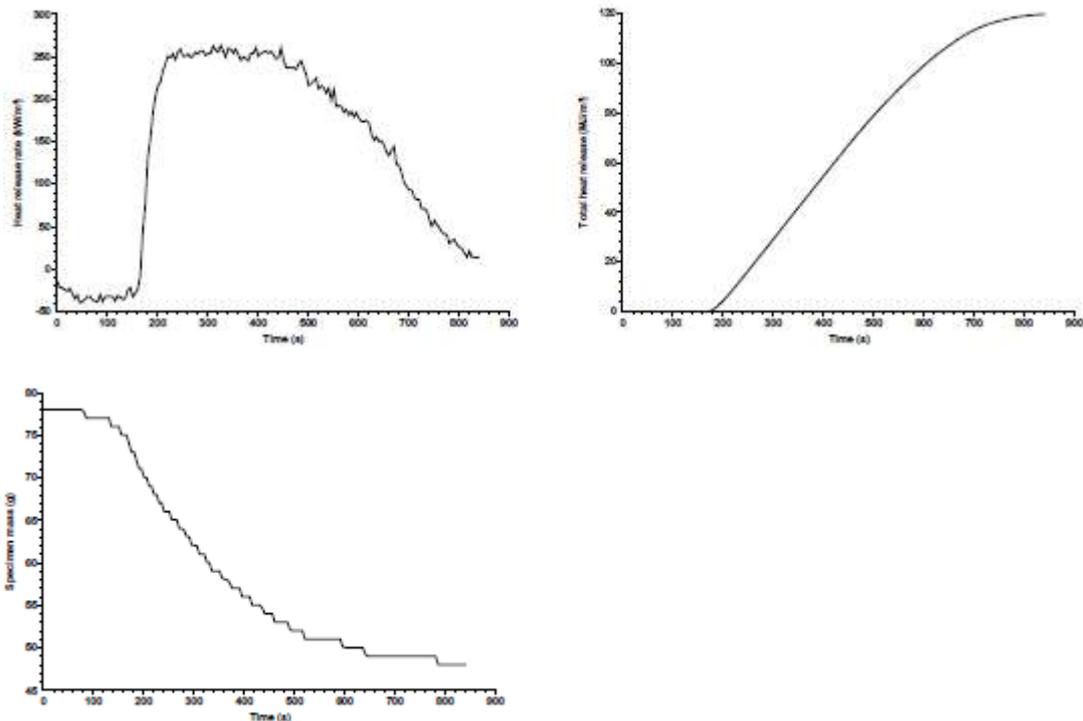
Total heat release	116.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	78.0 g
Mass at EOT	49.0 g
Mass lost	29.0 g
Specific mass lost	2.90 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	37.1 %

**Test results (between 158 and 731 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	116.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	202.15	263.21	325
Mass at sustained flaming	75.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	44.59	76.24	365
Mass at EOT	49.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.045	0.234	170
Mass lost	26.0 g				
Specific mass lost	2.61 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	34.7 %				
Average specific MLR	7.32 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> )		219.33	232.27
Effective heat of comb. (MJ/kg)		24.63	31.59
Mass loss rate (g/s)		0.089	0.073



**Figura A16: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	78 g	Manufacturer	
Surface area	99.9 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:15	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	116 s
Time to flameout	710 s
End of test time (for calculations)	710 s

**Test results (between 0 and 710 s)**

Total heat release	121.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	78.0 g
Mass at EOT	47.0 g
Mass lost	31.0 g
Specific mass lost	3.10 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	39.7 %

**Test results (between 116 and 710 s)**

Total heat release	121.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	77.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	206.02	265.03	400
Mass at EOT	47.0 g	Mass loss rate (g/s)	40.47	37.89	190
Mass lost	30.0 g		0.051	0.232	125
Specific mass lost	3.00 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	38.9 %				
Average specific MLR	6.08 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> )	210.10	229.02
Effective heat of comb. (MJ/kg)	23.62	29.83
Mass loss rate (g/s)	0.089	0.075

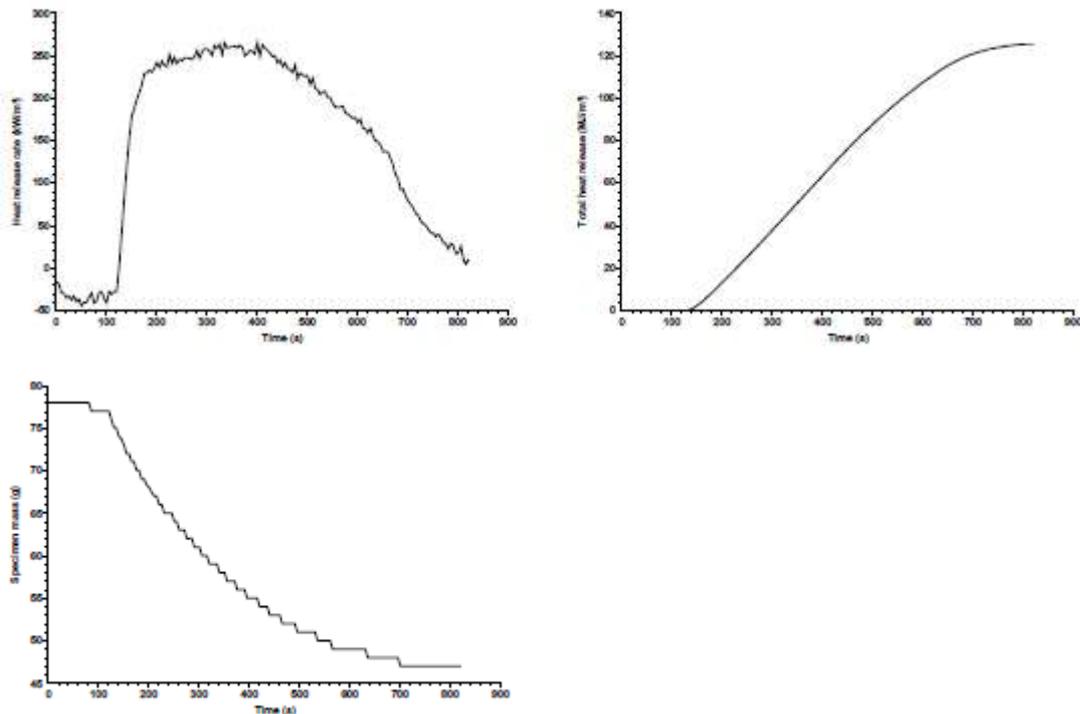


Figura A17: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA-2.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	80 g	Manufacturer	
Surface area	99.8 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:33	HRR Calibration filename	C:\MLOCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	135 s
Time to flameout	702 s
End of test time (for calculations)	702 s

**Test results (between 0 and 702 s)**

Total heat release	120.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	80.0 g
Mass at EOT	48.0 g
Mass lost	32.0 g
Specific mass lost	3.20 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	40.0 %

**Test results (between 135 and 702 s)**

Total heat release	120.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	77.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	211.73	279.08	380
Mass at EOT	48.0 g	Mass loss rate (g/s)	41.49	63.87	420
Mass lost	29.0 g		0.051	0.229	155
Specific mass lost	2.91 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	37.7 %				
Average specific MLR	7.05 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> )	224.04	240.52
Effective heat of comb. (MJ/kg)	25.16	32.73
Mass loss rate (g/s)	0.088	0.074

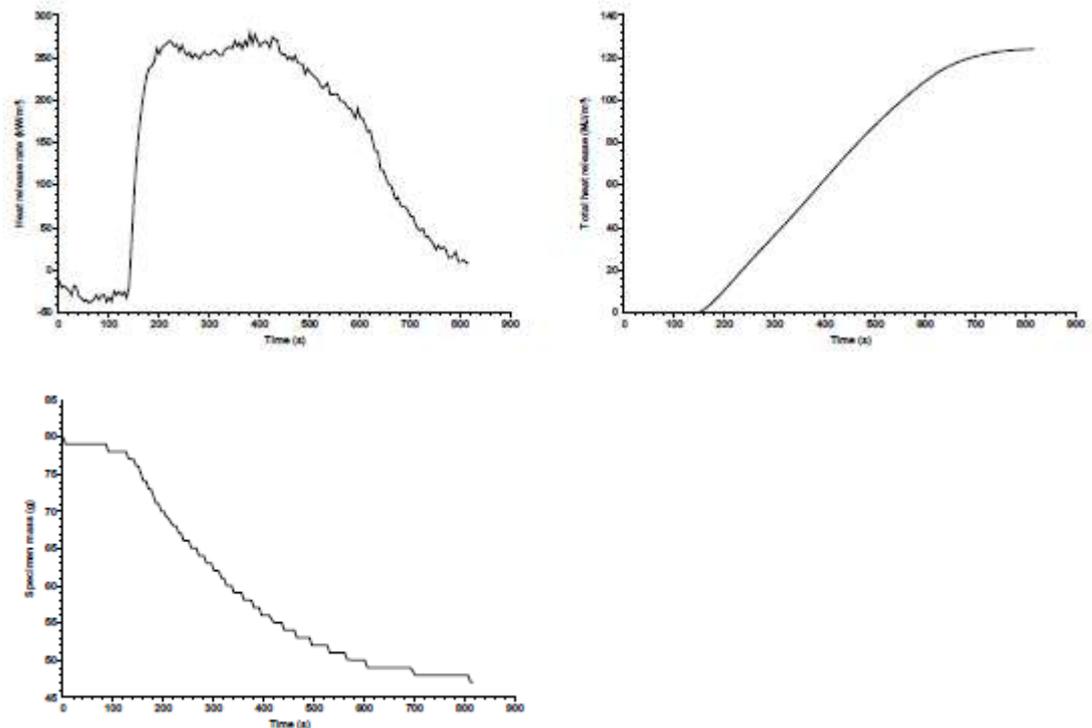


Figura A18: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	73 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	25 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:35	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1603002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.650422 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	115 s
Time to flameout	581 s
End of test time (for calculations)	581 s

**Test results (between 0 and 581 s)**

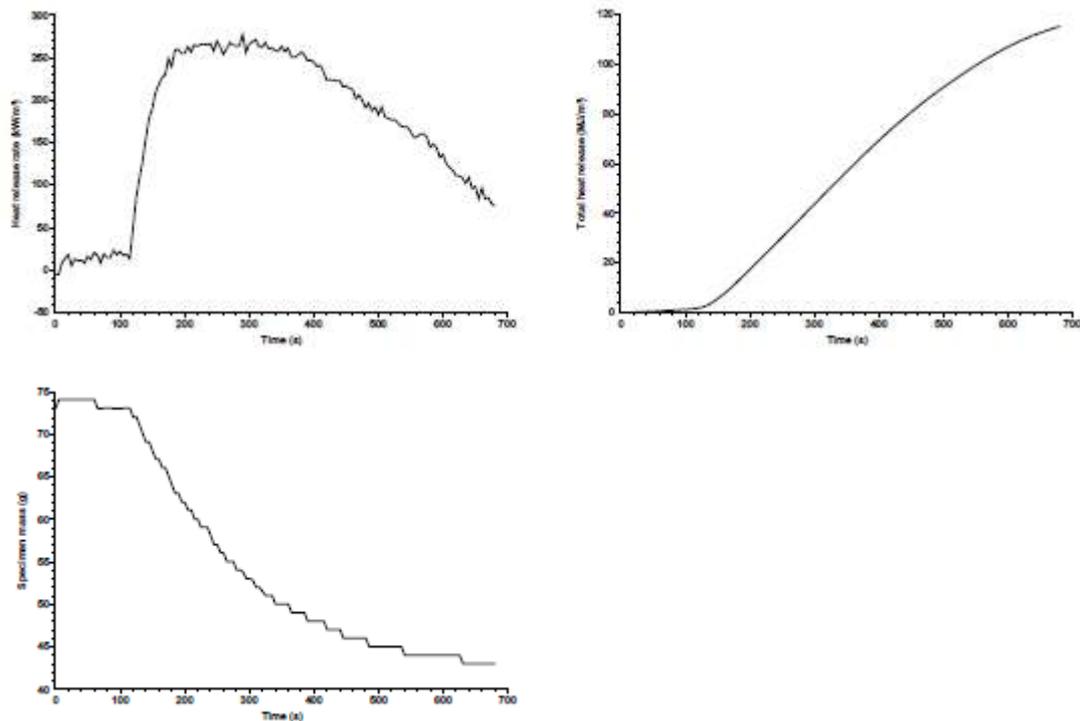
Total heat release	104.4 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	73.0 g
Mass at EOT	44.0 g
Mass lost	29.0 g
Specific mass lost	2.90 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	39.7 %

**Test results (between 115 and 581 s)**

Total heat release	102.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	73.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	220.29	276.81	290
Mass at EOT	44.0 g	Mass loss rate (g/s)	35.68	72.58	315
Mass lost	29.0 g		0.061	0.234	240
Specific mass lost	2.90 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	39.7 %				
Average specific MLR	7.49 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> )	226.92	238.49
Effective heat of comb. (MJ/kg)	20.41	28.59
Mass loss rate (g/s)	0.109	0.083



**Figura A19: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PB-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	71 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:52	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	115 s
Time to flameout	605 s
End of test time (for calculations)	605 s

**Test results (between 0 and 605 s)**

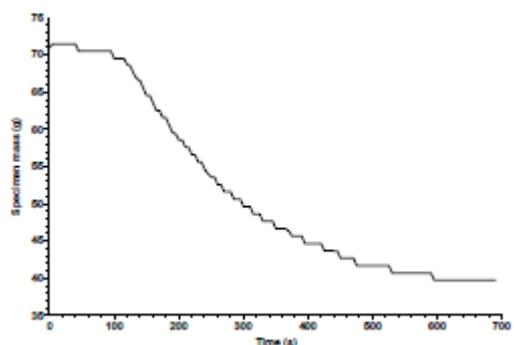
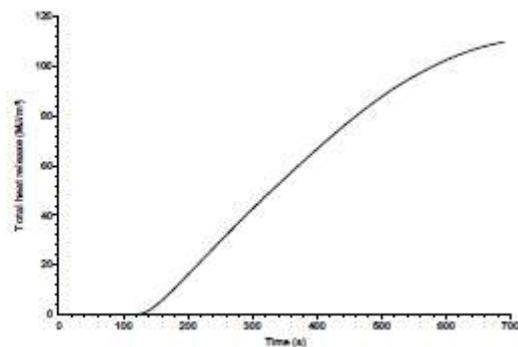
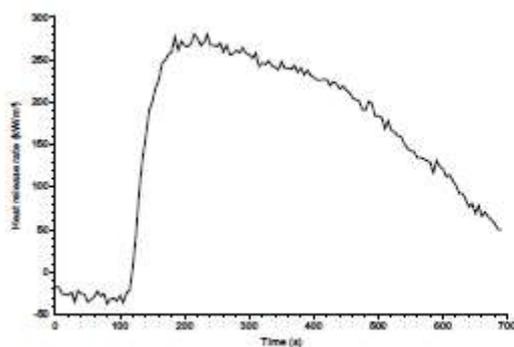
Total heat release	103.2 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	71.0 g
Mass at EOT	39.7 g
Mass lost	31.3 g
Specific mass lost	3.13 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	44.1 %

**Test results (between 115 and 605 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	103.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	210.49	279.92	215
Mass at sustained flaming	69.5 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	34.64	35.90	200
Mass at EOT	39.7 g	Mass loss rate (g/s)	0.060	0.230	160
Mass lost	29.8 g				
Specific mass lost	2.98 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	42.8 %				
Average specific MLR	8.08 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> )		229.69	233.99
Effective heat of comb. (MJ/kg)		21.92	28.27
Mass loss rate (g/s)		0.105	0.082



**Figura A20: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PB-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	72 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	13 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	16:09	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	13 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	126 s
Time to flameout	581 s
End of test time (for calculations)	581 s

**Test results (between 0 and 581 s)**

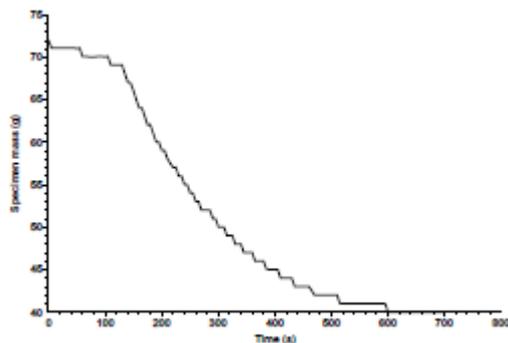
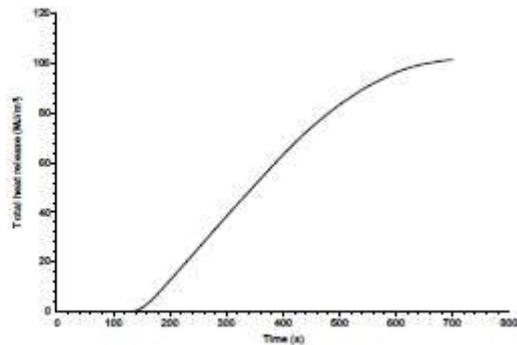
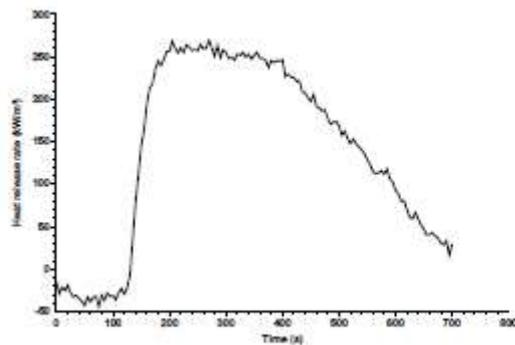
Total heat release	94.3 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	72.0 g
Mass at EOT	41.0 g
Mass lost	31.0 g
Specific mass lost	3.10 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	43.0 %

**Test results (between 126 and 581 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	94.3 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	208.40	268.99	270
Mass at sustained flaming	69.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	33.85	44.10	460
Mass at EOT	41.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.061	0.235	185
Mass lost	28.0 g				
Specific mass lost	2.80 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	40.6 %				
Average specific MLR	0.79 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> )		227.21	233.35
Effective heat of comb. (MJ/kg)		21.50	27.99
Mass loss rate (g/s)		0.106	0.084



**Figura A21: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PB-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	80 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	14:56	HRR Calibration filename	C:\ML00CALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	135 s
Time to flameout	678 s
End of test time (for calculations)	678 s

**Test results (between 0 and 678 s)**

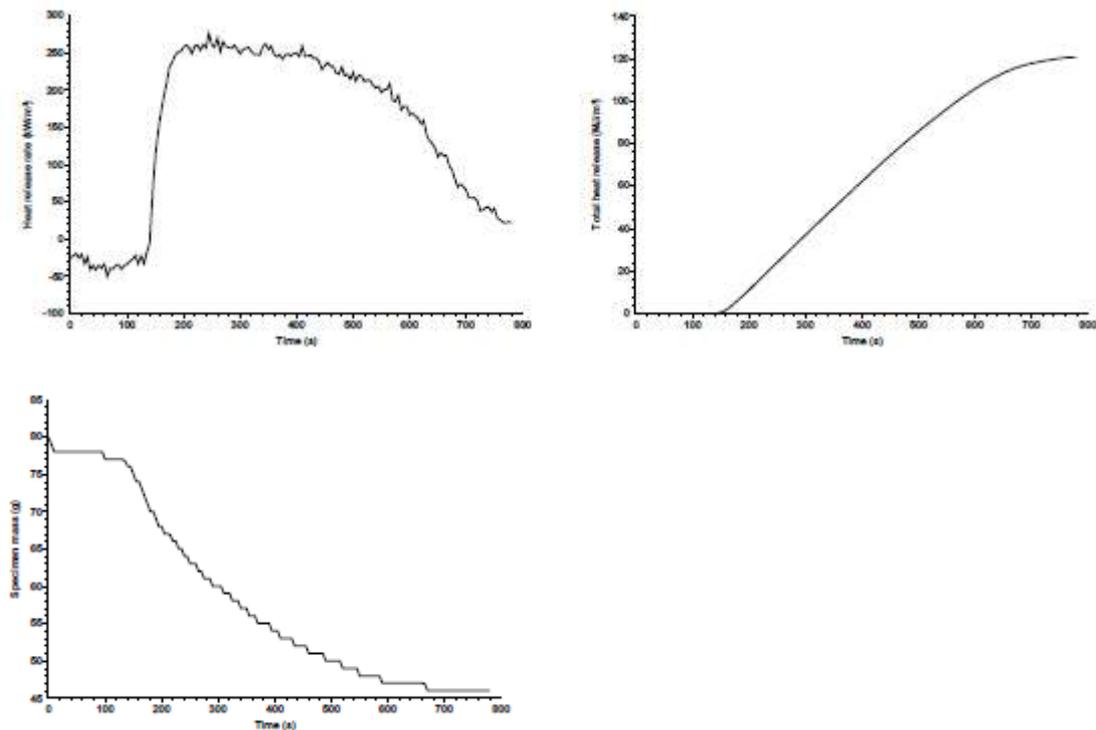
Total heat release	115.8 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	80.0 g
Mass at EOT	46.0 g
Mass lost	34.0 g
Specific mass lost	3.40 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	42.4 %

**Test results (between 135 and 678 s)**

Total heat release	115.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	76.8 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	213.06	276.61	245
Mass at EOT	46.0 g	Mass loss rate (g/s)	37.72	32.94	220
Mass lost	30.8 g		0.056	0.234	190
Specific mass lost	3.08 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	40.1 %				
Average specific MLR	8.21 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> )		226.58	235.84
Effective heat of comb. (MJ/kg)		22.96	28.53
Mass loss rate (g/s)		0.098	0.082



**Figura A22: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PAB-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	79 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:14	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	147 s
Time to flameout	667 s
End of test time (for calculations)	667 s

**Test results (between 0 and 667 s)**

Total heat release	109.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	79.0 g
Mass at EOT	47.0 g
Mass lost	32.0 g
Specific mass lost	3.20 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	40.5 %

**Test results (between 147 and 667 s)**

Total heat release	109.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	76.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	211.54	271.83	300
Mass at EOT	47.0 g	Mass loss rate (g/s)	37.92	43.95	280
Mass lost	29.0 g		0.055	0.232	185
Specific mass lost	2.90 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	38.1 %				
Average specific MLR	8.00 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> )	234.25	241.02
Effective heat of comb. (MJ/kg)	23.44	30.10
Mass loss rate (g/s)	0.099	0.079

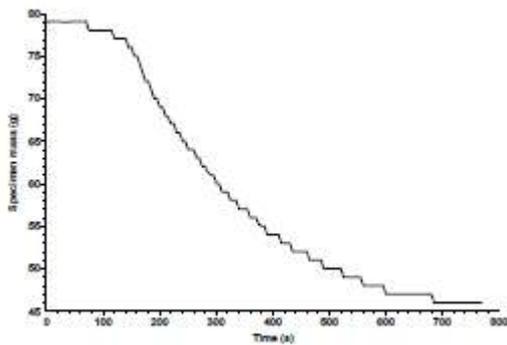
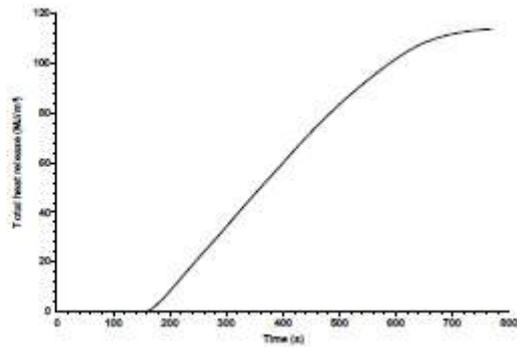
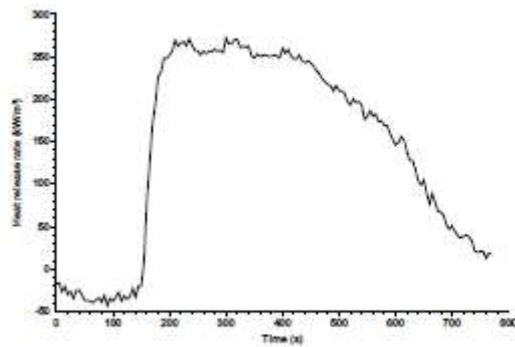


Figura A23: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PAB-2.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	79 g	Manufacturer	
Surface area	100 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	15 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	15:31	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	15 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	133 s
Time to flameout	628 s
End of test time (for calculations)	628 s

**Test results (between 0 and 628 s)**

Total heat release	107.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	79.0 g
Mass at EOT	47.0 g
Mass lost	32.0 g
Specific mass lost	3.20 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	40.5 %

**Test results (between 133 and 628 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	107.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	217.06	273.55	200
Mass at sustained flaming	77.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	35.96	32.81	275
Mass at EOT	47.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.060	0.233	180
Mass lost	30.0 g				
Specific mass lost	3.00 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	38.9 %				
Average specific MLR	8.00 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	from ignition plus...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		236.33	240.00
Effective heat of comb. (MJ/kg)		22.56	28.93
Mass loss rate (g/s)		0.104	0.082

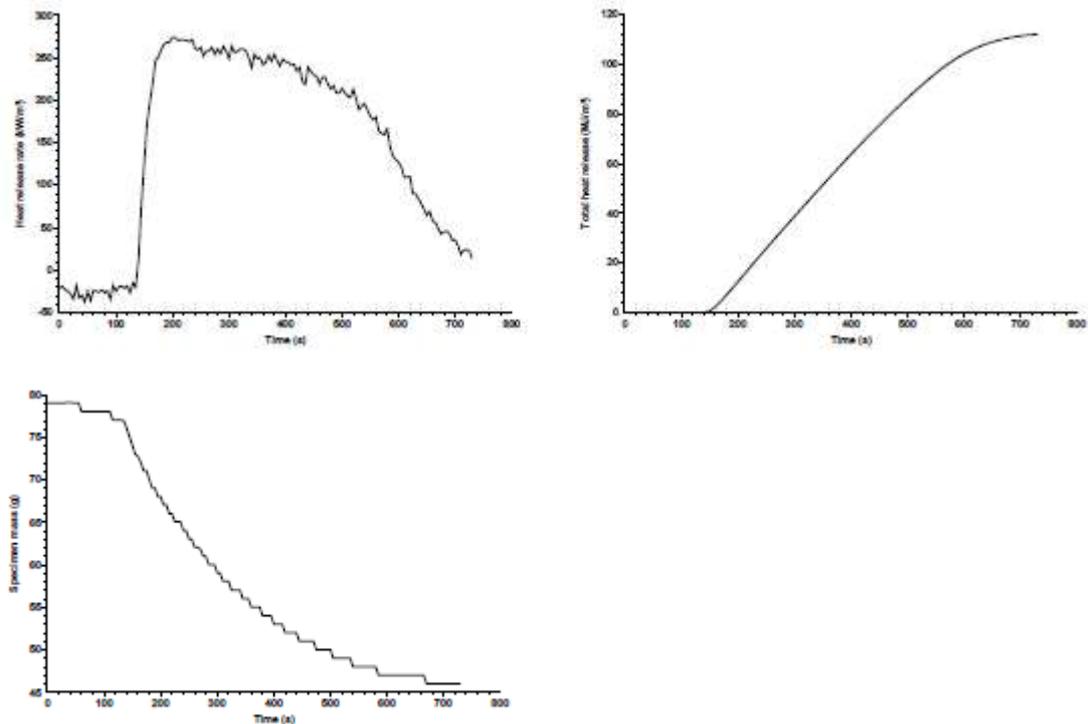


Figura A24: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PAB-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	83 g	Manufacturer	
Surface area	97.53 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	16:33	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	620 s

**Test results (between 0 and 620 s)**

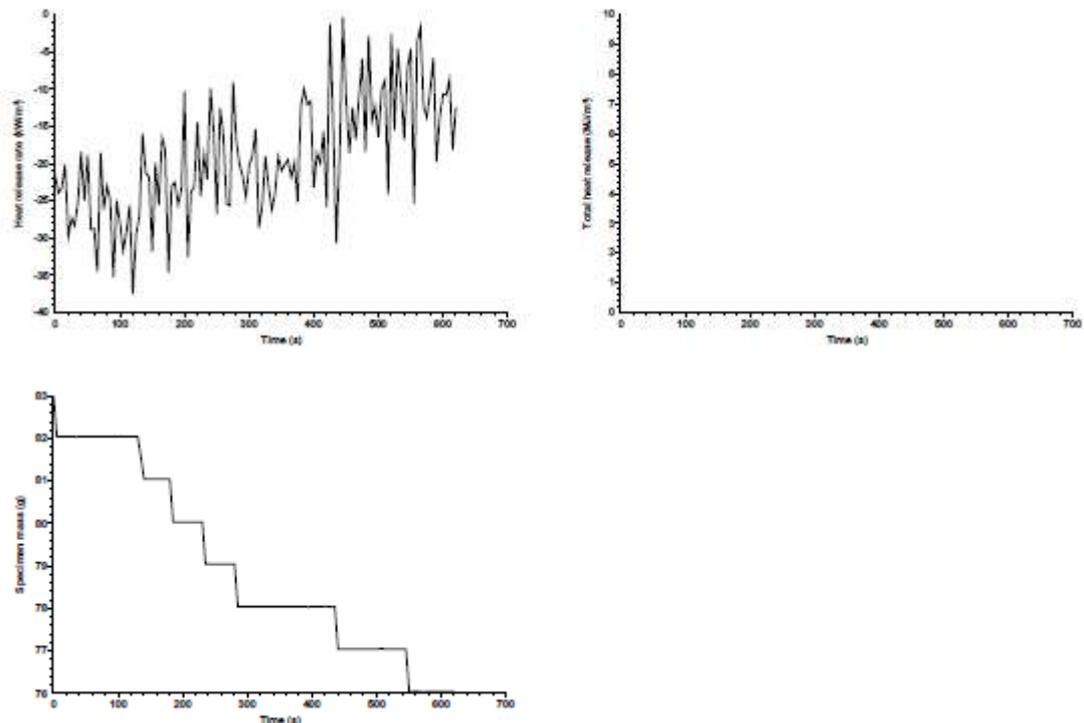
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	83.0 g
Mass at EOT	76.0 g
Mass lost	7.0 g
Specific mass lost	0.71 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	8.4 %

**Test results (between 0 and 620 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-19.06	-0.30	445
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-16.57	0.00	10
Mass at EOT	76.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.012	0.399	0
Mass lost	7.0 g				
Specific mass lost	0.71 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	8.4 %				
Average specific MLR	1.05 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-25.58	-23.45
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-22.86	-13.84
Mass loss rate (g/s)	0.013	0.017



**Figura A25: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra F-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	83 g	Manufacturer	
Surface area	98.14 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	16:50	HRR Calibration filename	C:\ML\CALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	600 s

**Test results (between 0 and 600 s)**

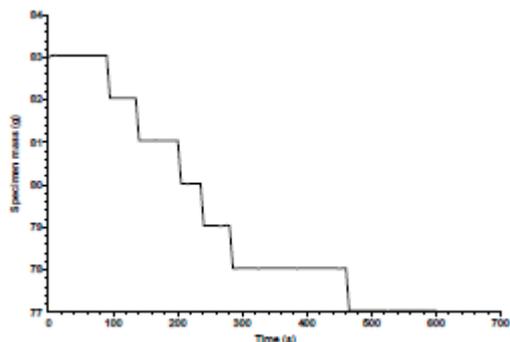
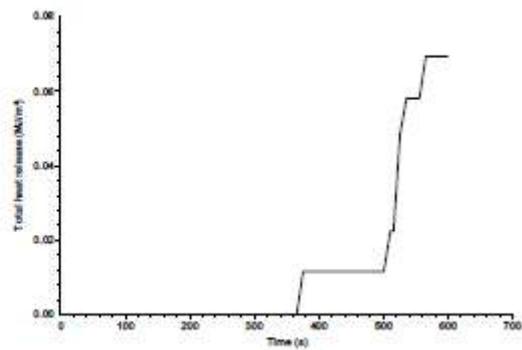
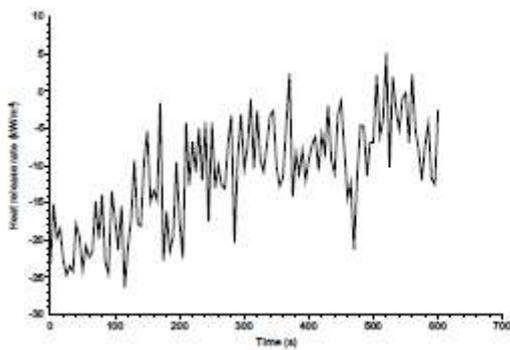
Total heat release	0.1 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	83.0 g
Mass at EOT	77.0 g
Mass lost	6.0 g
Specific mass lost	0.61 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	7.2 %

**Test results (between 0 and 600 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-11.11	5.18	520
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-10.97	46.80	520
Mass at EOT	77.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.010	0.118	280
Mass lost	6.0 g				
Specific mass lost	0.61 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	7.2 %				
Average specific MLR	1.31 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-18.03	-15.35
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-16.26	-9.11
Mass loss rate (g/s)		0.011	0.017



**Figura A26: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra F-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	83 g	Manufacturer	
Surface area	97.2 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	12 July 2016	Separation	25 mm
Time of test	17:09	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	12 July 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	630 s

**Test results (between 0 and 630 s)**

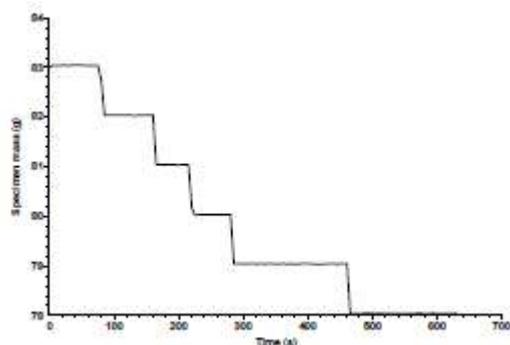
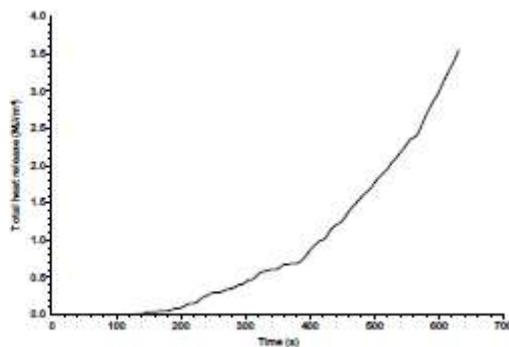
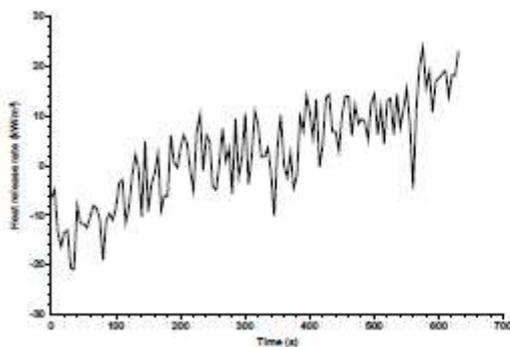
Total heat release	3.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	83.0 g
Mass at EOT	78.0 g
Mass lost	5.0 g
Specific mass lost	0.51 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	6.0 %

**Test results (between 0 and 630 s)**

Total heat release	3.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	2.67	23.80	575
Mass at EOT	78.0 g	Mass loss rate (g/s)	3.30	77.50	515
Mass lost	5.0 g		0.008	0.119	220
Specific mass lost	0.51 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	6.0 %				
Average specific MLR	1.07 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	<b>between time 0 and...</b>	<b>180 s</b>	<b>300 s</b>
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-8.56	-4.29
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-7.62	-3.16
Mass loss rate (g/s)		0.011	0.013



**Figura A27: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra F-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	92 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:04	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	144 s
Time to flameout	475 s
End of test time (for calculations)	475 s

**Test results (between 0 and 475 s)**

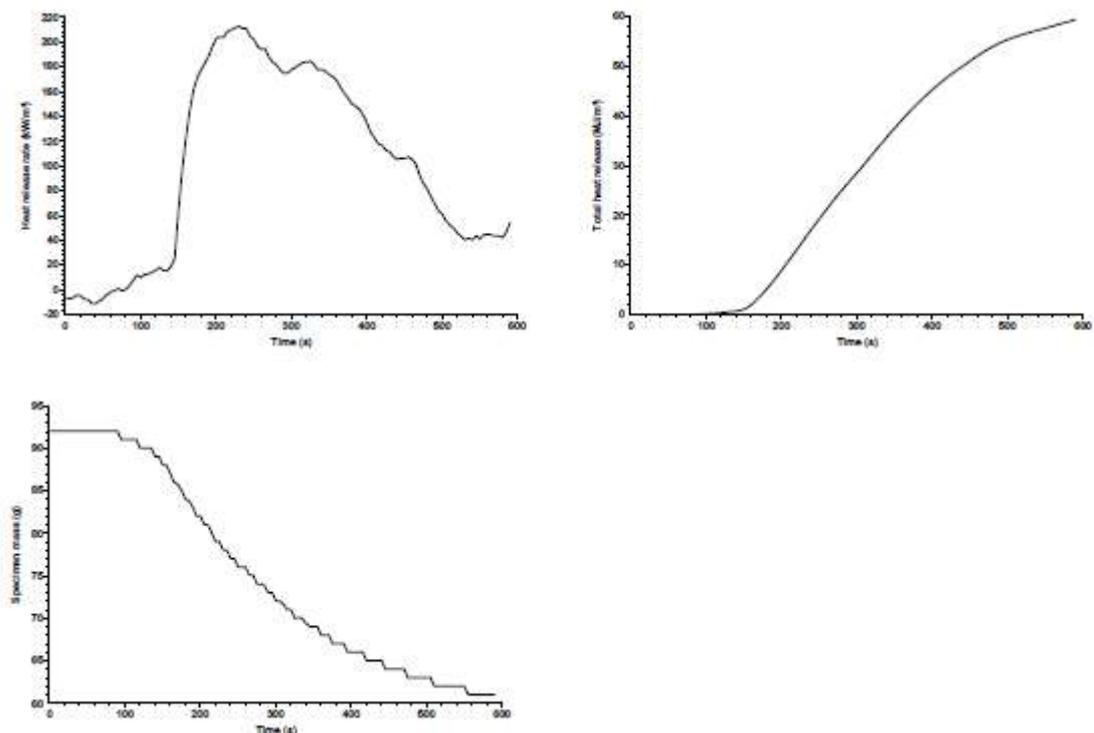
Total heat release	53.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	92.0 g
Mass at EOT	63.1 g
Mass lost	28.9 g
Specific mass lost	3.27 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	31.4 %

**Test results (between 144 and 475 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	52.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	159.82	212.39	230
Mass at sustained flaming	89.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	17.95	64.62	345
Mass at EOT	63.1 g	Mass loss rate (g/s)	0.077	0.229	160
Mass lost	26.0 g				
Specific mass lost	2.94 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	29.2 %				
Average specific MLR	10.68 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> )		179.31	165.68
Effective heat of comb. (MJ/kg)		15.03	17.58
Mass loss rate (g/s)		0.103	0.082



**Figura A28: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC1-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	96 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:19	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	157 s
Time to flameout	407 s
End of test time (for calculations)	407 s

**Test results (between 0 and 407 s)**

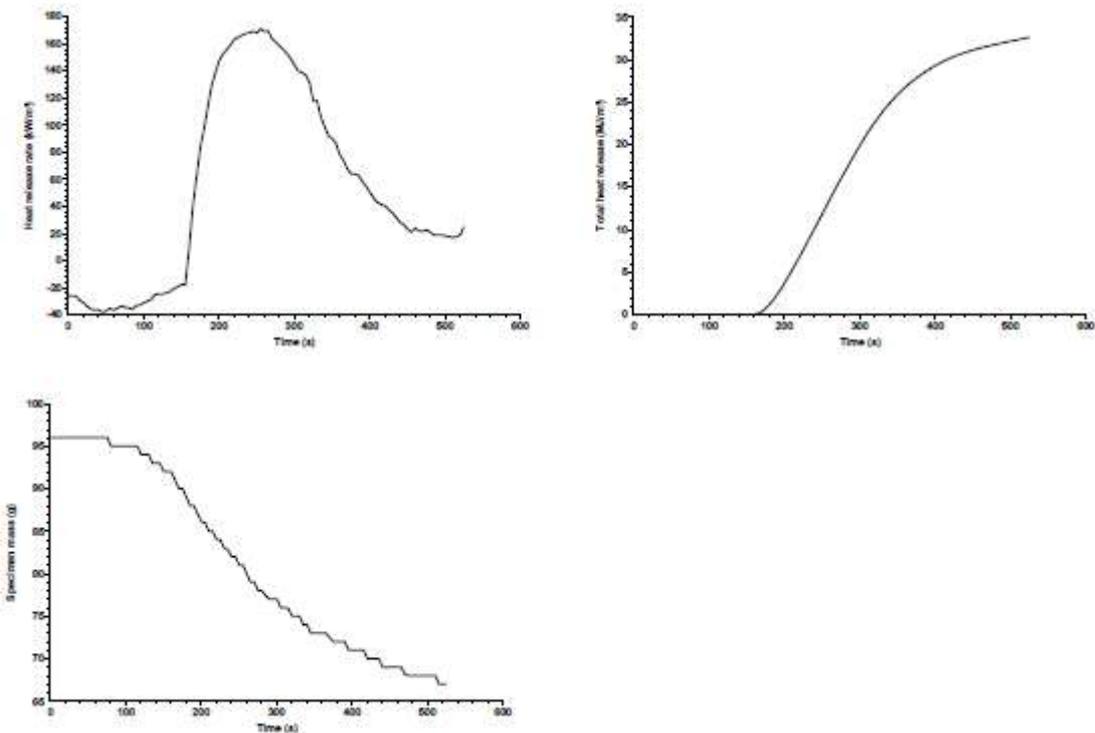
Total heat release	29.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	96.0 g
Mass at EOT	71.1 g
Mass lost	24.9 g
Specific mass lost	2.82 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	26.0 %

**Test results (between 157 and 407 s)**

Total heat release	29.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	92.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	118.86	171.10	255
Mass at EOT	71.1 g	Mass loss rate (g/s)	12.52	34.96	280
Mass lost	21.0 g		0.083	0.234	260
Specific mass lost	2.37 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	22.8 %				
Average specific MLR	12.24 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> )		138.43	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		12.26	-
Mass loss rate (g/s)		0.100	-



**Figura A29: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC1-2.**

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	99 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:33	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	165 s
Time to flameout	358 s
End of test time (for calculations)	358 s

### Test results (between 0 and 358 s)

Total heat release	29.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	99.0 g
Mass at EOT	75.1 g
Mass lost	23.9 g
Specific mass lost	2.71 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	24.2 %

### Test results (between 165 and 358 s)

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	28.9 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	150.41	198.23	235
Mass at sustained flaming	94.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	13.66	21.06	245
Mass at EOT	75.1 g	Mass loss rate (g/s)	0.097	0.220	170
Mass lost	19.0 g				
Specific mass lost	2.15 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	20.2 %				
Average specific MLR	9.82 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> )		155.37	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		13.74	-
Mass loss rate (g/s)		0.099	-

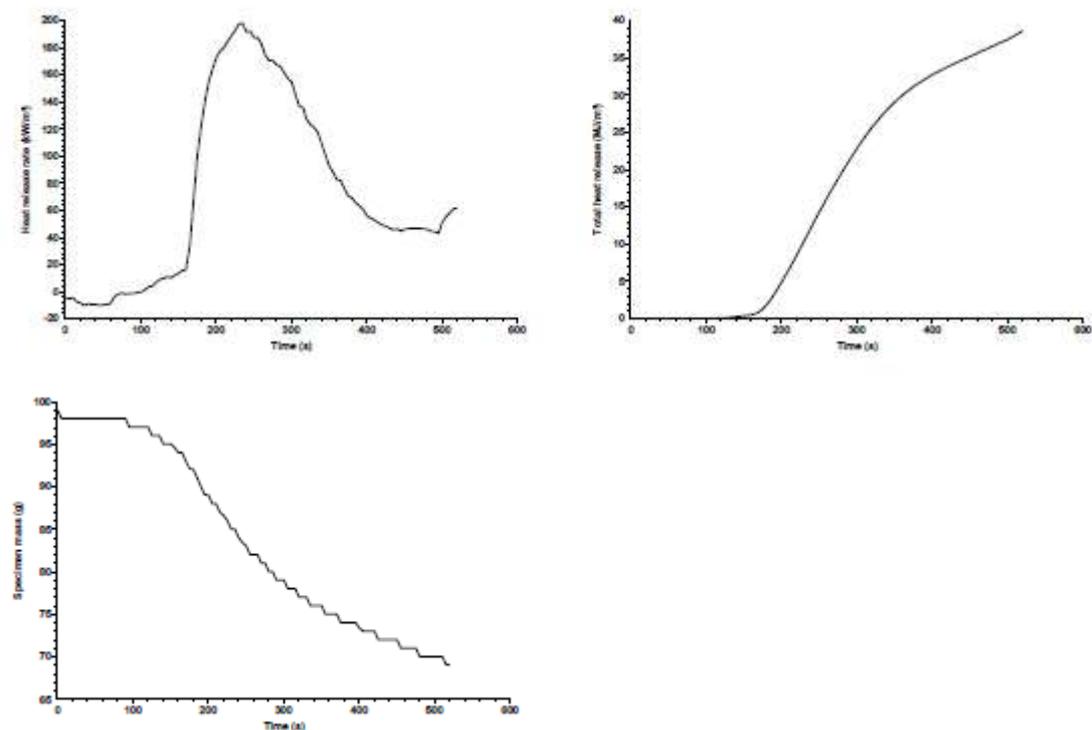


Figura A30: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC1-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	103 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	11:48	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	161 s
Time to flameout	347 s
End of test time (for calculations)	347 s

**Test results (between 0 and 347 s)**

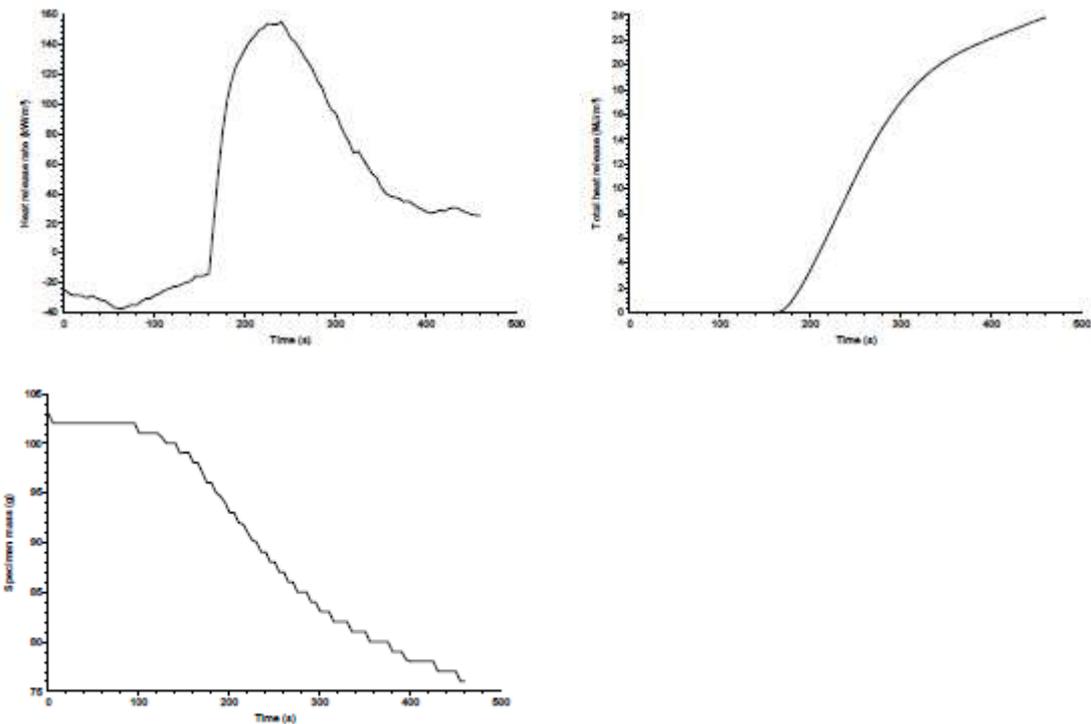
Total heat release	20.1 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	103.0 g
Mass at EOT	81.1 g
Mass lost	21.9 g
Specific mass lost	2.48 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	21.3 %

**Test results (between 161 and 347 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	20.1 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	109.82	155.26	240
Mass at sustained flaming	98.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	10.57	15.57	225
Mass at EOT	81.1 g	Mass loss rate (g/s)	0.092	0.233	170
Mass lost	17.0 g				
Specific mass lost	1.92 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	17.3 %				
Average specific MLR	9.92 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> )		111.55	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		10.45	-
Mass loss rate (g/s)		0.093	-



**Figura A31: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC2-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	104 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:01	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	200 s
Time to flameout	460 s
End of test time (for calculations)	460 s

**Test results (between 0 and 460 s)**

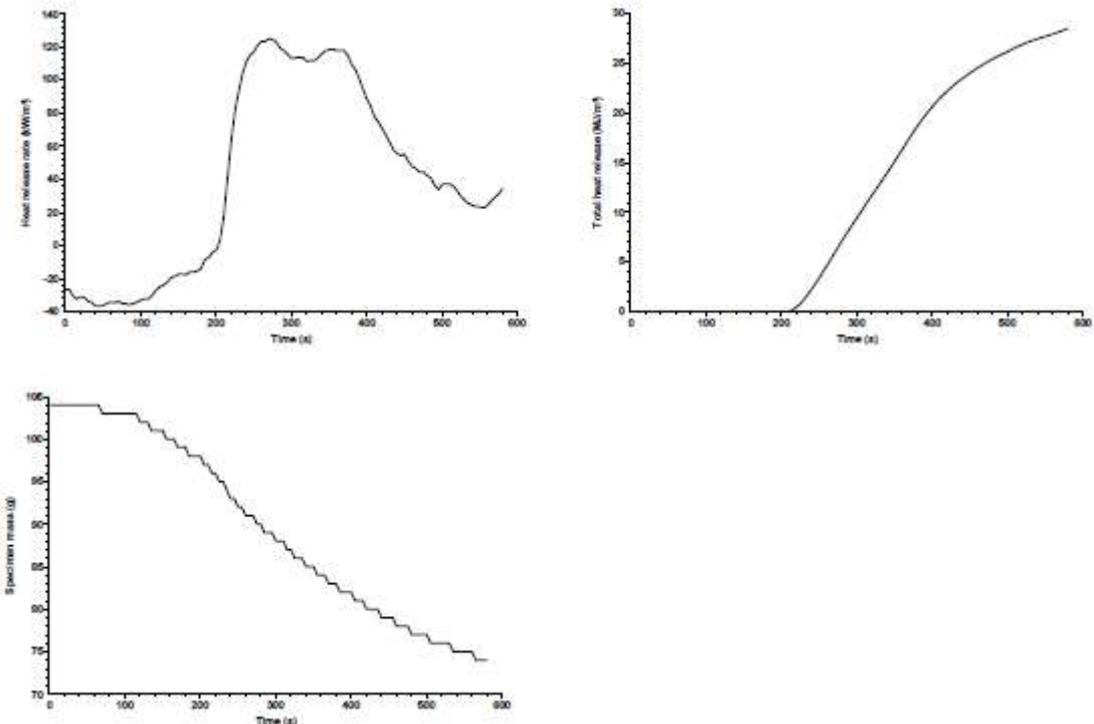
Total heat release	24.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	104.0 g
Mass at EOT	78.0 g
Mass lost	26.0 g
Specific mass lost	2.94 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	25.0 %

**Test results (between 200 and 460 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	24.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	94.43	124.94	270
Mass at sustained flaming	98.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	10.85	11.86	240
Mass at EOT	78.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.075	0.235	235
Mass lost	20.0 g				
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	20.4 %				
Average specific MLR	8.83 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> )		103.64	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		11.00	-
Mass loss rate (g/s)		0.083	-



**Figura A32: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC2-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	106 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	7 December 2016	Separation	25 mm
Time of test	12:15	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	7 December 2016	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	150 s
Time to flameout	333 s
End of test time (for calculations)	333 s

**Test results (between 0 and 333 s)**

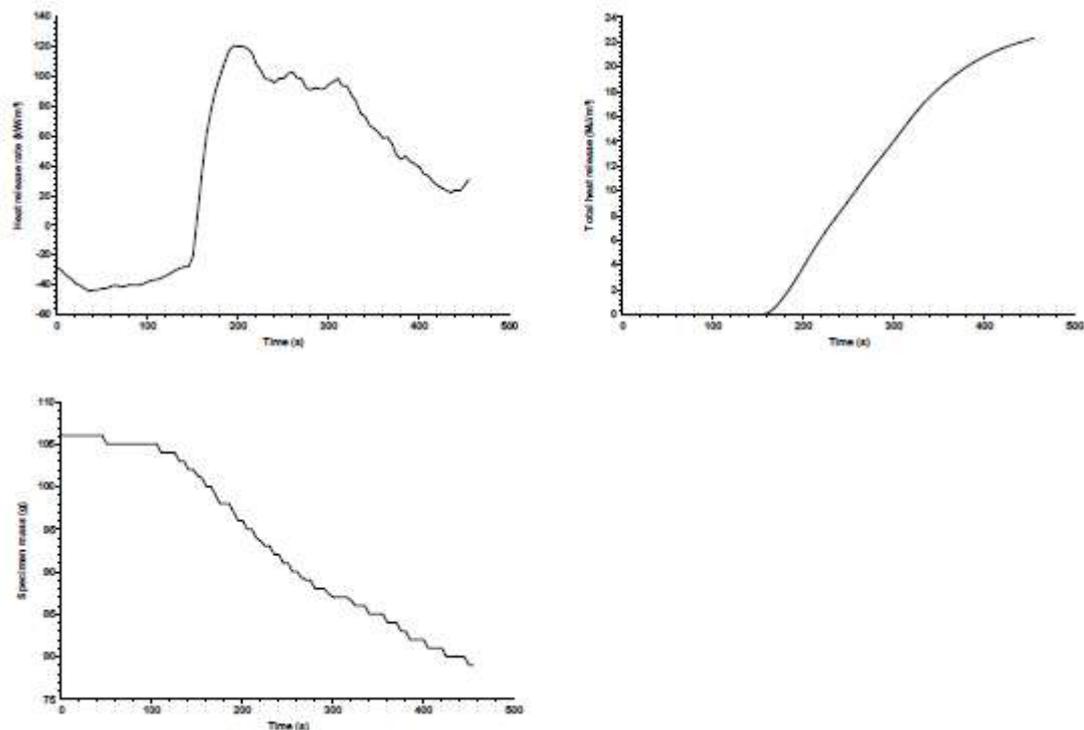
Total heat release	16.8 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	106.0 g
Mass at EOT	86.0 g
Mass lost	20.0 g
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	18.8 %

**Test results (between 150 and 333 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	16.8 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	92.80	120.62	195
Mass at sustained flaming	101.3 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	9.92	22.72	300
Mass at EOT	86.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.085	0.234	170
Mass lost	15.3 g				
Specific mass lost	1.73 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	15.1 %				
Average specific MLR	11.08 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> )		93.17	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		9.69	-
Mass loss rate (g/s)		0.086	-



**Figura A33: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PBC2-3.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	10 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	13:30	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	10 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	220 s
Time to flameout	586 s
End of test time (for calculations)	586 s

**Test results (between 0 and 586 s)**

Total heat release	40.4 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88.0 g
Mass at EOT	58.1 g
Mass lost	29.9 g
Specific mass lost	3.39 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	34.0 %

**Test results (between 220 and 586 s)**

Total heat release	40.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	81.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	109.21	154.02	360
Mass at EOT	58.1 g	Mass loss rate (g/s)	15.54	57.19	395
Mass lost	23.0 g		0.062	0.121	305
Specific mass lost	2.60 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	28.4 %				
Average specific MLR	9.68 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> )	127.23	118.72
Effective heat of comb. (MJ/kg)	12.67	14.32
Mass loss rate (g/s)	0.090	0.073

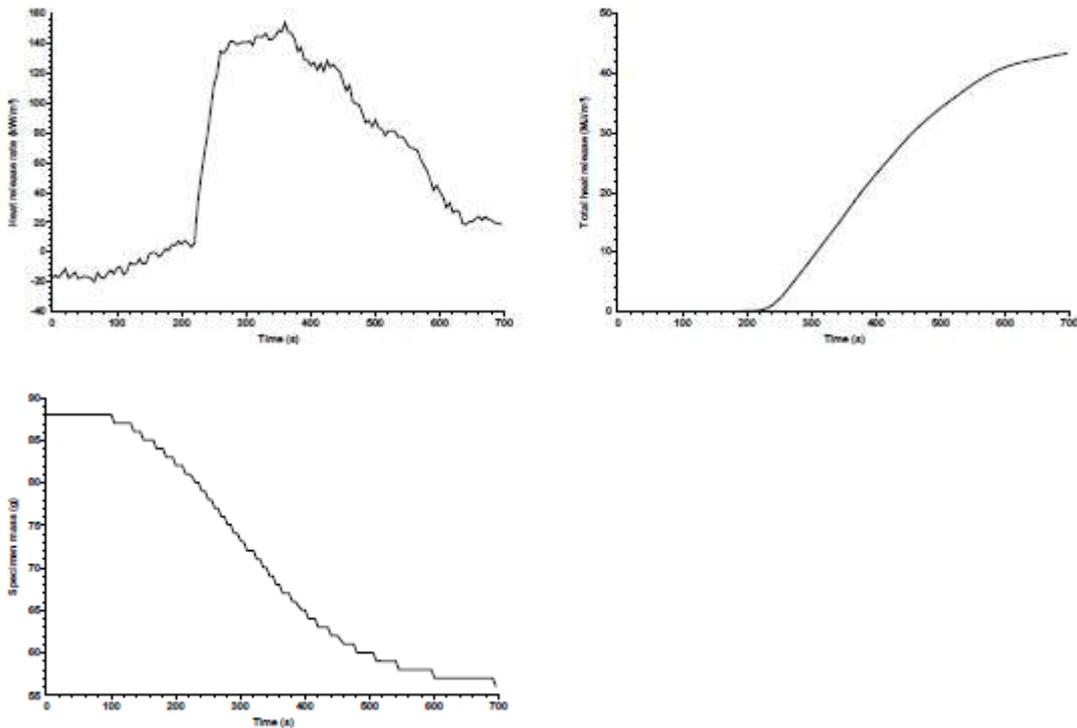


Figura A34: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC1-1.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	89 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	10 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	14:00	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	10 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	215 s
Time to flameout	479 s
End of test time (for calculations)	479 s

**Test results (between 0 and 479 s)**

Total heat release	26.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	89.0 g
Mass at EOT	62.1 g
Mass lost	26.9 g
Specific mass lost	3.05 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	30.3 %

**Test results (between 215 and 479 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	26.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	100.71	131.67	320
Mass at sustained flaming	81.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	11.80	12.50	300
Mass at EOT	62.1 g	Mass loss rate (g/s)	0.076	0.118	410
Mass lost	19.0 g				
Specific mass lost	2.15 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	23.4 %				
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> )		109.08	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		10.86	-
Mass loss rate (g/s)		0.089	-

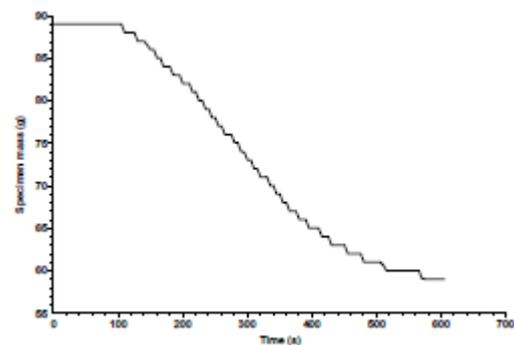
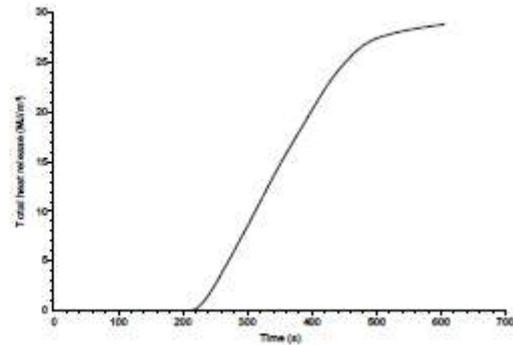
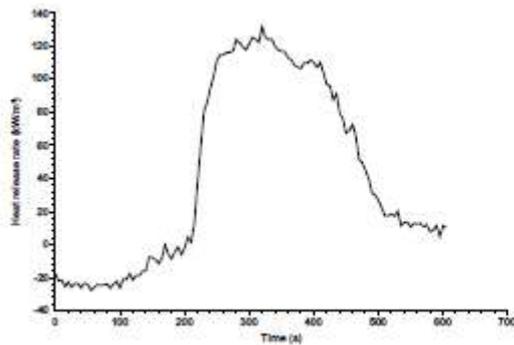


Figura A35: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC1-2.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	91 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	10 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	14:16	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	10 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	166 s
Time to flameout	533 s
End of test time (for calculations)	533 s

**Test results (between 0 and 533 s)**

Total heat release	35.2 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	91.0 g
Mass at EOT	60.0 g
Mass lost	31.0 g
Specific mass lost	3.50 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	34.0 %

**Test results (between 166 and 533 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	35.2 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	96.41	127.93	315
Mass at sustained flaming	86.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	12.45	27.13	225
Mass at EOT	60.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.068	0.236	170
Mass lost	26.0 g				
Specific mass lost	2.94 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	30.2 %				
Average specific MLR	11.20 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> )		113.54	107.28
Effective heat of comb. (MJ/kg)		10.05	11.86
Mass loss rate (g/s)		0.101	0.080

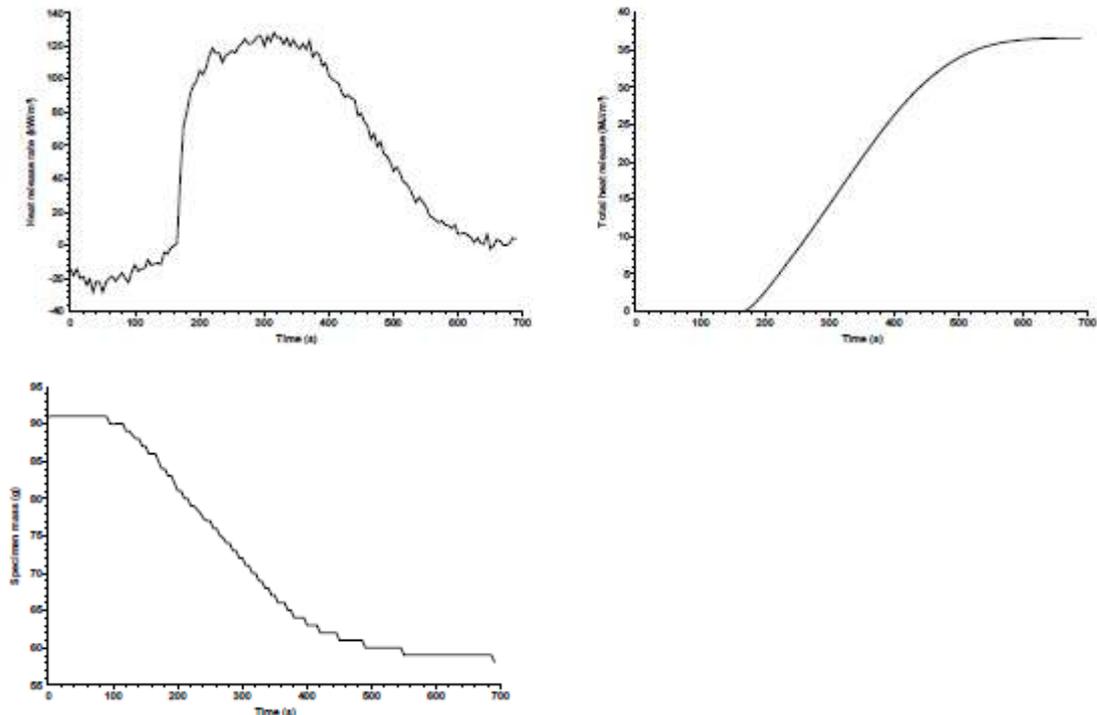


Figura A36: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC1-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	83 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	11 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	11:11	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	23 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	175 s
Time to flameout	496 s
End of test time (for calculations)	496 s

**Test results (between 0 and 496 s)**

Total heat release	36.1 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	83.0 g
Mass at EOT	54.0 g
Mass lost	29.0 g
Specific mass lost	3.28 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	34.9 %

**Test results (between 175 and 496 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	36.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	111.48	139.72	315
Mass at sustained flaming	79.1 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	12.82	39.72	260
Mass at EOT	54.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.078	0.233	185
Mass lost	25.0 g				
Specific mass lost	2.83 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	31.6 %				
Average specific MLR	11.32 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> )		122.69	115.46
Effective heat of comb. (MJ/kg)		10.85	12.25
Mass loss rate (g/s)		0.103	0.083

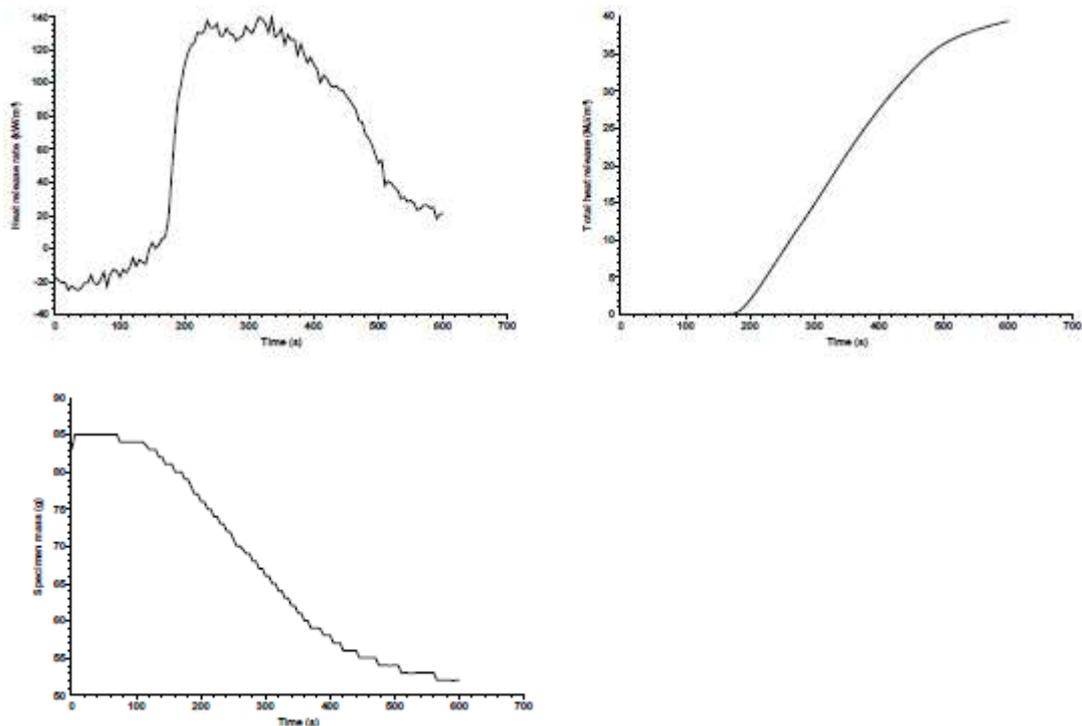


Figura A37: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC2-1.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	87 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	11 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	11:27	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	23 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	173 s
Time to flameout	457 s
End of test time (for calculations)	457 s

**Test results (between 0 and 457 s)**

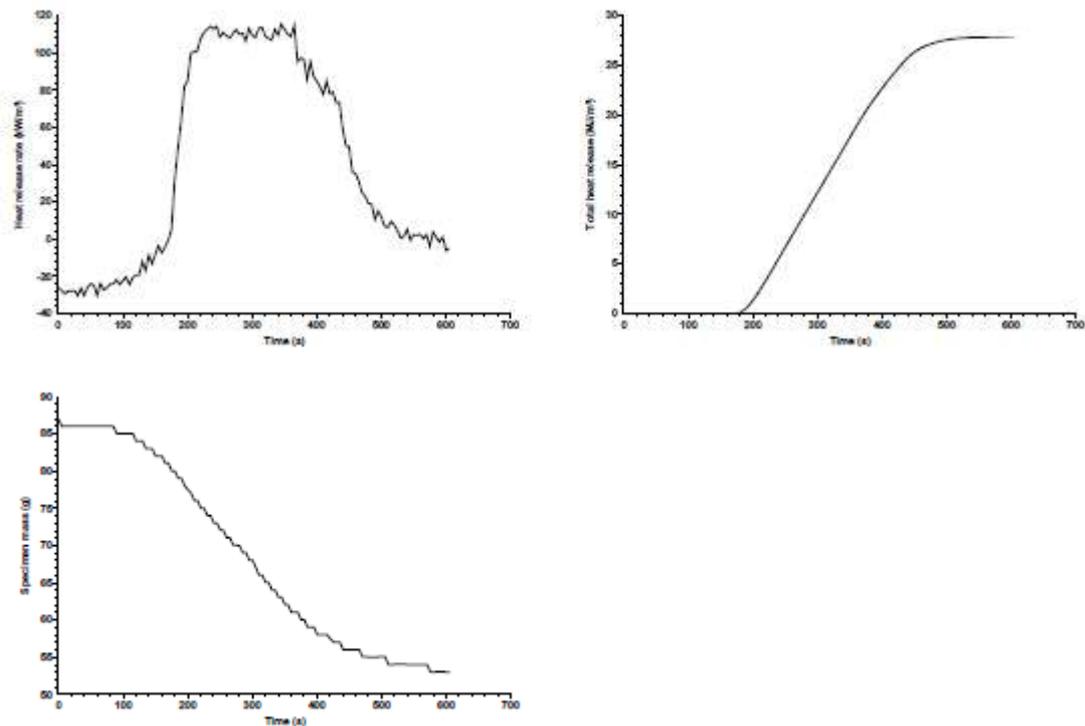
Total heat release	26.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	87.0 g
Mass at EOT	56.1 g
Mass lost	30.9 g
Specific mass lost	3.50 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	35.6 %

**Test results (between 173 and 457 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	26.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	93.81	115.56	345
Mass at sustained flaming	81.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	9.86	17.22	425
Mass at EOT	56.1 g	Mass loss rate (g/s)	0.085	0.233	305
Mass lost	25.0 g				
Specific mass lost	2.83 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	30.8 %				
Average specific MLR	10.77 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> )		101.75	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		9.01	-
Mass loss rate (g/s)		0.103	-



**Figura A38: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC2-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	11 January 2017	Separation	25 mm
Time of test	11:42	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	23 January 2017	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	5 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	181 s
Time to flameout	431 s
End of test time (for calculations)	431 s

**Test results (between 0 and 431 s)**

Total heat release	22.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88.0 g
Mass at EOT	60.0 g
Mass lost	28.0 g
Specific mass lost	3.16 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	31.8 %

**Test results (between 181 and 431 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	22.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	91.33	111.84	335
Mass at sustained flaming	82.0 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	9.62	11.17	270
Mass at EOT	60.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.086	0.119	360
Mass lost	22.0 g				
Specific mass lost	2.49 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	26.8 %				
Average specific MLR	10.21 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> )		94.09	-
Effective heat of comb. (MJ/kg)		8.80	-
Mass loss rate (g/s)		0.096	-

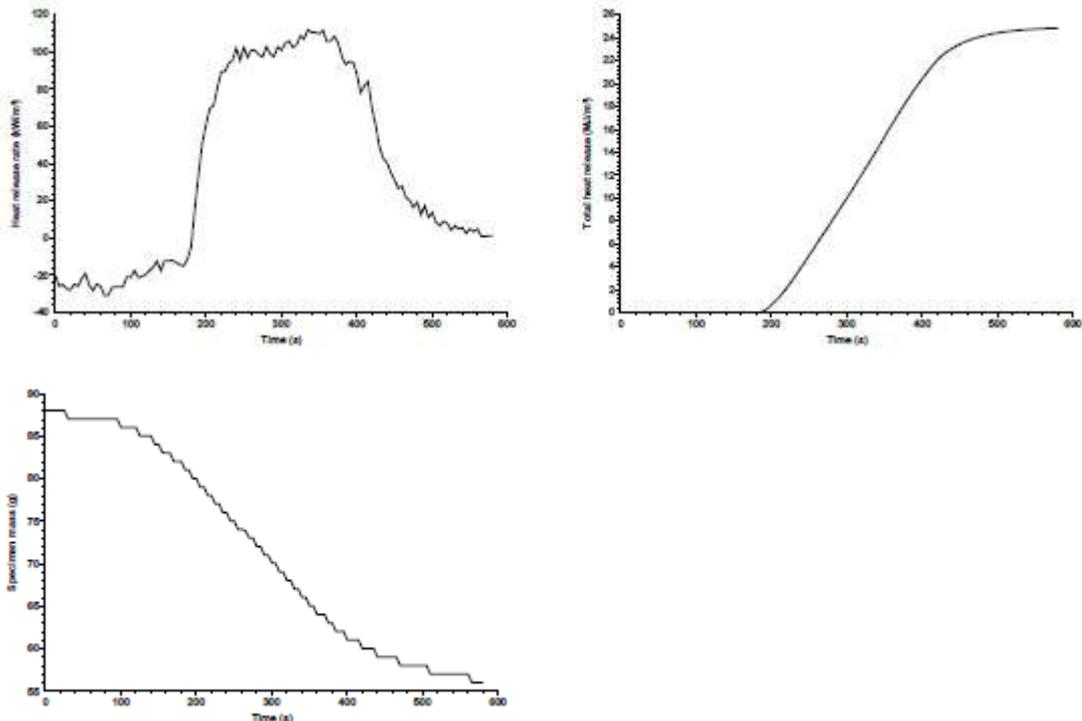


Figura A39: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PABC2-3.

### Specimen information

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	84 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

### Test

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	09:26	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

### Test times

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	560 s

### Test results (between 0 and 560 s)

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	84.0 g
Mass at EOT	59.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.82 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	29.7 %

### Test results (between 0 and 560 s)

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-40.31	-7.48	522
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-7.99	0.00	1
Mass at EOT	59.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.085	156.322	0
Mass lost	25.0 g				
Specific mass lost	2.82 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	29.7 %				
Average specific MLR	29.7 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

### Test averages

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-61.28	-51.98
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-19.58	-11.51
Mass loss rate (g/s)	0.155	0.116

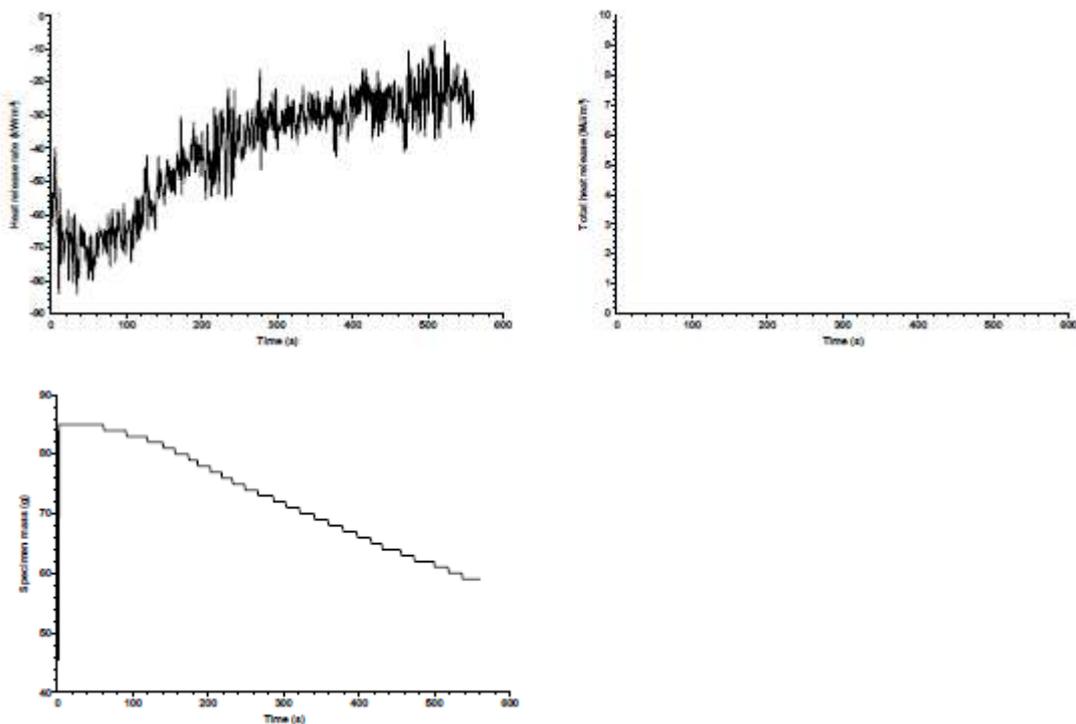


Figura A40: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA1-1.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	85 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	09:52	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	562 s

**Test results (between 0 and 562 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	85.0 g
Mass at EOT	63.0 g
Mass lost	22.0 g
Specific mass lost	2.49 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	25.9 %

**Test results (between 0 and 562 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-101.59	-57.24	483
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-22.97	0.00	1
Mass at EOT	63.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.115	292.912	0
Mass lost	22.0 g				
Specific mass lost	2.49 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	25.9 %				
Average specific MLR	25.9 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-123.26	-114.61
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-65.48	-30.44
Mass loss rate (g/s)	0.254	0.176

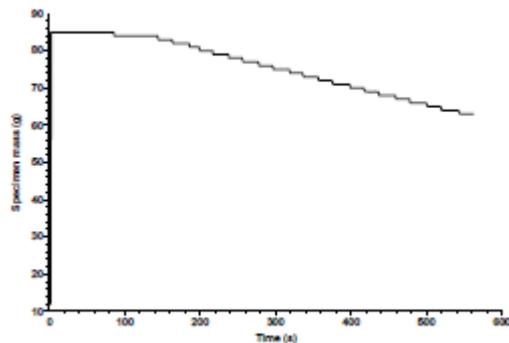
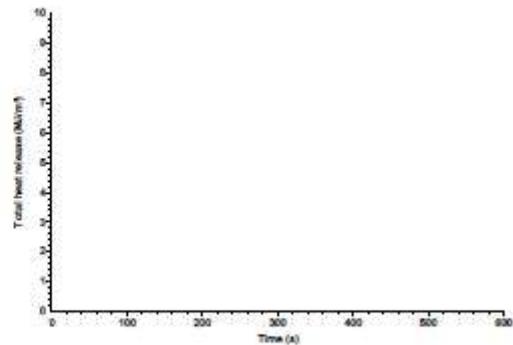
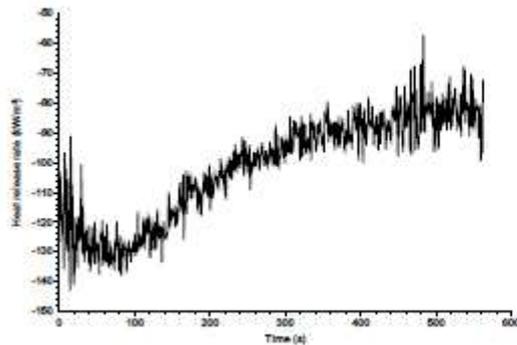


Figura A41: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA1-2.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	86 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	18:02	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	450 s

**Test results (between 0 and 450 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	86.0 g
Mass at EOT	68.0 g
Mass lost	18.0 g
Specific mass lost	2.03 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	20.9 %

**Test results (between 0 and 450 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>				
Mass at sustained flaming	no ignition				
Mass at EOT	68.0 g				
Mass lost	18.0 g				
Specific mass lost	2.03 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	20.9 %				
Average specific MLR	20.9 g/(m <sup>2</sup> ·s)				
		Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-136.42	-103.72	441
		Effective heat of comb. (MJ/kg)	-30.19	0.00	1
		Mass loss rate (g/s)	0.123	279.649	0

**Test averages**

	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-147.35	-142.42
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-69.47	-37.85
Mass loss rate (g/s)		0.227	0.158

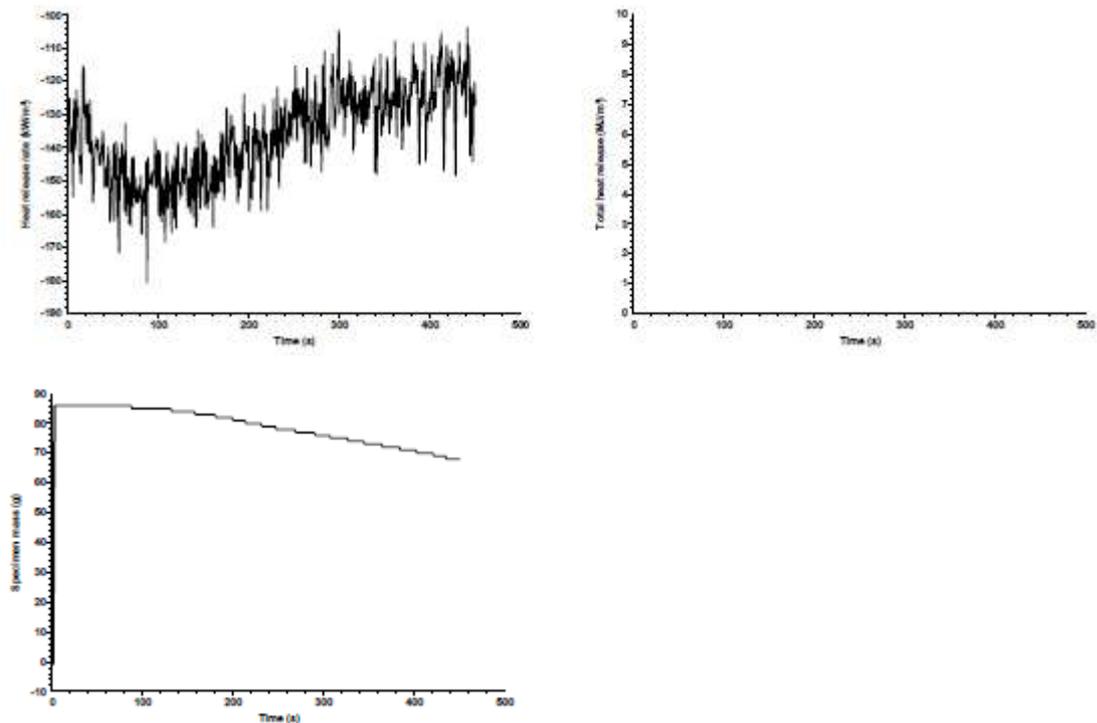


Figura A42: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA1-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	30 January 2018	Separation	25 mm
Time of test	13:11	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	6 April 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	638 s

**Test results (between 0 and 638 s)**

Total heat release	0.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88.0 g
Mass at EOT	73.0 g
Mass lost	15.0 g
Specific mass lost	1.69 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	17.0 %

**Test results (between 0 and 638 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-48.75	52.14	414
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-18.36	58.92	392
Mass at EOT	73.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.023	0.650	87
Mass lost	15.0 g				
Specific mass lost	1.69 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	17.0 %				
Average specific MLR	3.26 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-60.89	-56.61
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-47.71	-29.35
Mass loss rate (g/s)		0.011	0.017

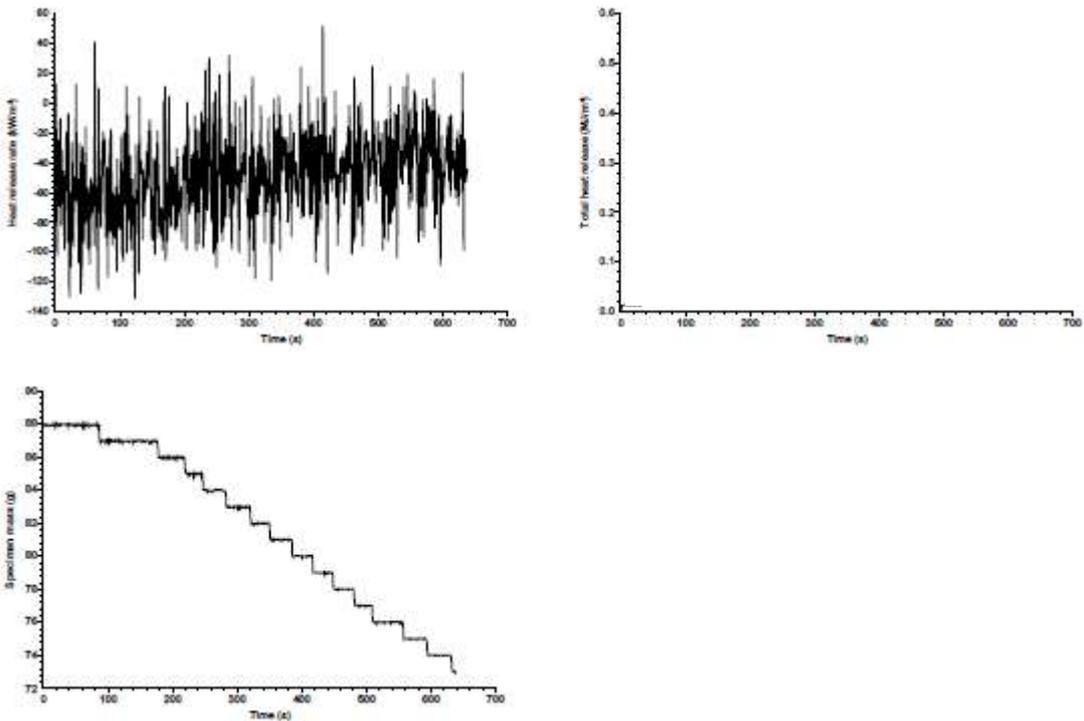


Figura A43: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA2-1.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	87 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	18:16	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	485 s

**Test results (between 0 and 485 s)**

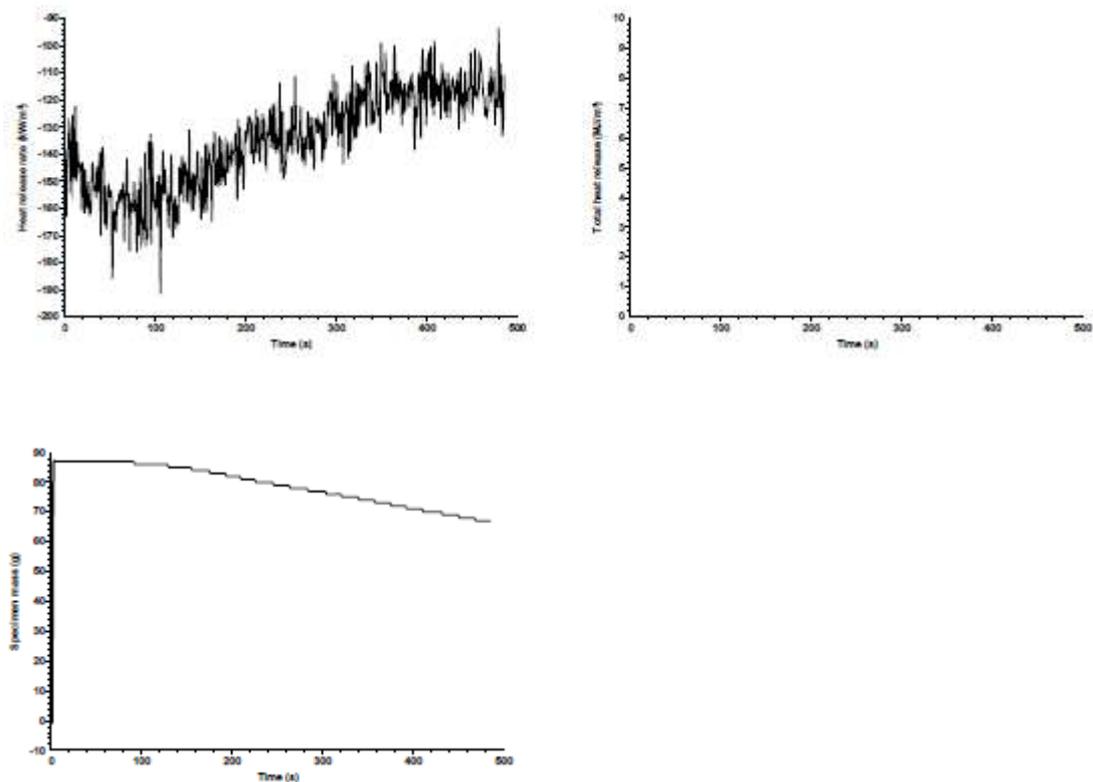
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	87.0 g
Mass at EOT	67.0 g
Mass lost	20.0 g
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	23.0 %

**Test results (between 0 and 485 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-134.77	-93.44	479
Mass at EOT	67.0 g	Mass loss rate (g/s)	-28.91	0.00	1
Mass lost	20.0 g		0.132	313.543	0
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	23.0 %				
Average specific MLR	23.0 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-152.62	-144.97
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-60.74	-38.49
Mass loss rate (g/s)		0.266	0.179



**Figura A44: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA2-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	87 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	18:32	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	474 s

**Test results (between 0 and 474 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	87.0 g
Mass at EOT	68.0 g
Mass lost	19.0 g
Specific mass lost	2.15 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	21.8 %

**Test results (between 0 and 474 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-76.83	-46.62	442
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-16.96	0.00	0
Mass at EOT	68.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.040	0.590	175
Mass lost	19.0 g				
Specific mass lost	2.15 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	21.8 %				
Average specific MLR	5.42 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-95.10	-87.06
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-37.84	-23.11
Mass loss rate (g/s)		0.021	0.033

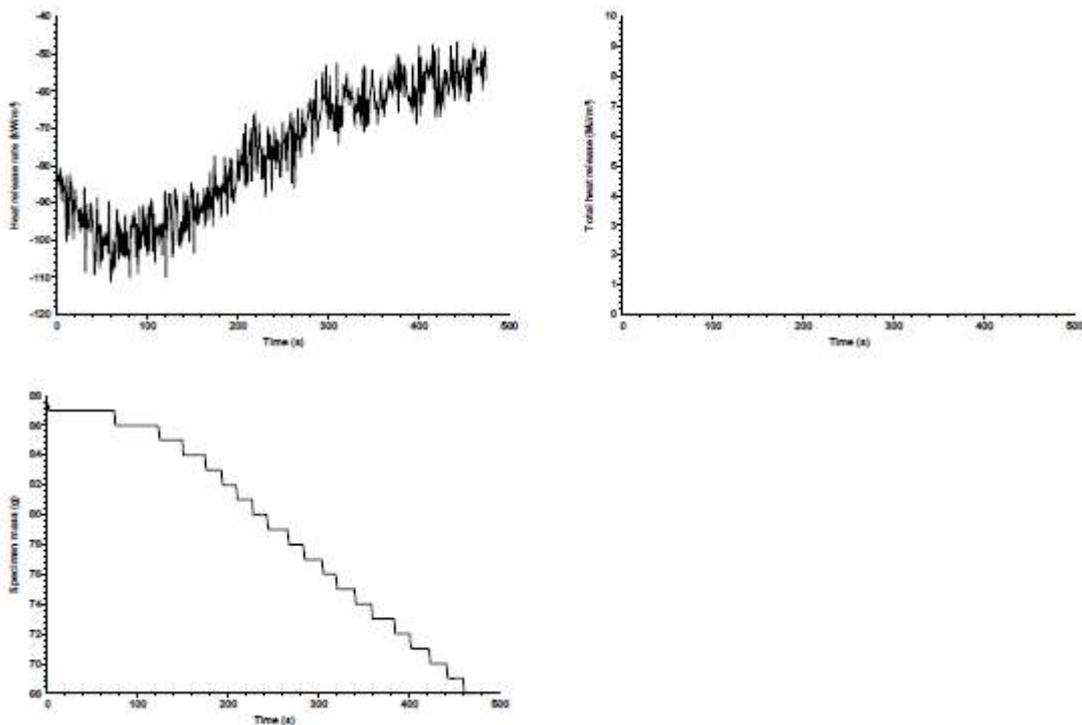


Figura A45: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA2-3.

**Specimen information**

Thickness	1 mm	Specimen number	
Initial mass	87 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	19:05	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	511 s

**Test results (between 0 and 511 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	87.0 g
Mass at EOT	66.0 g
Mass lost	21.0 g
Specific mass lost	2.37 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	24.1 %

**Test results (between 0 and 511 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-83.66	-40.97	444
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-18.01	0.00	1
Mass at EOT	66.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.122	300.317	0
Mass lost	21.0 g				
Specific mass lost	2.37 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	24.1 %				
Average specific MLR	24.1 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-98.91	-94.06
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-39.30	-24.96
Mass loss rate (g/s)	0.252	0.171

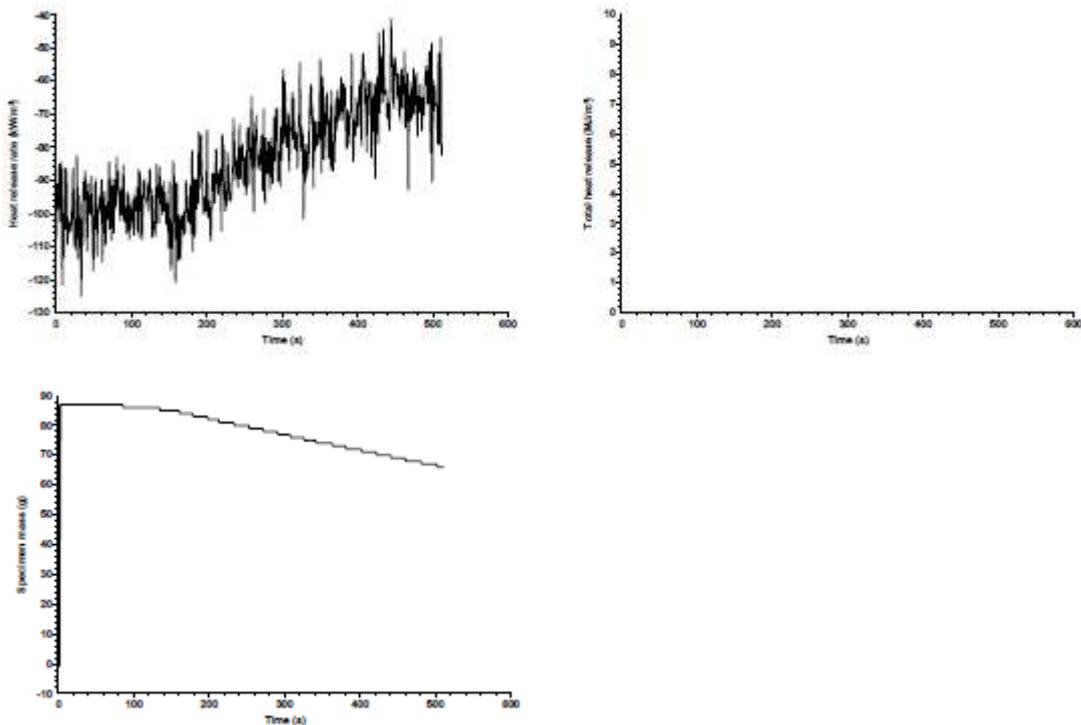


Figura A46: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA3-1.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	19:18	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	480 s

**Test results (between 0 and 480 s)**

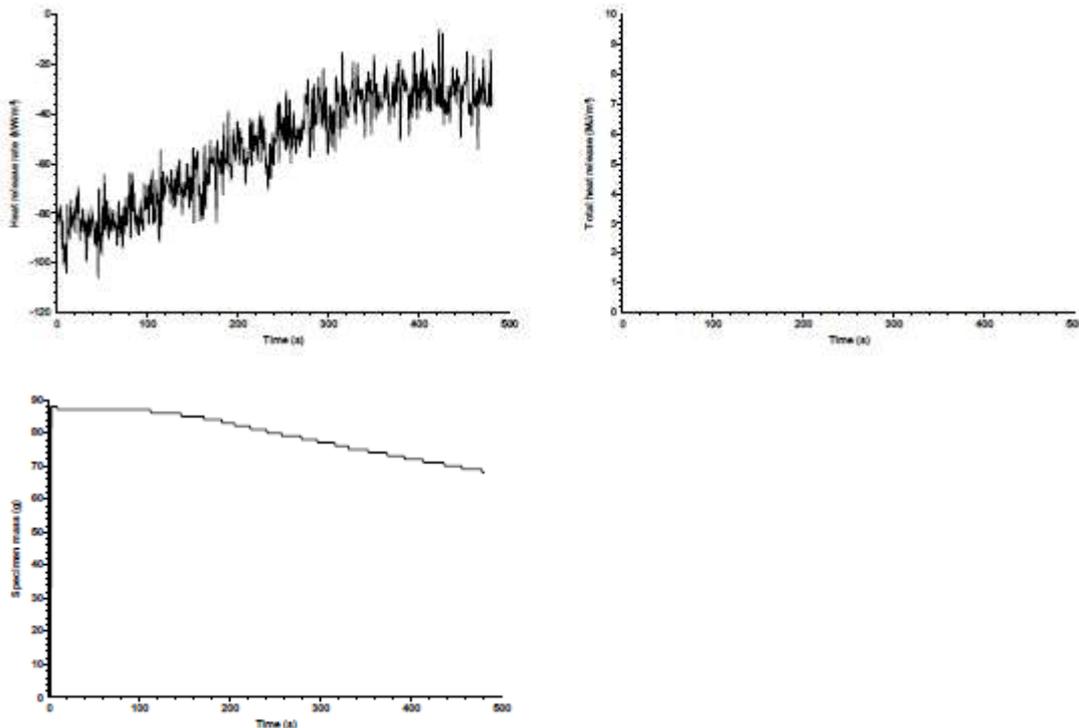
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88.0 g
Mass at EOT	68.0 g
Mass lost	20.0 g
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	22.7 %

**Test results (between 0 and 480 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-53.11	-5.76	422
Mass at EOT	68.0 g	Mass loss rate (g/s)	-11.28	0.00	1
Mass lost	20.0 g		0.148	350.594	0
Specific mass lost	2.26 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	22.7 %				
Average specific MLR	22.7 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

	<b>between time 0 and...</b>	<b>180 s</b>	<b>300 s</b>
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )		-76.78	-65.64
Effective heat of comb. (MJ/kg)		-30.59	-15.84
Mass loss rate (g/s)		0.306	0.207



**Figura A47: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA3-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	87 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	5 June 2018	Separation	25 mm
Time of test	19:33	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	8 June 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	552 s

**Test results (between 0 and 552 s)**

Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	87.0 g
Mass at EOT	63.0 g
Mass lost	24.0 g
Specific mass lost	2.71 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	27.6 %

**Test results (between 0 and 552 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.0 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-65.96	-22.09	479
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-13.42	0.00	1
Mass at EOT	63.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.135	348.527	0
Mass lost	24.0 g				
Specific mass lost	2.71 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	27.6 %				
Average specific MLR	27.6 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-90.06	-80.65
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-35.79	-19.46
Mass loss rate (g/s)	0.304	0.205

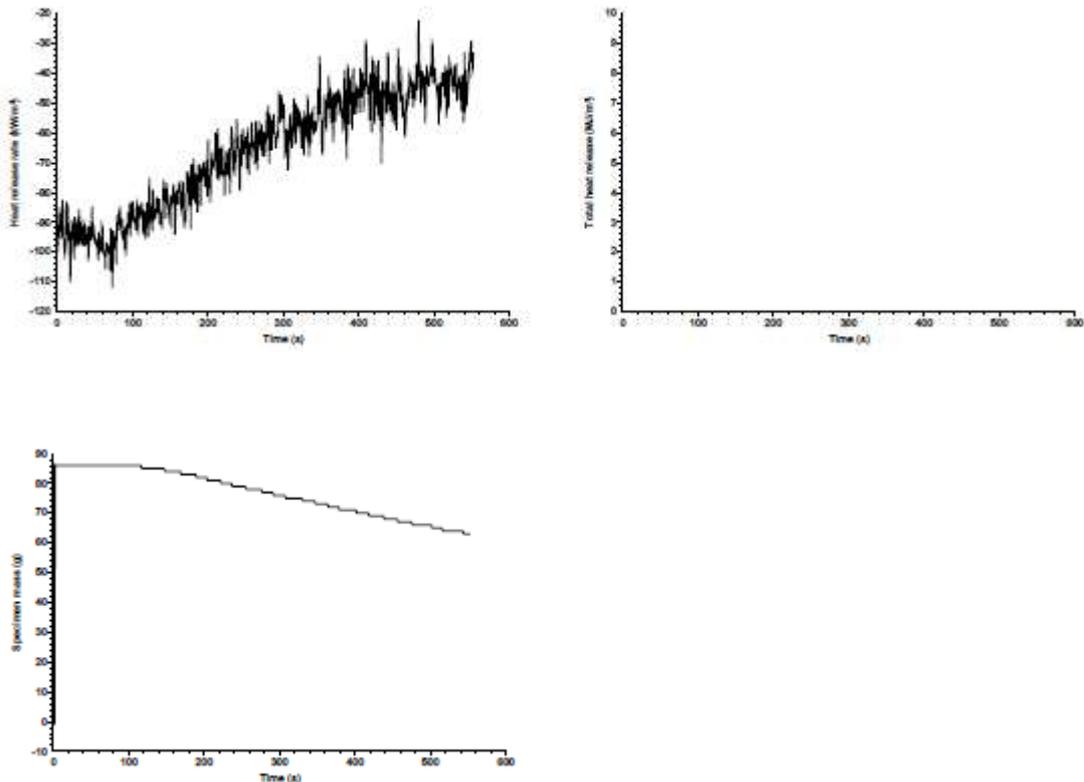


Figura A48: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA3-3.

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88,4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	30 January 2018	Separation	25 mm
Time of test	13:11	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	6 April 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	638 s

**Test results (between 0 and 638 s)**

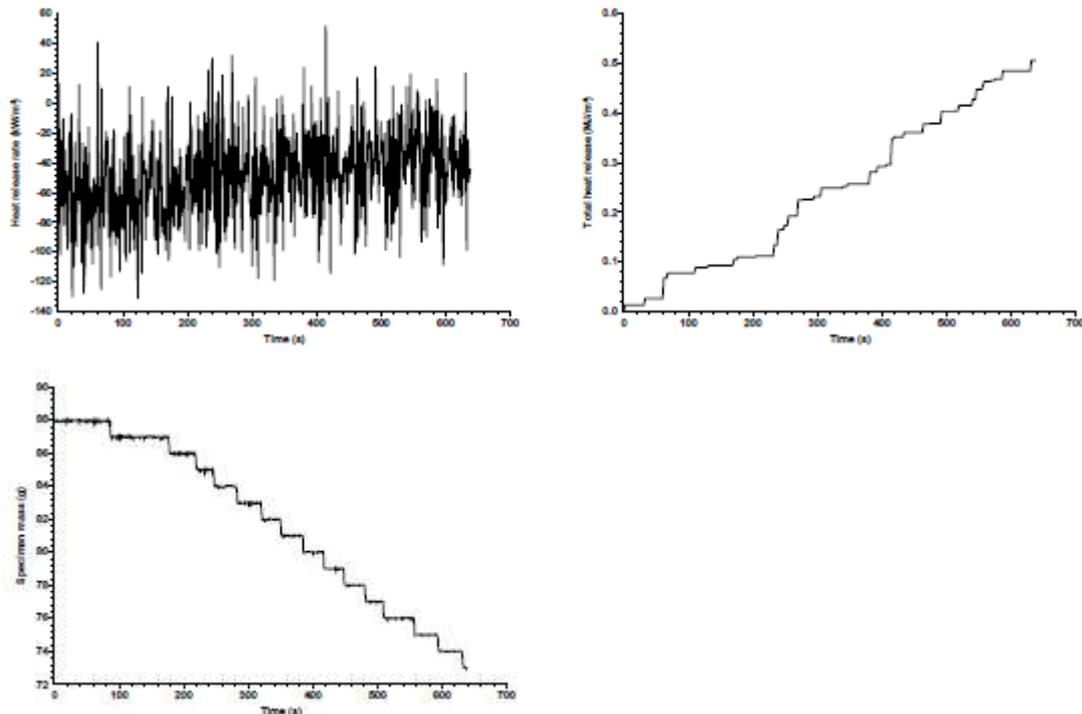
Total heat release	0.5 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88,0 g
Mass at EOT	73,0 g
Mass lost	15,0 g
Specific mass lost	1.69 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	17,0 %

**Test results (between 0 and 638 s)**

Total heat release	0.5 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-48.75	52.14	414
Mass at EOT	73,0 g	Mass loss rate (g/s)	-18.36	58.92	392
Mass lost	15,0 g		0.023	0.650	87
Specific mass lost	1.69 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	17,0 %				
Average specific MLR	3.26 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

<b>between time 0 and...</b>	<b>180 s</b>	<b>300 s</b>
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-60.89	-56.61
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-47.71	-29.35
Mass loss rate (g/s)	0.011	0.017



**Figura A49: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA4-1.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	89 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	30 January 2018	Separation	25 mm
Time of test	13:30	HRR Calibration filename	C:\MLCCALC\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	6 April 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	606 s

**Test results (between 0 and 606 s)**

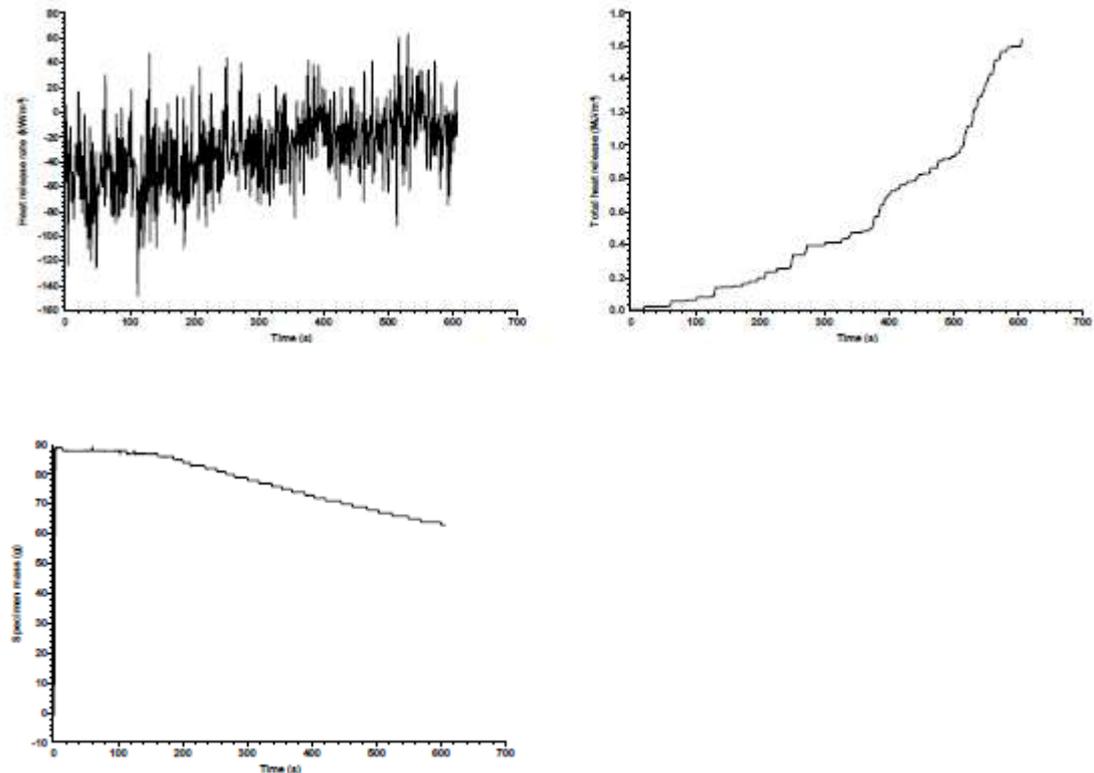
Total heat release	1.6 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	89.0 g
Mass at EOT	63.0 g
Mass lost	26.0 g
Specific mass lost	2.94 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	29.2 %

**Test results (between 0 and 606 s)**

Total heat release	1.6 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	Mean	Peak	at time (s)
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-30.76	63.09	530
Mass at EOT	63.0 g	Mass loss rate (g/s)	-6.35	60.05	555
Mass lost	26.0 g		0.105	284.859	0
Specific mass lost	2.94 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	29.2 %				
Average specific MLR	29.2 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

<b>between time 0 and...</b>	<b>180 s</b>	<b>300 s</b>
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-50.86	-44.74
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-26.62	-11.48
Mass loss rate (g/s)	0.227	0.161



**Figura A50: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA4-2.**

**Specimen information**

Thickness	5 mm	Specimen number	
Initial mass	88 g	Manufacturer	
Surface area	88.4 cm <sup>2</sup>	Sponsor	
Conditioned?	No	Edge frame used?	Yes
Temperature	N/A	Fixed to substrate?	No
RH	N/A	Substrate	N/A

**Test**

Standard used	ISO 13927	Heat flux	50 kW/m <sup>2</sup>
Date of test	30 January 2018	Separation	25 mm
Time of test	13:47	HRR Calibration filename	C:\MLOCAL\CALIB\C1403002.PRN
Date of report	6 April 2018	Gradient	0.766518 mV/kW
Sampling interval	1 s	Intercept	0 kW

**Test times**

Time to ignition	not recorded
Time to flameout	s
End of test time (for calculations)	601 s

**Test results (between 0 and 601 s)**

Total heat release	0.9 MJ/m <sup>2</sup>
Initial mass	88.0 g
Mass at EOT	63.0 g
Mass lost	25.0 g
Specific mass lost	2.82 kg/m <sup>2</sup>
Percentage mass lost	28.4 %

**Test results (between 0 and 601 s)**

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	0.9 MJ/m <sup>2</sup>	Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-38.33	70.69	265
Mass at sustained flaming	no ignition	Effective heat of comb. (MJ/kg)	-8.16	54.44	410
Mass at EOT	63.0 g	Mass loss rate (g/s)	0.042	2.117	0
Mass lost	25.0 g				
Specific mass lost	2.82 kg/m <sup>2</sup>				
Percentage mass lost	28.4 %				
Average specific MLR	5.71 g/(m <sup>2</sup> ·s)				

**Test averages**

between time 0 and...	180 s	300 s
Heat release rate (kW/m <sup>2</sup> )	-56.66	-46.43
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-17.79	-11.16
Mass loss rate (g/s)	0.029	0.037

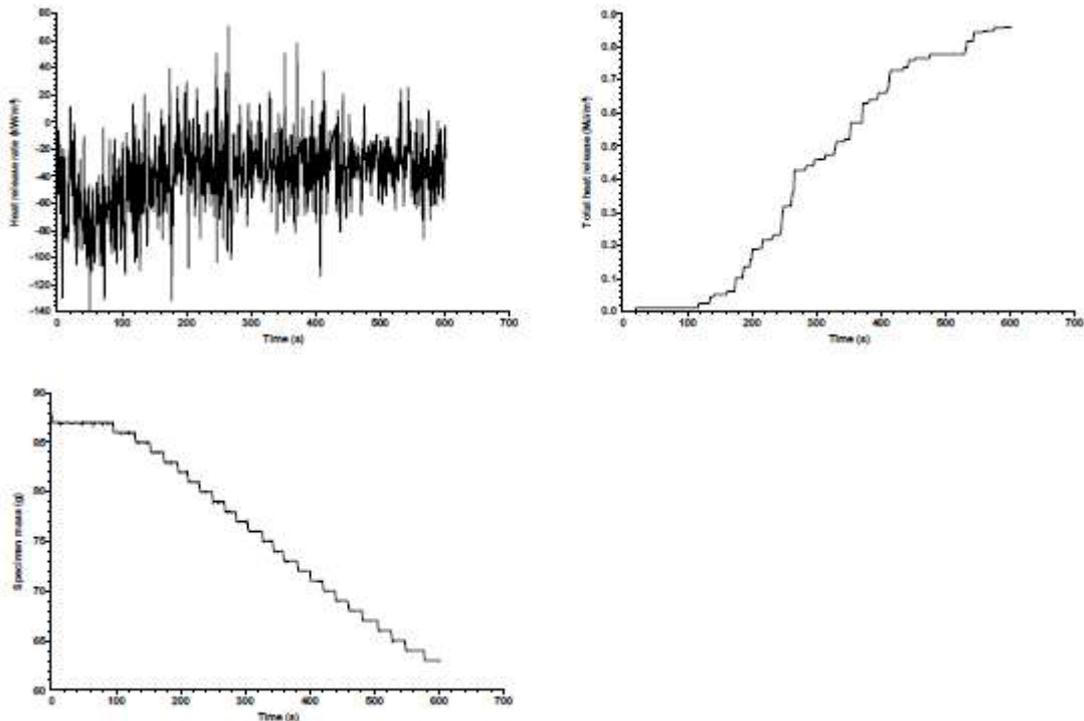


Figura A51: resultados experimentais obtidos pelo CCPM para amostra PA4-3.

# **B**

## **Anexo B: tabela com todos os resultados das amostras dos equipamentos LOI, UL-94 e fio incandescente**

Os resultados da Tabela A estão separados por identificação das amostras, número de corpos de prova e equipamentos. No equipamento LOI, é apresentada a taxa de oxigênio que a amostra apresentou ignição e sem ignição. No UL-94, é apresentado o primeiro tempo do cessar chamas, o segundo tempo (o cessar chamas forçado é representado por -), se houve gotejamento e a classificação quanto à norma UL-94. No equipamento fio incandescente, é apresentada a temperatura utilizada no ensaio, o primeiro tempo do cessar chamas, o segundo tempo, se houve gotejamento e a temperatura GWFI e GWIT. Os dados obedecem a ordem das amostras tratada na Tabela 4.1, ou seja, V, VA, VB, VAB, P, PA, PB, PAB, PBC1, PBC2, PABC1, PABC2, F, PA1, PA2, PA3 e PA4.

**Tabela B.** Avaliação da inflamabilidade através dos equipamentos: LOI, UL-94 e Fio incandescente para PFRV.

Id's	cpo's	LOI			UL-94				Fio incandescente (°C)					
		Com Ignição	Sem ignição	LOI	t1 (s)	t2 (s)	Got.*	Classificação	Temp. °C	ti (s)	te (s)	Got.*	GWFI (°C)	GWIT (°C)
V	1	22%		21%	13	-	NÃO	Não classifica	960	1	50	NÃO	960	850
	2	22%			1	-	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		21%		15	-	NÃO		960	1	38	NÃO		
	4		21%		1	-	NÃO		825	0	0	NÃO		
	5				1	-	NÃO		825	0	0	NÃO		
	6								825	0	0	NÃO		
VA	1	25%		24%	0	0	NÃO	V0	960	1	32	NÃO	960	875
	2	25%			0	5	NÃO		960	1	28	NÃO		
	3		24%		0	0	NÃO		960	1	34	NÃO		
	4		24%		0	2	NÃO		850	0	0	NÃO		
	5				0	2	NÃO		850	0	0	NÃO		
	6								850	0	0	NÃO		
VB	1	24%		23%	47	0	NÃO	Não classifica	960	1	34	NÃO	960	850
	2	24%			34	-	NÃO		960	1	32	NÃO		
	3		23%		36	40	NÃO		960	1	33	NÃO		
	4		23%		60	0	NÃO		825	0	0	NÃO		
	5				34	30	NÃO		825	0	0	NÃO		
	6								825	0	0	NÃO		
VAB	1	27%		26%	0	0	NÃO	V0	960	1	33	NÃO	960	875
	2	27%			0	0	NÃO		960	1	33	NÃO		
	3		26%		0	0	NÃO		960	1	31	NÃO		
	4		26%		0	0	NÃO		850	0	0	NÃO		
	5				0	0	NÃO		850	0	0	NÃO		
	6								850	0	0	NÃO		
P	1	22%		21%	1	-	NÃO	Não classifica	800	1	-	NÃO	800	850
	2	22%			1	-	NÃO		800	1	-	NÃO		
	3		21%		1	-	NÃO		800	1	-	NÃO		
	4		21%		1	-	NÃO		825	0	0	NÃO		
	5				1	-	NÃO		825	0	0	NÃO		
	6								825	0	0	NÃO		
PA	1	24%		23%	2	-	NÃO	Não classifica	960	1	33	NÃO	960	875
	2	24%			1	-	NÃO		960	1	34	NÃO		
	3		23%		0	0	NÃO		960	1	32	NÃO		
	4		23%		1	-	NÃO		850	0	0	NÃO		
	5				0	0	NÃO		850	0	0	NÃO		
	6								850	0	0	NÃO		
PB	1	23%		22%	0	0	NÃO	Não classifica	960	1	31	NÃO	960	875
	2	23%			0	-	NÃO		960	1	34	NÃO		
	3		22%		1	80	NÃO		960	1	32	NÃO		
	4		22%		3	110	NÃO		850	0	0	NÃO		
	5				10	40	NÃO		850	0	0	NÃO		
	6								850	0	0	NÃO		
PAB	1	26%		25%	0	0	NÃO	V0	960	1	31	NÃO	960	875
	2	26%			0	0	NÃO		960	1	33	NÃO		
	3		25%		0	0	NÃO		960	1	33	NÃO		
	4		25%		0	0	NÃO		850	0	0	NÃO		
	5				0	0	NÃO		850	0	0	NÃO		
	6								850	0	0	NÃO		
PBC1	1	34%		33%	0	0	NÃO	V0	960	1	50	NÃO	960	930

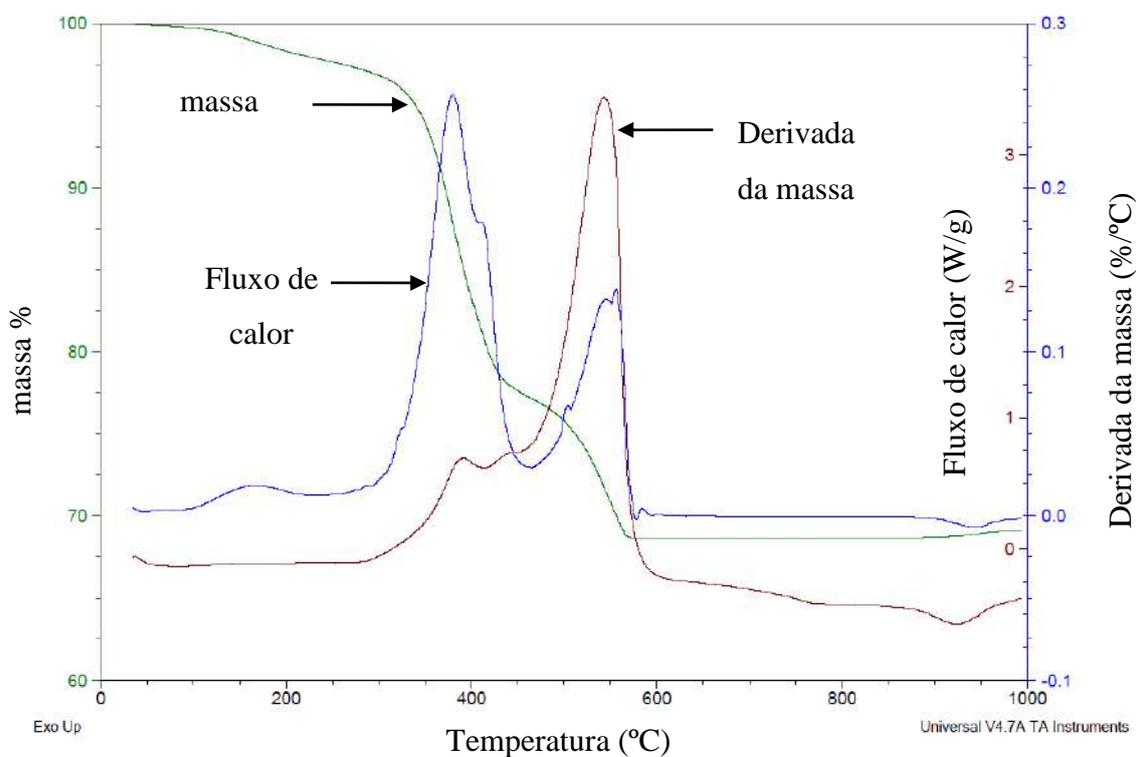
	2	34%		0	0	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		33%	0	0	NÃO		960	1	38	NÃO		
	4		33%	0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
PBC2	1	37%		0	0	NÃO		960	1	50	NÃO		
	2	37%		0	0	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		36%	0	0	NÃO	V0	960	1	38	NÃO	960	930
	4		36%	0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
PABC1	1	34%		0	0	NÃO		960	1	36	NÃO		
	2	34%		0	0	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		33%	0	0	NÃO	V0	960	1	32	NÃO	960	930
	4		33%	0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
PABC2	1	38%		0	0	NÃO		960	1	31	NÃO		
	2	38%		0	0	NÃO		960	1	32	NÃO		
	3		37%	0	0	NÃO	V0	960	1	34	NÃO	960	930
	4		37%	0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		900	0	0	NÃO		
F	1	65%		0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	2	65%		0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	3		64%	0	0	NÃO	V0	960	0	0	NÃO	960	960
	4		64%	0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
PA1	1	26%		0	0	NÃO		875	1	50	NÃO		
	2	26%		0	0	NÃO		875	1	30	NÃO	960	875
	3		27%	0	0	NÃO	V0	875	1	38	NÃO		
	4		27%	0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		960	0	0	NÃO		
PA2	1	30%		0	0	NÃO		960	1	50	NÃO		
	2	30%		0	0	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		29%	0	0	NÃO	V0	960	1	38	NÃO	960	875
	4		29%	0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
PA3	1	31%		0	0	NÃO		960	1	36	NÃO		
	2	31%		0	0	NÃO		960	1	30	NÃO		
	3		30%	0	0	NÃO	V0	960	1	32	NÃO	960	875
	4		30%	0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
PA4	1	31%		0	0	NÃO		960	1	31	NÃO		
	2	31%		0	0	NÃO		960	1	32	NÃO		
	3		30%	0	0	NÃO	V0	960	1	34	NÃO	960	875
	4		30%	0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	5			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		
	6			0	0	NÃO		875	0	0	NÃO		

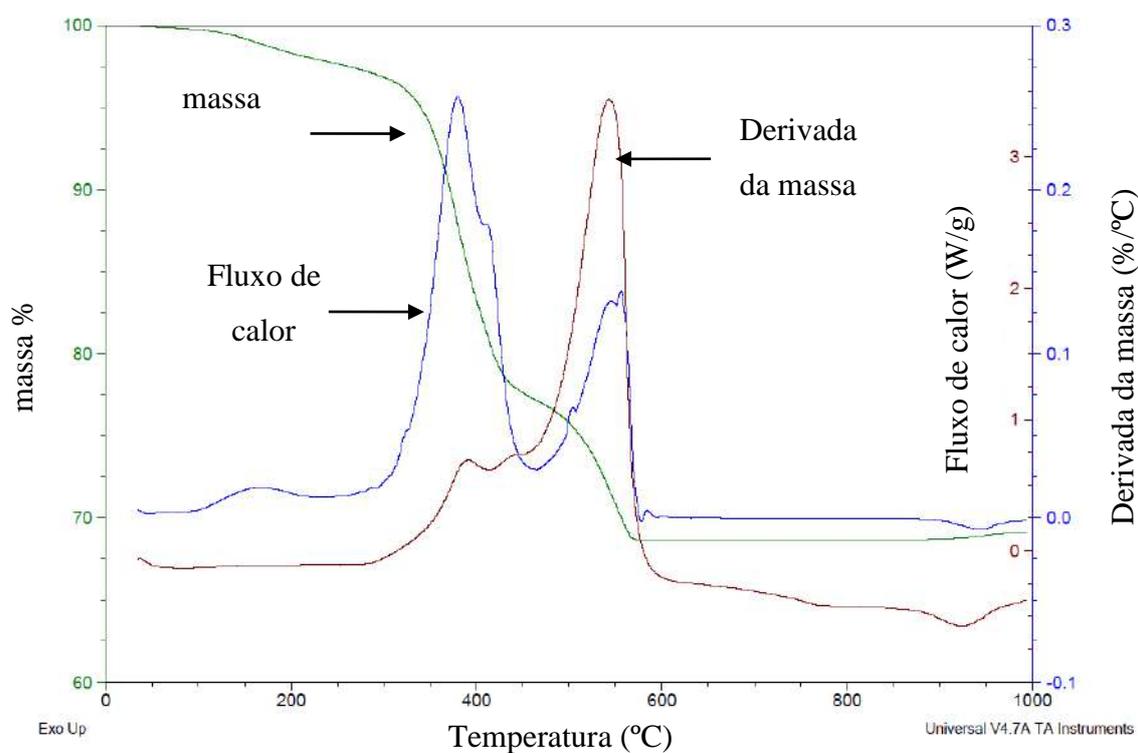
Obs1: Got\* significa gotejamento; Obs2: - significa que o cessar chamadas teve que ser forçado.

# C

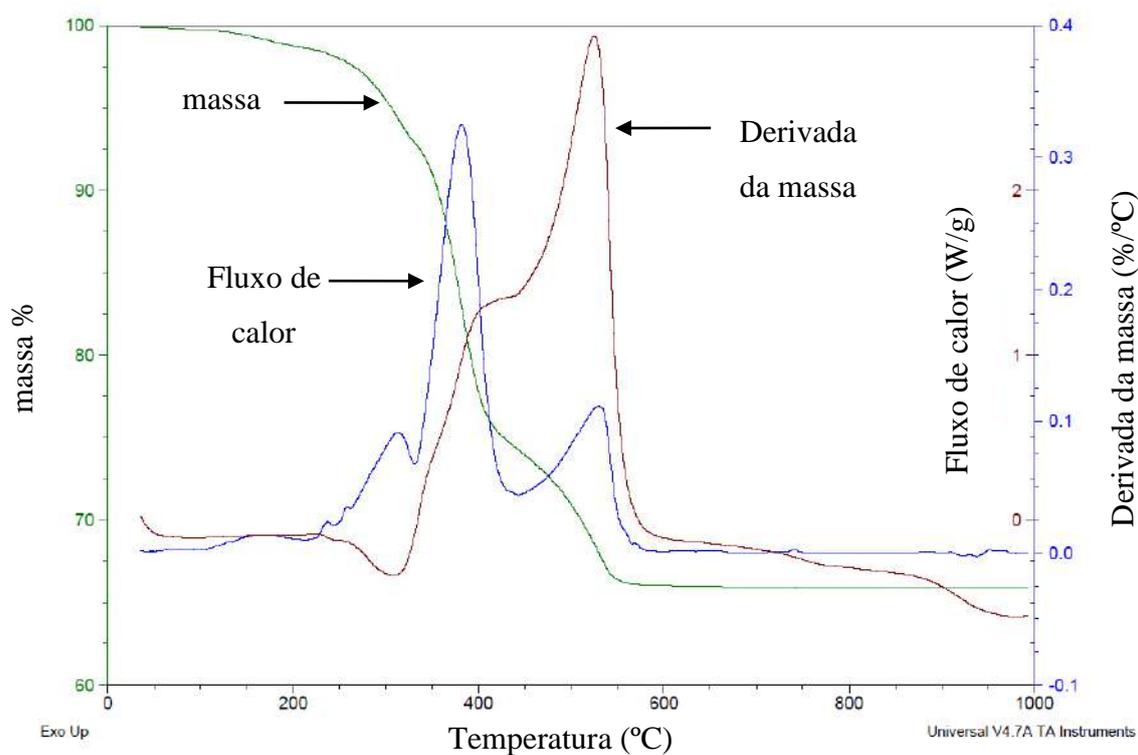
## Anexo C: Análise simultânea de termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Este anexo traz todos os resultados experimentais da análise simultânea de termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) obtidos no curso da campanha experimental desenvolvida. Abaixo segue um modelo explicando como se apresenta o relatório emitido pelo equipamento. Os relatórios obedecem a ordem das amostras tratada na Tabela 4.1, ou seja, V, VA, VB, VAB, P, PA, PB, PAB, PBC1, PBC2, PABC1, PABC2, PA1, PA2, PA3, PA4 e F.

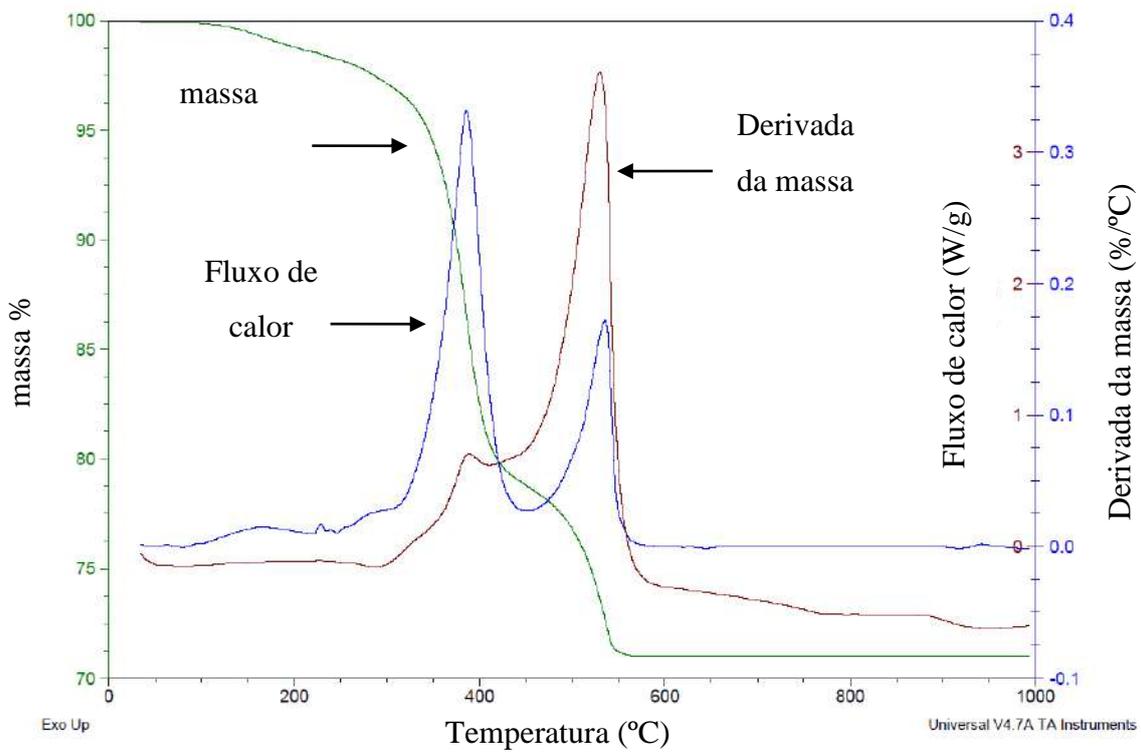




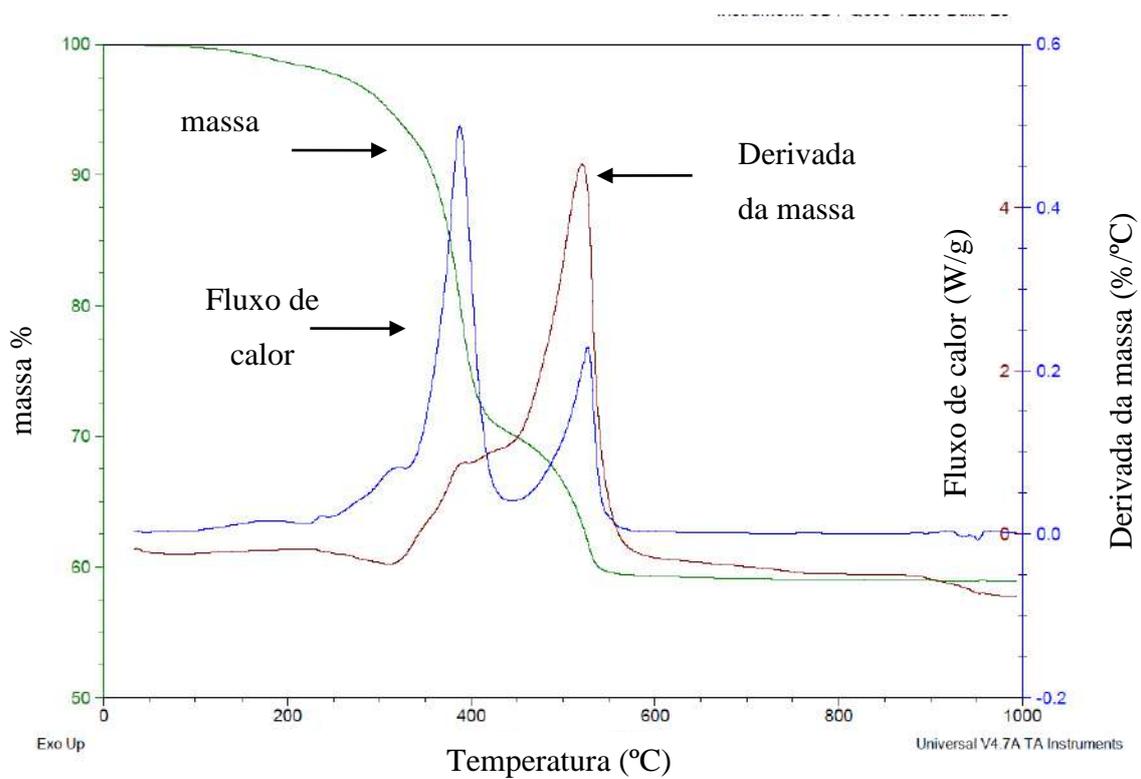
**Figura C1: análise simultânea TGA/DSC para amostra V.**



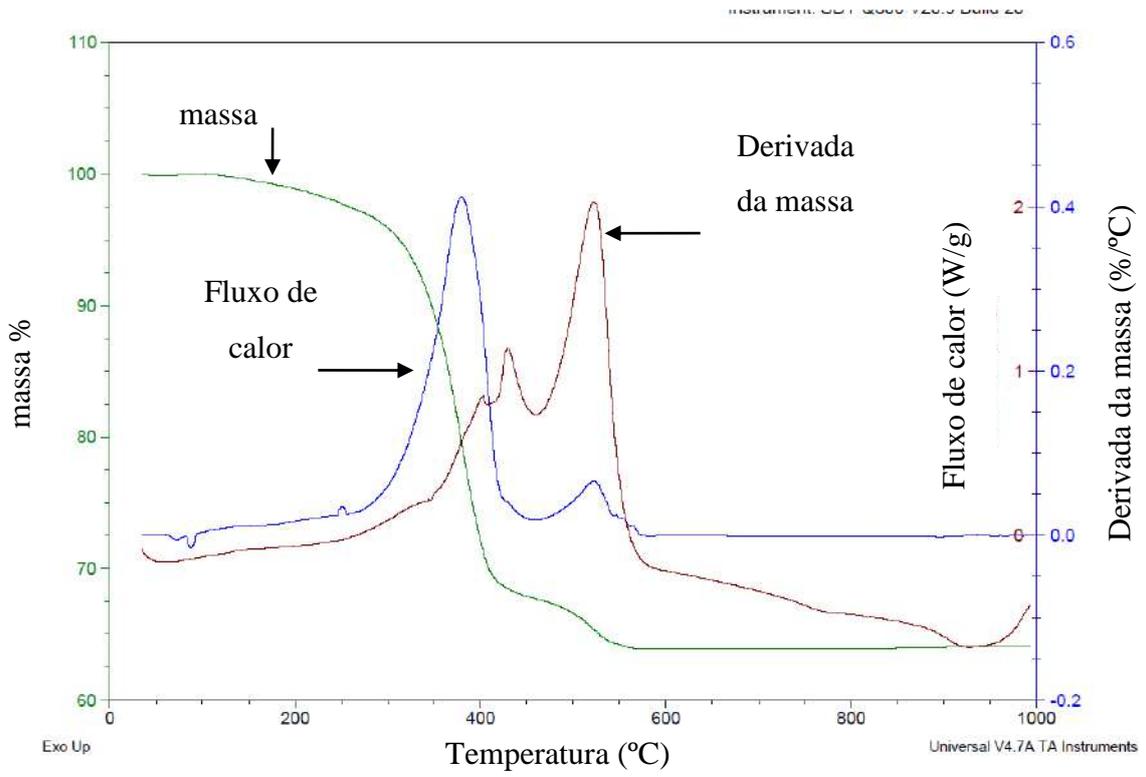
**Figura C2: análise simultânea TGA/DSC para amostra VA.**



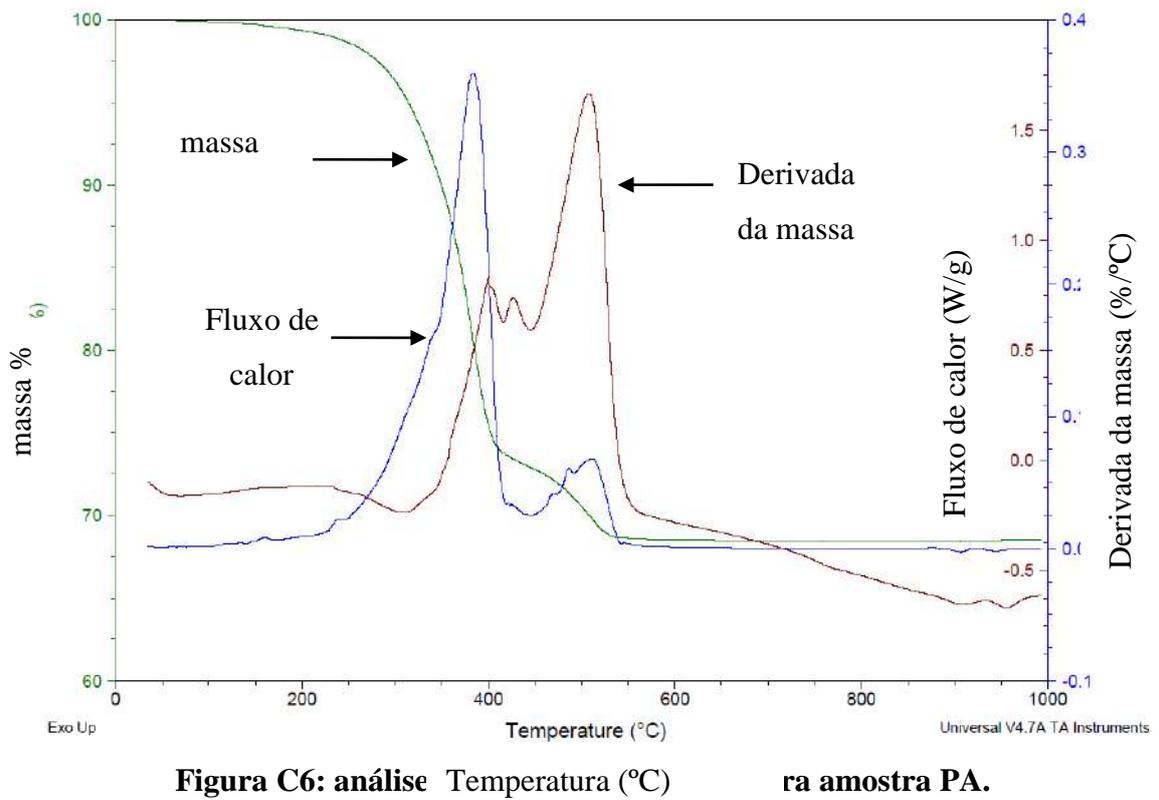
**Figura C3: análise simultânea TGA/DSC para amostra VB.**



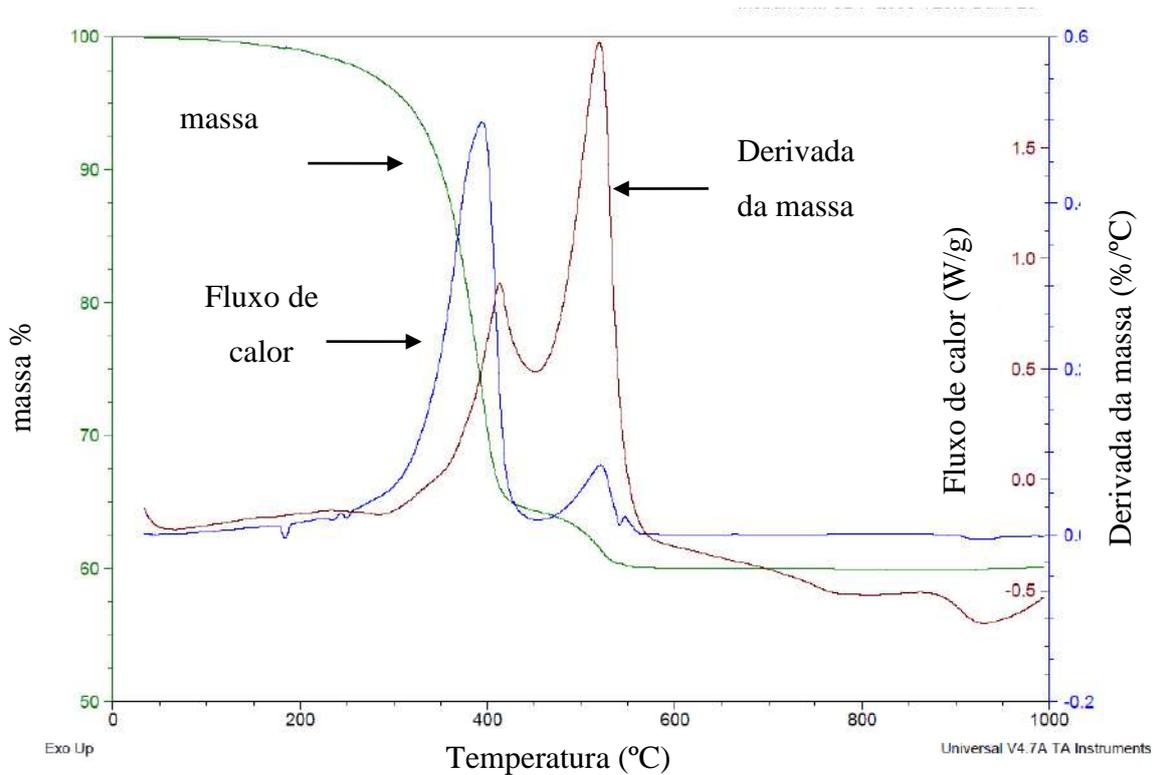
**Figura C4: análise simultânea TGA/DSC para amostra VAB.**



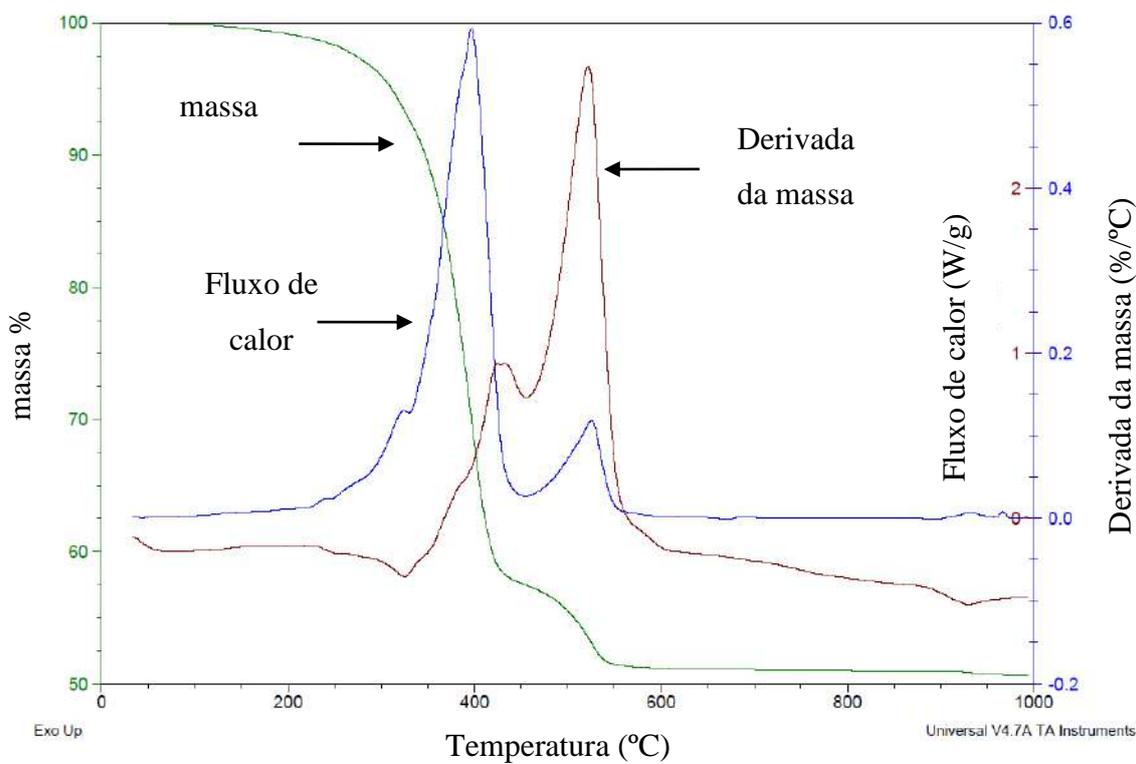
**Figura C5: análise simultânea TGA/DSC para amostra P.**



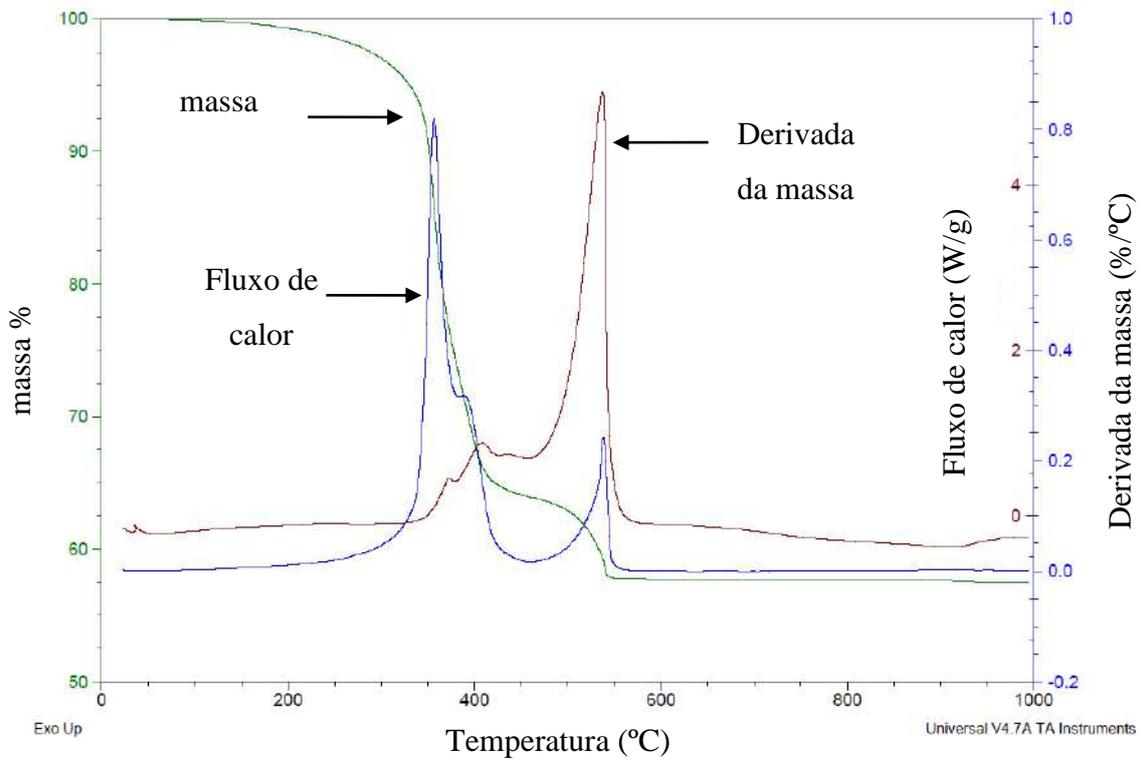
**Figura C6: análise TGA/DSC para amostra PA.**



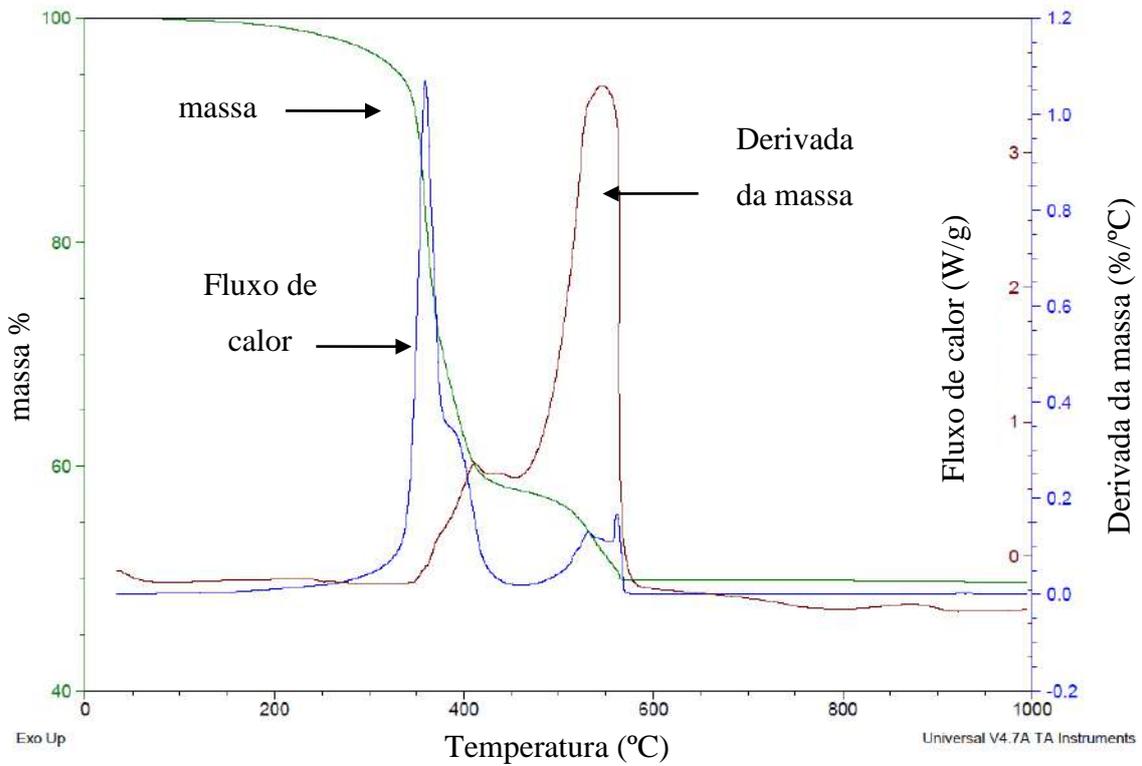
**Figura C7: análise simultânea TGA/DSC para amostra PB.**



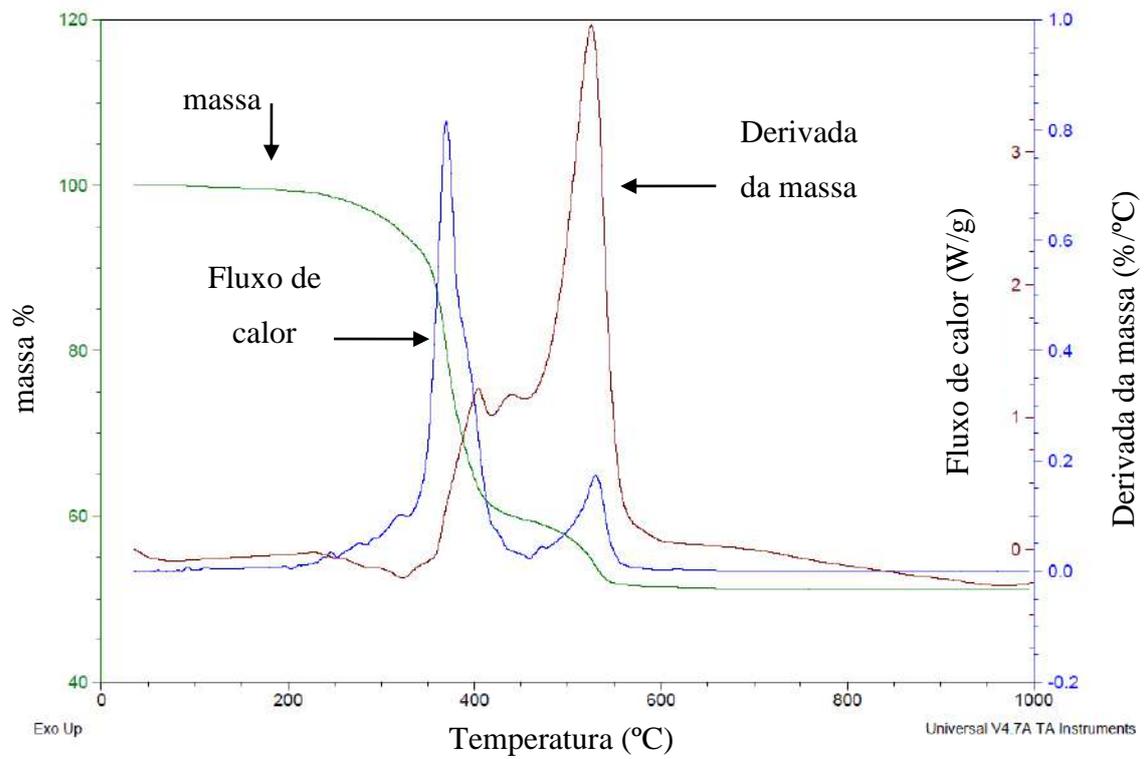
**Figura C8: análise simultânea TGA/DSC para amostra PAB.**



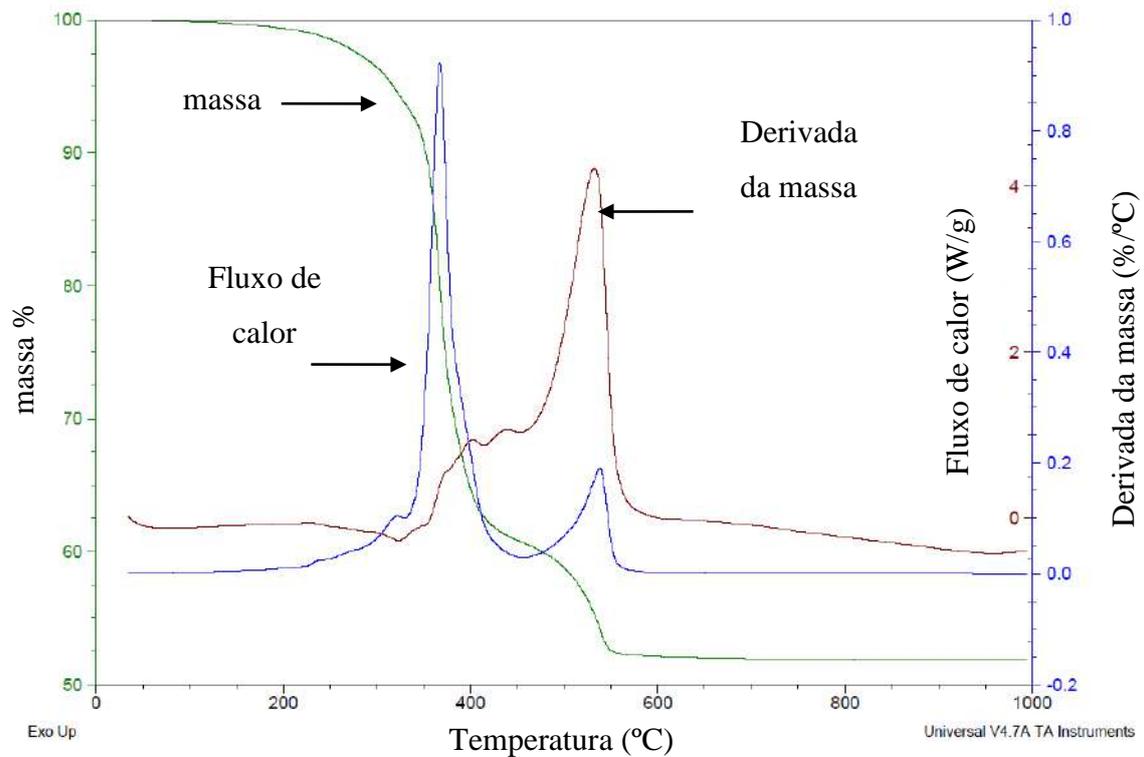
**Figura C9: análise simultânea TGA/DSC para amostra PBC1.**



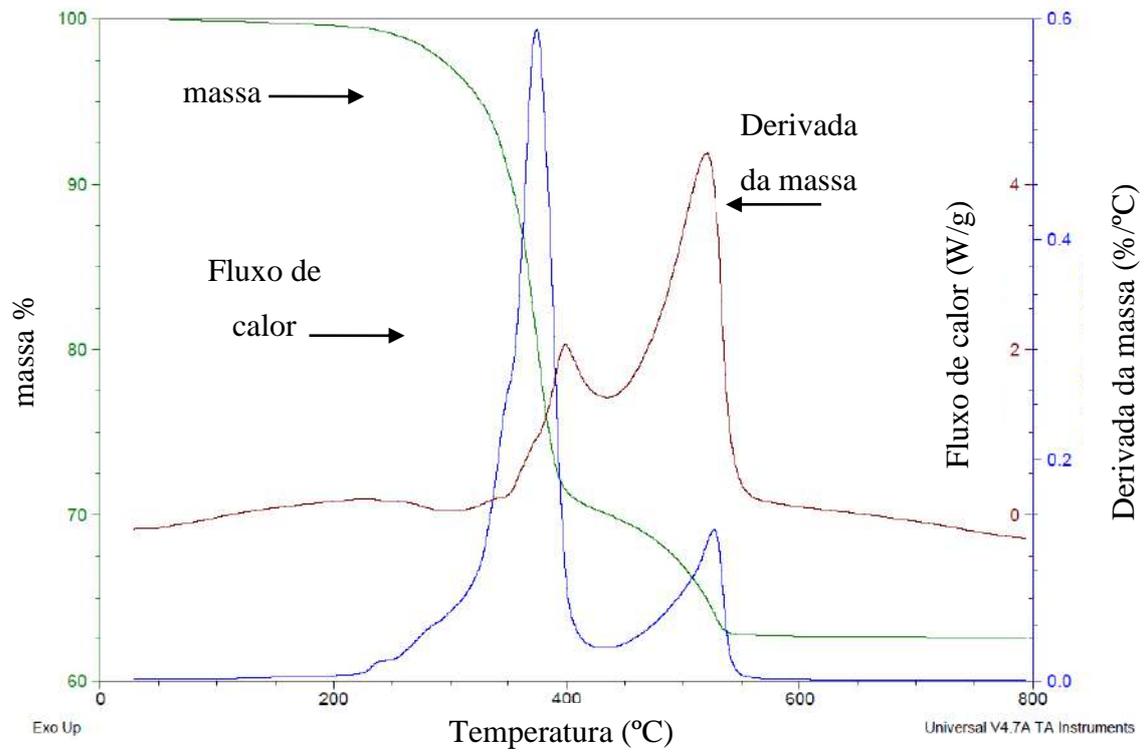
**Figura C10: análise simultânea TGA/DSC para amostra PBC2.**



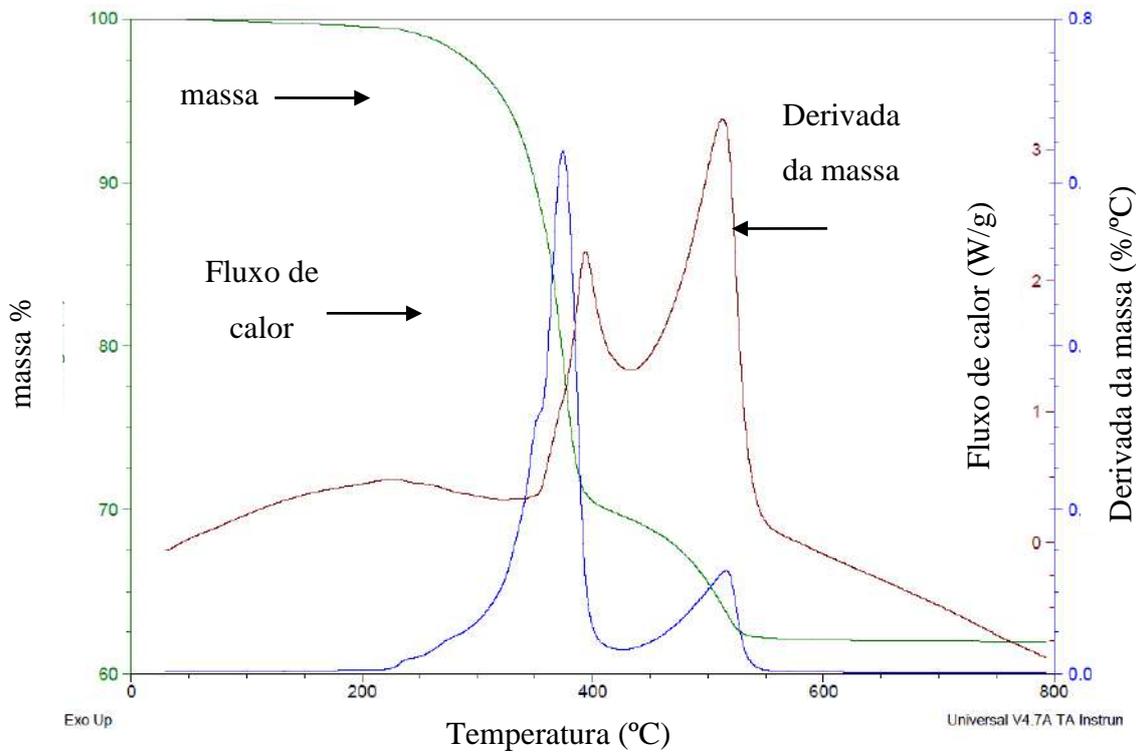
**Figura C11: análise simultânea TGA/DSC para amostra PABC1.**



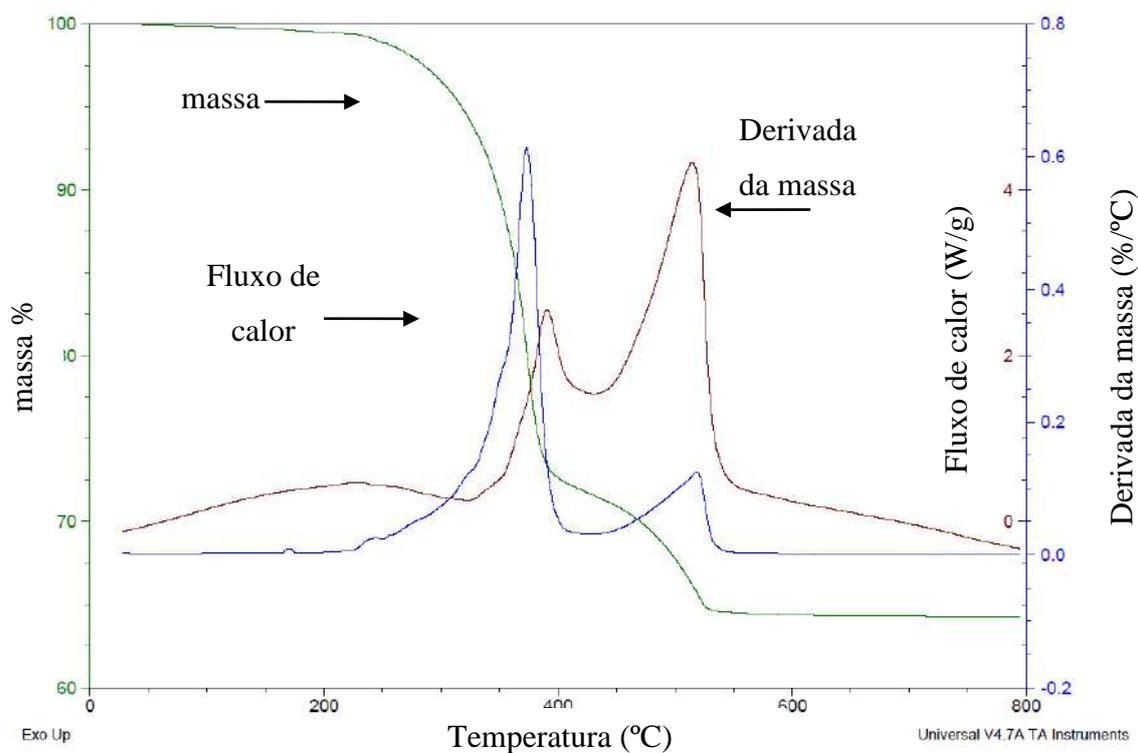
**Figura C12: análise simultânea TGA/DSC para amostra PABC2.**



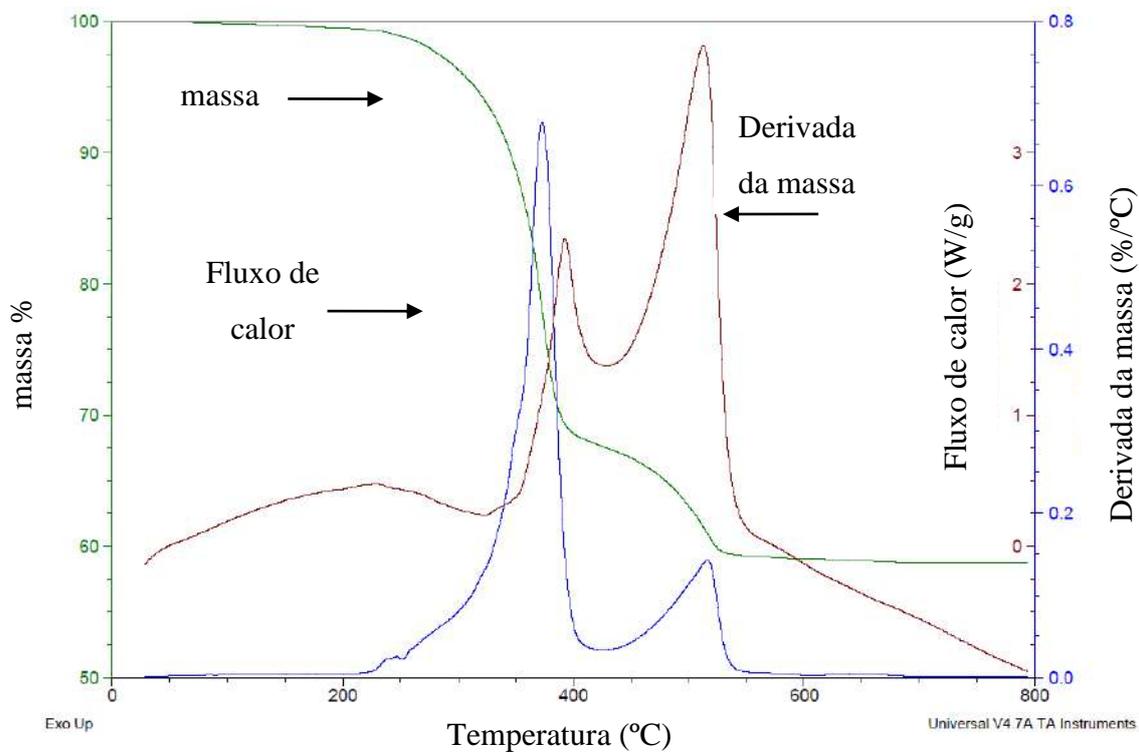
**Figura C13: análise simultânea TGA/DSC para amostra PA1.**



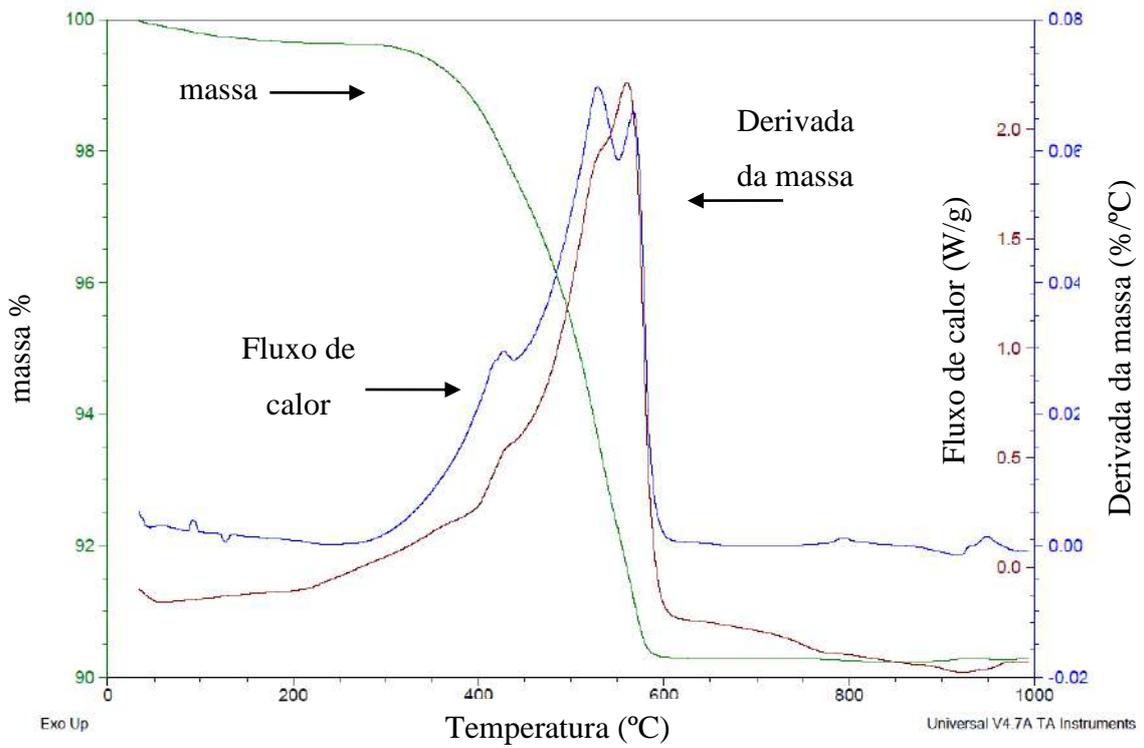
**Figura C14: análise simultânea TGA/DSC para amostra PA2.**



**Figura C15: análise simultânea TGA/DSC para amostra PA3.**



**Figura C16: análise simultânea TGA/DSC para amostra PA4.**



**Figura C17: análise simultânea TGA/DSC para amostra F.**