

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ORIDES DANILO LOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA PARA ENSAIO DE  
INFLAMABILIDADE VERTICAL E HORIZONTAL E ENSAIOS NA  
POLIURETANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017

ORIDES DANILO LOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA PARA ENSAIO DE  
INFLAMABILIDADE VERTICAL E HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Curso de Engenharia Mecânica



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA DE ENSAIO DE INFLAMABILIDADE  
VERTICAL E HORIZONTAL E ENSAIOS NA POLIURETANA

POR

ORIDES DANILO LOTTO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 10:20 hs do dia 12 de Junho de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa - Presidente (UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Amauri Bravo Ferneda - (UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Prof. Me. José Aparecido Lopes Junior - (UTFPR)

“A Folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso.”

Dedico este trabalho à minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado, sejam nos momentos difíceis ou não, fazendo com que nunca me deixassem desistir dos meus objetivos e incentivando cada vez mais para alcançá-los.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos concedidas em minha vida.

À minha mãe, Maria Teresa Almiche, que diante a muitas dificuldades nunca mediu esforços para eu alcançar meus objetivos.

Ao meu pai, José Mauro Lotto.

Ao meu irmão, José Mauro Lotto Filho.

Ao Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa que, além de orientador, é um grande amigo que me proporcionou um grande conhecimento e me guiou nesta trajetória.

Aos meus companheiros de estudo e de laboratório, em especial Amanda Albertin, contribuindo com o mestrado da mesma.

À minha grande amiga Dâmaris Guerra, que sempre esteve ao meu lado me aconselhando da melhor forma possível.

Aos meus grandes amigos, Diego Vinicius Aguiar, Fernando Zoli, Yuri Andrade, Fabricio Amaral e Luiz Gaborin, que fiz durante a universidade e na qual tive o privilégio de passar alguns dos melhores momentos da minha vida ao lado deles.

Ao Wanderlei Malaquias por toda ajuda durante a fase de construção da câmara de inflamabilidade.

Às industrias Kehl, pelo fornecimento da poliuretana.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Não chore pelo que você perdeu, lute pelo que você tem.

Não chore pelo que está morto, lute por aquilo que nasceu em você.

Não chora por quem o abandonou, lute por quem está ao seu lado.

Não chore por quem o odeia, lute por quem o quer feliz.

Não chore pelo seu passado, lute pelo seu presente.

Não chore pelo seu sofrimento, lute pela sua felicidade.

Não é fácil ser feliz, temos que abrir mão de várias coisas, fazer escolhas e ter coragem de assumir ônus e bônus para ser feliz.

Com o tempo vamos aprendendo que nada é impossível de solucionar, apenas siga adiante com quem quer e luta para estar com você.

Se engana quem acha que a riqueza e o status atraem inveja...

As pessoas invejam mesmo é o sorriso fácil, a luz própria, a felicidade simples e sincera e a paz interior.

(Papa Francisco)

## RESUMO

LOTTO, Orides Danilo. **Desenvolvimento de uma câmara para ensaio de inflamabilidade vertical e horizontal e ensaios na poliuretana.** 2017. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Diante do elevado número de materiais compósitos poliméricos utilizados nas indústrias automobilísticas, aeronáuticas e entre outras, viu-se a necessidade de ensaios de inflamabilidade para identificarmos os diferentes comportamentos dos materiais quando submetidos às condições de incêndio. Deste modo, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma câmara de inflamabilidade para testes verticais e horizontais e avaliação do comportamento de inflamabilidade da poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais (PU) pura e aditivada com Alumina Tri-hidratada (ATH). A ATH é um tipo de retardante de chama aditivo, que tem como função reduzir ou extinguir o fogo nos materiais em caso de incêndio. A etapa inicial do trabalho é a construção da câmara, possibilitando que os testes sejam feitos tanto na horizontal quanto na vertical. Para efeito de comparação e estudos, foram caracterizadas a PU pura e a PU aditivada com 10%, 20% e 30% de ATH. Os comportamentos de inflamabilidade serão avaliados conforme os ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal de chama. Com relação ao ensaio verticais, não foi possível classificar o material devido à demora da extinção da chama. E no ensaio horizontal observa-se que a poliuretana (PU) pura apresentam uma velocidade de queima muito maior que a mesma aditivada com 10%, 20% e 30% de ATH.

**Palavras-chave:** Inflamabilidade; Poliuretana; Alumina tri-hidrata; Ensaio Horizontal; Ensaio Vertical.

## ABSTRACT

LOTTO, Orides Danilo. **Development of a chamber for vertical and horizontal flammability tests and polyurethane tests.** 2017. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia de Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

In view of the high number of polymer composites used in the automotive, aeronautical and other industries, the need for flammability tests was found to identify the different behavior when subjected to fire conditions. Thus, the present work aims at the development of a flammability chamber for vertical and horizontal tests and to evaluate the flammability behavior of the polyurethane composite derived from a blend of vegetable oils (PU) and added with Alumina Trihydrate (ATH). ATH is a type of additive flame retardant, which intended to reduce or extinguish fire in materials in the event of fire. The initial stage of the work is the construction of the chamber, allowing the tests to be done both horizontally and vertically. For the purpose of comparison and study, all materials will be characterized separately, being pure PU, PU added with 10%, 20% and 30% of ATH. The flammability behavior will be evaluated according to the vertical and horizontal flame flammability tests. One possible application of this is the coatings and interior parts of aircraft or automobiles. A possible application from polymeric material is that of interiors and parts of aircraft or automobiles and even in civil constructions. Regarding the vertical test, it was not possible to classify the material due to the flame extinction delay. And in the horizontal test, we observed that polyurethane (PU) had a much higher burning rate than the same one added with 10%, 20% and 30% of ATH.

**Keywords:** Flammability; Polyurethane; Alumina trihydrate; Horizontal; Vertical.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de avaliação do teste de queima vertical .....	22
Tabela 2 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU PURA.....	40
Tabela 3 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 10% ATH ....	40
Tabela 4 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 20% ATH ....	40
Tabela 5 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 30% de ATH	40
Tabela 6 - - Média e desvio padrão dos ensaios na vertical.....	41
Tabela 7 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU PURA .....	43
Tabela 8 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 10% de ATH.	43
Tabela 9 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 20% de ATH.	43
Tabela 10 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 30% de ATH	43
Tabela 11 - Média e desvio padrão das velocidades de queima no ensaio horizontal.....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema das atividades realizadas ao longo do trabalho .....	16
Figura 2 - Modo correto de aproximação do Bico de Bunsen .....	20
Figura 3 - Posicionamento e distância dos elementos para realização do ensaios de inflamabilidade vertical.....	20
Figura 4 - Inclinação correta do queimador .....	21
Figura 5 - Vista lateral do ensaio de inflamabilidade horizontal.....	23
Figura 6 - Vista frontal do ensaio de inflamabilidade horizontal .....	24
Figura 7 - Vista frontal e lateral da câmara com suas respectivas dimensões .	36
Figura 8 - Comparação do mecanismo de transmissão do software com o construído.....	37
Figura 9 - Furos do suporte do corpo de prova .....	37
Figura 10 - Câmara de inflamabilidade gerada pelo Software <i>Solidworks</i> .....	38
Figura 11 - Câmara construída em uma das suas fases finais.....	39
Figura 12 - Corpos de prova após a realização do ensaio de inflamabilidade na vertical.....	42
Figura 13 - Corpos de prova após o ensaio de inflamabilidade na horizontal ..	45

## LISTA DE SIGLAS

PU	Poliuretana
ATH	Alumina Tri - Hidratada
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDP	Corpo de prova

## LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metros
mm	Milímetros
s	Segundos
<i>t</i>	Tempo
<i>L</i>	Comprimento queimado
Mpa	Megapascal
v	Velocidade
min	Minutos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	14
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivos Específicos.....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE .....	18
2.1.1 Ensaio de Inflamabilidade Vertical .....	18
2.1.2 Ensaio de Inflamabilidade na Horizontal.....	22
2.2 POLÍMEROS.....	25
2.2.1 Polímeros Aditivados .....	26
2.3 RETARDANTES DE CHAMA.....	28
2.3.1 Boratos .....	29
2.3.2 Hidróxido de Alumínio (Al(OH) <sub>3</sub> ) ou Alumina Tri Hidratada (ATH) ....	29
2.3.3 Halogenados.....	30
2.3.4 Fosfatos .....	31
2.3.5 Hidróxido de Magnésio .....	31
2.3.6 Justificativa de escolha da ATH.....	31
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 METODOLOGIA E FABRICAÇÃO.....	33
3.1.1 Poliuretana derivada de óleos vegetais. (PU pura).....	33
3.1.2 Poliuretana aditivada com Alumina Tri – hidratada. (PU + ATH) .....	34
3.1.3 Câmara de Inflamabilidade .....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>36</b>
4.1 CONFIGURAÇÃO FINAL DA CÂMARA DE INFLAMABILIDADE .....	36
4.2 ENSAIO DE INFLAMABILIDADE NA VERTICAL .....	39

4.3 ENSAIO DE INFLAMABILIDADE NA HORIZONTAL.....	42
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>46</b>
5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No intuito de atender o crescente e acelerado avanço da tecnologia, a busca por novos materiais, com novas propriedades se tornam cada vez mais importantes, de modo a encontrar soluções e meios de facilitar a vida do homem. Desta maneira, a utilização de materiais poliméricos e compósitos tem se destacado em muitas áreas da engenharia. Portanto, com a ampla utilização desses materiais nas indústrias aeronáuticas, automobilísticas, construção civil, e entre outras, e com largo emprego desses materiais juntamente com o crescente número de tragédias envolvendo incêndios associados aos polímeros e compósitos poliméricos, viu-se a necessidade da criação de normas que modificam a estrutura química dos mesmo, introduzindo retardantes de chama (Gallo, 1998).

Cada material apresenta um comportamento diferente quando submetido às condições de incêndio, portanto a queima dos polímeros e compósitos dependerá das características particulares de cada um. Sendo assim, os ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal, são essenciais para a classificação e aplicação dos mesmos (da SILVA *et al.*, 2016).

Em consequência do custo de uma câmara comercial ser menos favorável que a construção de uma para a realização de tais ensaios, o presente trabalho propõe o dimensionamento e fabricação de uma câmara de ensaio de inflamabilidade vertical e horizontal para materiais poliméricos e compósitos, segundo as normas ASTM D3801 – 10 e ASTM D635 – 14, respectivamente.

Após a construção da câmara, será avaliado o comportamento de inflamabilidade da poliuretana derivada de uma blenda de óleos vegetais (PU), fornecida pela empresa KEHL, com adição de Alumina Tri-hidratada (ATH) em diferentes proporções, para retardar chama nessa PU.

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho tem como tema o desenvolvimento de uma câmara de ensaio de inflamabilidade e ainda realizar os testes de inflamabilidade na vertical e na

horizontal da poliuretana derivada de óleos vegetais (PU) pura, e a mesma com adição de 10%, 20% e 30% de Alumina Tri-hidratada (ATH) da massa total. Tanto para o desenvolvimento da câmara quanto para a realização dos ensaios, foram utilizadas as normas ASTM D3801 – 10 e ASTM D635 – 14 de modo que os requisitos de construção e os procedimentos de ensaio sejam realizados de maneira correta.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O grande interesse na utilização dos materiais poliméricos se deve ao fato também do mesmo, por aditivação de retardantes de chama, poder apresentar modificações tanto na suas características físicas e químicas quanto no seu desempenho quando submetido a um incêndio. Tais modificações podem influenciar, por exemplo, a inflamabilidade do material polimérico, que quando submetidos ao processo de queima podem diminuir ou extinguir a emissão de gases tóxicos ao ambiente. Além disso, a velocidade de propagação da chama torna-se um empecilho, na aplicação de alguns polímeros, devido as crescentes exigências das normas de segurança (JANG, 2000).

Portanto, na escolha de utilização de materiais poliméricos ou compósitos para determinadas aplicações se faz necessário a realização dos testes de inflamabilidade, de modo a analisar seu comportamento quando submetido à chama, de maneira que seu desempenho diante do fogo será definido quanto a propagação da chama ou extinção da mesma.

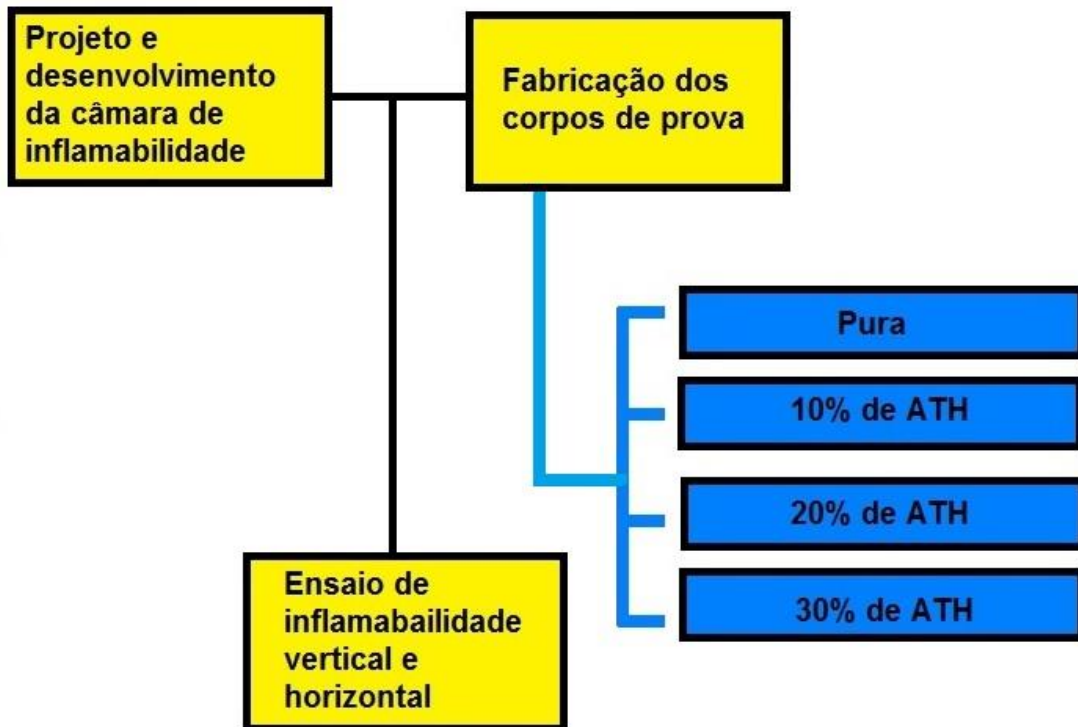
## 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral dimensionar e construir uma câmara de ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal, em especial materiais poliméricos e compósitos poliméricos. E ainda verificar o comportamento de inflamabilidade da Poliuretana (PU) pura, e a mesma com adição de 10%, 20% e 30% de Alumina Tri-



hidratada da sua massa total. A Figura 1, apresenta de forma esquemática os procedimentos que foram realizados ao longo do trabalho.

Figura 1 - Esquema das atividades realizadas ao longo do trabalho



Fonte: Autoria própria

### 1.3.1 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento do presente trabalho os seguintes objetivos específicos foram alcançados:

- Desenhar a câmara de ensaio de inflamabilidade vertical e horizontal no software Solidworks;
- Construir a câmara de ensaio de inflamabilidade vertical e horizontal;
- Estudar as normas referentes aos ensaios de inflamabilidade, ASTM D3801 – 10 (vertical) e ASTM D635 – 14 (horizontal);

- Realizar os ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal da poliuretana pura, e da mesma com adição de 10%, 20% e 30% de Alumina Tri-hidratada (ATH) da massa total da PU;
- Verificar a integridade do compósito após os testes de queima.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo foi dividido em subitens que darão uma melhor visualização do tema do trabalho de conclusão de curso em questão. Fundamentando as teorias que abrangem tal trabalho e buscando referências de trabalhos já publicados.

### 2.1 ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE

Visando responder as demandas cada vez maiores de competitividade, segurança e preservação do meio ambiente, as indústrias tecnológicas avançadas têm introduzido novas matérias no mercado (FONSECA et al, 2004). E com o surgimento destes novos matérias e conseqüentemente novas propriedades, a utilização de materiais poliméricos e compósitos, em muitas vezes, acaba se tornando viável para a aplicação em projetos. Portanto ensaios como o de inflamabilidade, impacto, fadiga, flexão, dureza, entre outros, é fundamental para entender melhor o comportamento desses novos materiais quando submetidos a esforços ou a condições de incêndio.

No trabalho de Vera (2012), todos os ensaios foram realizados em um gabinete projetado, colocado dentro de uma capela para facilitar a exaustão da fumaça após cada ensaio. Tanto o gabinete quanto o suporte do corpo de prova, foram feitos de metal resistentes a corrosão. Além disso, para a realização do ensaio de inflamabilidade, o queimador utilizado foi do tipo bico de Bunsen, composto por um tubo de diâmetro interno de 10 mm e equipado com uma válvula, que permite o ajuste da taxa de fluxo do gás, ou seja, ajuste da altura da chama.

#### 2.1.1 Ensaio de Inflamabilidade Vertical

De acordo com a norma de ensaio de inflamabilidade vertical, ASTM D3801-10, para aplicação da mesma é necessário uma câmara fechada, livre de correntes de ar forçadas ou induzidas, permitindo simultaneamente a circulação

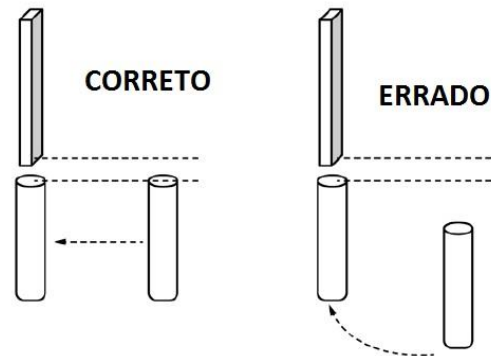
térmica normal do ar para além da amostra durante a queima. Além disso, a câmara ainda deve conter um volume interior de no mínimo 0,5 m<sup>3</sup>, um vidro resistente ao calor para a observação do teste, um exaustor para remover os produtos provenientes da combustão e capacidade da mesma de se manter a  $23 \pm 2$  °C e  $50 \pm 10\%$  de umidade relativa. Ainda na presente norma, serão necessários um suporte de fixação do corpo de prova, dispositivo de tempo com precisão de 0,5 segundos para anotação dos tempos de queima, algodão (cotton 100%) para absorção quando houver gotejamento no processo de queima do material, bico de Bunsen (queimador) que fornecerá a chama, um fornecimento de gás (gás metano) com um regulador de fluxo de gás constante e corpos de prova com  $125 \pm 5$  mm de comprimento por  $13 \pm 0.5$  mm de largura e uma espessura mínima de 3mm.

Para a realização de tal ensaio, alguns procedimentos devem ser seguidos, porém antes de apresentar os procedimentos mencionados, com o intuito de facilitar o entendimento do mesmo, fez-se necessária a apresentação de algumas definições, tais como:

- 1) *Afterflame time* ( $t_1$  e  $t_2$ ): o período de tempo durante o qual um material continua a queimar, após a remoção da fonte de ignição.
- 2) *Afterglow time* ( $t_3$ ): o período de tempo durante o qual o material continua a brilhar ou incandescente, sob condições específicas, após a remoção da fonte de ignição ou a cessação da chama, ou ambos.

A parte inicial do ensaio, consta com a fixação do corpo de prova, o posicionamento do algodão e o posicionamento afastado do queimador (Bico de Bunsen) da amostra, de modo que seja possível ajustar a chama do queimar com uma chama azul de  $20 \pm 2$  mm de comprimento (Figure 3). Após o ajuste do queimador, deve-se fazer a aproximação do queimador, de modo que a chama fique centrada sob a extremidade do corpo de prova (Figura 2), com o tubo do queimador à  $10 \pm 1$  mm de distância abaixo do corpo de prova (Figura 2) e durante um tempo de  $10 \pm 0.5$  segundos.

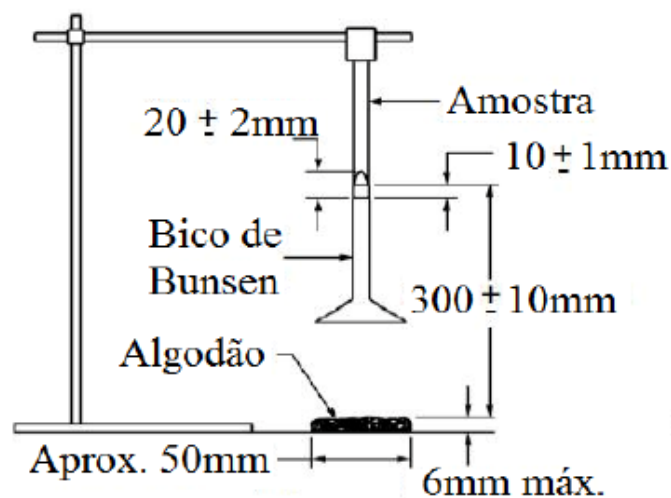
Figura 2 - Modo correto de aproximação do Bico de Bunsen



Fonte: ASTM D3801 – 14

Com a aproximação do queimador, os seguintes posicionamentos e as seguintes distâncias devem ser respeitadas, conforme ilustrado na (Figura 3).

Figura 3 - Posicionamento e distância dos elementos para realização do ensaios de inflamabilidade vertical



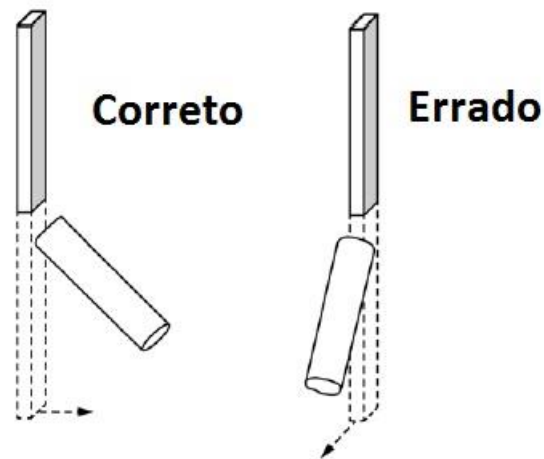
Fonte: ASTM: D3801 – 14

Após a primeira aplicação do queimador de 10 segundos, se não houver a extinção da chama, deve-se anotar o *Afterflametime* ( $t_1$ ), mas caso houver a extinção do fogo, aproxima-se novamente o queimador até o corpo de prova por mais  $10 \pm 1$  segundos.

Aplica-se a chama pela segunda vez, deve-se fazer a anotação do *Afterflame time* ( $t_2$ ), e do *Afterglow time* ( $t_3$ ) e, além disso, observar se há gotejamento

do corpo de prova e se esse gotejamento faz com que o algodão tenha uma ignição de queima. Caso ocorra o gotejamento da amostra, deve-se inclinar o queimador para um ângulo de 45 ° em direção ao lado largo da amostra (Figura 4), para evitar o gotejamento no tubo do queimador.

**Figura 4 - Inclinação correta do queimador**



**Fonte: ASTM D3801 – 14**

Deste modo, as principais classificações possíveis através desse teste são: V-0, V-1 e V-2 conforme mostrado na Tabela 1.

A classificação V-0 é dada ao material em que os tempos individuais  $t_1$  e  $t_2$  devem ser menores que 10 segundos, a soma dos tempos  $t_1$  e  $t_2$  das 5 amostras devem ser menores que 50 segundos, o tempo de queima  $t_2$  e o tempo de incandescência ( $t_3$ ) têm que ser menor que 30 segundos, não pode ocorrer a queima do corpo de prova até a parte de fixação do mesmo, e ainda o algodão não pode ter uma ignição devido ao gotejamento da amostra.

A classificação V-1 é dada ao material em que os tempos individuais  $t_1$  e  $t_2$  devem ser menores que 60 segundos, a soma dos tempos  $t_1$  e  $t_2$  das 5 amostras devem ser menores que 250 segundos, o tempo de queima  $t_2$  e o tempo de incandescência ( $t_3$ ) têm que ser menor que 60 segundos, não pode ocorrer a queima do corpo de prova até a parte de fixação do mesmo, e ainda o algodão não pode ter uma ignição devido ao gotejamento da amostra.

E por fim, a classificação V-2 é dada quando são satisfeitos os critérios de V-1, contudo o algodão tenha uma ignição devido ao gotejamento do corpo de prova.

A tabela 1 mostra as possíveis classificações para um material ensaiado, segundo a norma ASTM D3801 – 14.

<b>Tabela 1 - Critérios de avaliação do teste de queima vertical</b>			
<b>Condições</b>	<b>V-0</b>	<b>V-1</b>	<b>V-2</b>
O tempo de queima de cada amostra individual $t_1$ e $t_2$	$\leq 10$ s	$\leq 60$ s	$\leq 60$ s
O tempo total da queima de cada conjunto de amostras ( $t_1 + t_2$ para 5 amostras)	$\leq 50$ s	$\leq 250$ s	$\leq 250$ s
O tempo de queima mais o tempo de incandescência para amostra individual depois da segunda aplicação do queimador ( $t_2 + t_3$ )	$\leq 30$ s	$\leq 60$ s	$\leq 60$ s
Se alguma amostra queimou ou incandesceu até a região que prende o corpo de prova	Não	Não	Não
Se o algodão entrou em ignição devido a partículas de chama ou se houve gotejamento	Não	Não	Sim

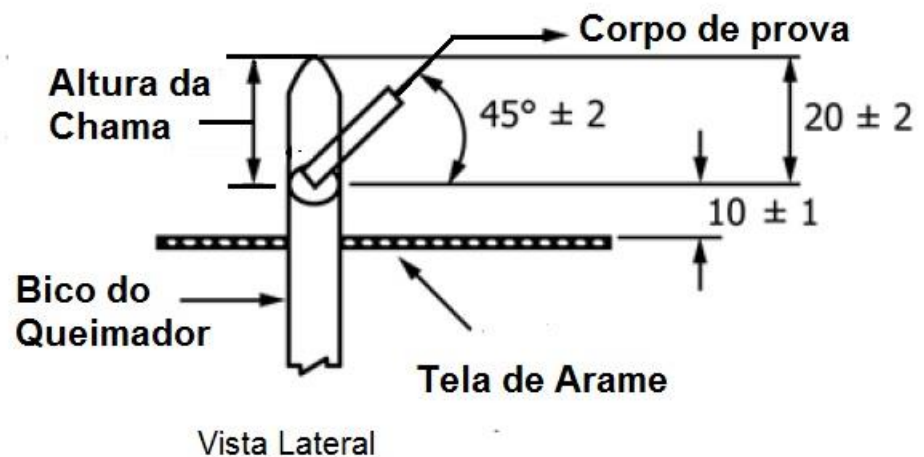
**Fonte: ASTM D3801 – 14.**

### 2.1.2 Ensaio de Inflamabilidade na Horizontal

De acordo com a norma ASTM D635 – 14, para a realização do ensaio horizontal, também será necessária uma câmara fechada, livre de correntes de ar forçadas ou induzidas, volume no interior da câmara de pelo menos 0,5 m<sup>3</sup>, um vidro resistente ao calor para a observação do teste, um exaustor para remover os produtos provenientes da combustão e capacidade da mesma de se manter a  $23 \pm 2$  °C e  $50 \pm 10\%$  de umidade relativa. Além do mais, é indispensável um bico de Bunsen

(queimador), um equipamento de fixação do corpo de prova capaz de mantê-lo no eixo horizontal e com um inclinação de  $45^\circ \pm 2$  com seu eixo vertical (Figura 5), um suporte para o bico de Bunsen (queimador) que possibilita o mesmo ficar numa angulação aproximada de  $45^\circ$  (Figura 6) e fornecimento de gás (gás metano). Diferente do ensaio da vertical, este ensaio conta com a presença de uma tela de arame, que tem a função de sustentar os resíduos da combustão ou partículas incandescentes que caem da amostra, posicionada a  $10 \text{ mm} \pm 1$  do corpo de prova. (Figura 5).

Figura 5 - Vista lateral do ensaio de inflamabilidade horizontal

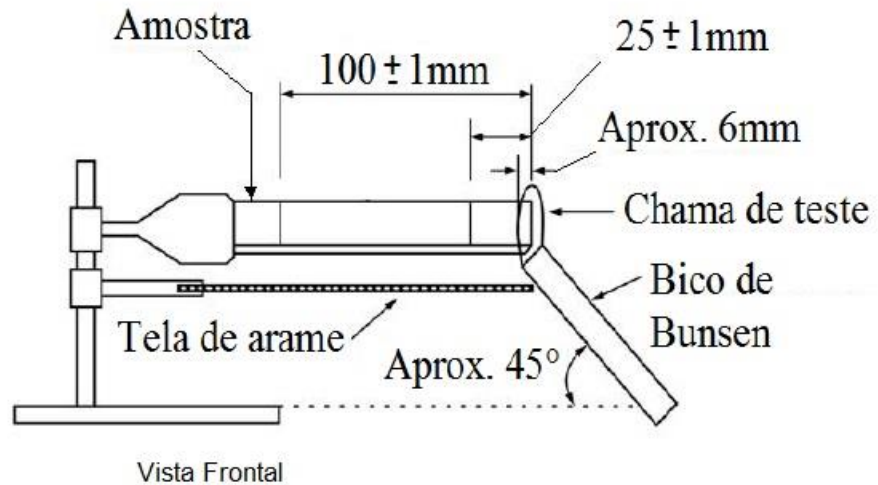


Fonte: ASTM D635 – 10

Para início do ensaio, são necessárias 10 amostras, nas quais devem possuir  $125 \pm 5$  mm de comprimento por  $13 \pm 0,5$  mm de largura e uma espessura mínima de 3 mm. Em cada amostra, é necessário realizar duas marcações com linhas perpendiculares ao eixo longitudinal. A primeira marcação deve ser feita à  $25 \pm 1$  mm da extremidade do corpo de prova, e a segunda marcação deve ser feita a  $100 \pm 1$  mm da extremidade do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 6.



**Figura 6 - Vista frontal do ensaio de inflamabilidade horizontal**



**Fonte: ASTM D635 – 14**

Feito as marcações, deve-se fixar o corpo de prova conforme a Figura 6 e antes de fazer a aproximação do queimador (bico de Bunsen), é preciso fazer o ajuste da chama, de modo que a mesma tenha  $20 \pm 2$  mm de comprimento, a coloração azul por inteira e esperar durante 5 minutos para entrar em equilíbrio. A aproximação do queimador deve ser feita de forma que a chama colide na extremidade livre do corpo de prova a uma profundidade de aproximadamente 6 mm e mantendo o queimador com uma angulação de  $45^\circ \pm 2$  (Figura 5), com a chama em contato com o CDP inicia-se a cronometragem do tempo de exposição do CDP à chama. A chama deve ser aplicada durante  $30 \pm 1$  segundos sem alterar sua posição ou até em que a mesma atinja a marcação de 25 mm. Se por acaso a chama atingir os 25 mm, o temporizador deve ser reiniciado e se porventura o corpo de prova sofrer uma deformação de encurtamento no seu tamanho e, com isso, encolher da chama aplicada sem ignição, o material não é adequado para avaliação por este método de ensaio.

Se o corpo de prova continuar a queimar, com uma chama ou incandescência após a aplicação do queimador, é necessário marcar o tempo ( $t$ ) em segundos a partir do momento em que a chama passe da marcação de 25 mm até atingir a marcação de 100 mm e registrar o comprimento queimado ( $L$ ), como 75 mm. Caso a chama se extingua antes de chegar na marcação de 100 mm, deve-se registrar o tempo decorrido, em segundos, e o comprimento queimado em milímetros entre a marca de referência de 25 mm e onde a chama parou.

Estes procedimentos de teste devem ser feitos até que 3 corpos de provas atinjam a marcação de 100 mm, caso isso não aconteça, é necessário realizar o teste em 10 corpos de prova.

No ensaio de inflamabilidade horizontal o material é classificado de acordo com a velocidade de queima dada em milímetros/minuto, na qual o material pode apresentar alguns comportamentos após o queimador ser removido, tais como:

- Não há sinais visíveis de combustão após a remoção do queimador;
- A chama não passa da marcação de 25 mm;
- A chama passa da marcação de 25 mm, mas não passou da marcação de 100 mm;
- A chama atinge a marcação de 100 mm.

## 2.2 POLÍMEROS

Atualmente os polímeros vêm substituindo os materiais convencionais em diversas aplicações devido às suas propriedades físicas, químicas e principalmente seu baixo custo de fabricação. Porém o uso incorreto e o descarte de forma inadequada vêm causando graves problemas ambientais. Deste modo, surge um grande aumento no desenvolvimento de novos materiais poliméricos, sintetizados a partir de matérias primas renováveis, beneficiando não só o meio ambiente, mas também a propriedades mecânicas do material (TAGUTI, 2015).

Segundo Hemais (2003), os polímeros têm demonstrado um alto índice de confiabilidade e muitas vantagens, na indústria automobilística, sobre os materiais tradicionais que vieram a substituir, tais como o aço, o alumínio e o vidro, por exemplo. Além de permitir maior flexibilidade de projeto e economia na produção, sua baixa densidade é essencial para a redução do consumo de combustíveis. Dados norte-americanos informam que, como são produzidos naquele país 15 milhões de carro/ano, quase 20 milhões de litros de gasolina são economizados e 4,7 milhões de toneladas de dióxido de carbono deixam de entrar na atmosfera devido ao uso de peças poliméricas.

De acordo com Gemaque (2012), materiais poliméricos são utilizados em diversas finalidades no setor aeroespacial, como por exemplo, em isolamentos

térmicos e elétrico, revestimento, acabamento e estofamento de aeronaves, em aplicações como material estrutural em instalações aeronáuticas, torres de lançamento, laboratório de testes, em proteções térmicas de foguetes, propelentes sólidos e outros.

Um dos polímeros mais conhecidos e estudados atualmente é a poliuretana, que pode ser obtida a partir de diversas fontes de matérias-primas renováveis, produzida através de óleos vegetais. Encontra-se diversos trabalhos e estudos referentes a aplicação deste polímero derivado de diversos tipos de matérias-primas, como por exemplo, o óleo da mamona (FERNEDA, 2006; COSTA, 2007), farinha de soja (MUet *et al.*, 2011), óleo de amendoim, milho, soja, linhaça (GARRISON; KESSLER; LAROCK, 2014), óleo de canola (KONG; LIU; CURTIS, 2011), óleo de tunge (SILVA *et al.*, 2013).

No trabalho de Pinheiro (2011), o poliuretano foi aplicado em para-choques de automóveis. Observou-se que a aplicação do mesmo proporciona uma economia na produção de automóveis, diminuição do peso do veículo e designs modernos e sofisticados, além disso, a poliuretana apresenta uma alta resistência a tração e compressão, sendo ideal para a produção de peças e acessórios de veículos que exigem maior durabilidade.

### 2.2.1 Polímeros Aditivados

A ampliação da faixa de aplicação dos materiais poliméricos é possível pela síntese de novos polímeros (com estrutura química diferenciada) e pela modificação de polímeros já existentes. Neste último caso, tem-se como exemplo os copolímeros, as misturas poliméricas (blendas), os compósitos e em especial ao tema deste trabalho, os aditivos por retardantes de chama. Tais aditivos tem o intuito de melhorar a resistência do polímero quando exposto em condições de incêndio. Deste modo, quando feito a escolha e dosagem adequada desses aditivos, novos materiais surgem, permitindo assim o uso de plásticos em aplicações onde, sem o uso dos mesmo, teriam reduzidas chances de sucesso; daí serem vistos hoje como componentes indispensáveis. (RABELLO, 2000).

A crescente utilização dos aditivos em polímeros tem incentivado grande mudanças tecnológicas, com melhoria de desempenho, aumento na produtividade, aumento da resistência a chama e redução em toxicidade. Segundo Rabello (2000), as principais tendências na indústria de aditivos estão resumidas da seguinte forma.

- Higiene Industrial: procura-se evitar formulações com pós de fácil suspensão e formulações contendo solventes.
- Toxicidade: aditivos contendo metais pesados e outros elementos tóxicos estão sendo banidos não apenas em aplicações da indústria alimentícia;
- Performance: procura-se principalmente combinações sinérgicas entre vários tipos de aditivos, utilização de aditivos multifuncionais e a aplicação de tratamentos superficiais nos aditivos visando uma melhor interação com o polímero;
- Custo: aditivos de baixa densidade e alto rendimento são preferidos. Vale também observar a concentração requerida para atingir um certo desempenho final do polímero;
- Reciclagem: por questões econômicas e ambientais, os aditivos que favorecem a reciclagem do polímero apresentarão maiores demandas.

Fonseca (2004), utilizou uma base bromada associado ao trióxido de antimônio como aditivo de retardante de chama no compósito de poliuretana, tal retardante de chama, além de atuar como elemento reforçante para o compósito de poliuretana, também atuou eficientemente como retardante de chama elevando a classificação do compósito para V-0.

No presente trabalho foi avaliado o comportamento de inflamabilidade da poliuretana (PU), e da mesma aditivada com 10%, 20% e 30% de Alumina tri hidratada (ATH), e com o intuito de facilitar o entendimento da mesma, fez-se necessária a apresentação do próximo tópico abrangendo alguns tipos de retardantes de chama e o porquê da escolha da Alumina tri hidratada (ATH).

## 2.3 RETARDANTES DE CHAMA

Os materiais poliméricos, quando submetidos a lugares fechados, são mais vulneráveis a combustão, elevando assim, risco de acidentes no ambiente. Quando estes entram em condições de incêndio, a combustão ocorre rapidamente e, em muitos casos, não sendo possível realizar salvamentos ou realizar fugas do ambiente (FISCHER E NUNES, 2012). Tais materiais poliméricos quando aditivados por retardantes de chamas, previne a formação de chamas em artigos plásticos, proporcionando ao material, propriedades para aplicações seletivas nos ramos automobilísticos, aeroespacial, construção civil entre outros. (NUNES, 2010)

Portanto, como já mencionado anteriormente, o presente trabalho visa o ensaio de inflamabilidade vertical e horizontal da poliuretana(PU), e da mesma com adição da ATH como retardante de chamas para evitar ou retardar a combustão dos materiais poliméricos ou compósitos poliméricos.

A atuação dos retardantes de chamas consiste em interferir quimicamente no mecanismo de propagação da chama. Isso ocorre basicamente por duas formas: produção de gases incombustíveis que reduzem o suprimento de oxigênio ou formação de uma camada protetora que diminui a superfície de contato do combustível com o comburente (Martins, *et al.* 2011)

Segundo Rabello (2000), existem vários tipos de aditivos retardantes de chama, que agem de diferentes formas, reduzindo a velocidade ou extinguindo a queima do material quando este entra em contato com a fonte de calor, ou provoca a rápida suspensão da chama quando a fonte de calor for removida.

De acordo com Gallo (1998), existem 3 categorias, com uma série de maneiras de se reduzir a inflamabilidade dos polímeros. A primeira é agentes retardantes de chama reativos (modificação química), ou seja, a introdução de determinados grupamentos químicos inseridos diretamente nas macromoléculas durante a síntese das mesmas. Este processo apresenta vantagens quanto à estabilidade do sistemas poliméricos resultantes, tornando sua ação mais consistente e duradoura. A segunda categoria é os agentes retardantes de chama aditivos, na qual incorporam determinadas substâncias durante o processamento dos polímeros. Este possuem vantagens tanto de não ser diretamente ligado ao processo de manufatura dos polímeros quanto em relação aos custos de matéria-prima e de

incorporação. E por fim, a terceira categoria, entre elas a menos eficiente, é a de revestimentos antichama, ou seja, produtos aplicados ao polímero, como por exemplo, tintas de revestimentos, produtos derivado de madeira entre outros.

A seguir serão abordados os principais retardantes de chamas aditivos, por ser os mais utilizados e ser foco de estudo no presente trabalho. Os aditivos mais utilizados ultimamente como retardantes de chama são, Boratos, Hidróxido de Alumínio (Alumina Tri-hidratada), Halogenados, Fosfatos e Hidróxido de Magnésio.

### 2.3.1 Boratos

Os boratos são usados especialmente como auxiliares de outros retardantes de chama, pois quando usados isoladamente possuem uma baixa eficiência. Os tipos mais comuns são o pentahidrato, decahidrato, o ácido bórico e o borato de zinco. Quando aquecidos formam uma camada na superfície do material, que inibe o mecanismo de retroalimentação térmico. O borato de zinco, quando usado em conjunto com a alumina tri hidratada (ATH) como aditivo no PVC, proporciona um resultado muito positivo de retardância de chama e na redução de emissão de fumaça (GALLO,1998).

### 2.3.2 Hidróxido de Alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ou Alumina Tri Hidratada (ATH)

A alumina Tri Hidratada (ATH), é o agente retardante de chamas mais utilizado no mercado, pois, age também como supressor de fumaça e não libera gases tóxicos durante a queima. No entanto, para tais propriedades, altas concentrações de alumina tri hidratada são necessárias. Isto causa perdas nas propriedades físicas dos materiais, por não ter caráter reforçante (SILVA, 2006). Além disso, o hidróxido de alumínio possui um baixo custo, é de fácil manuseio e ainda de baixo risco a saúde e ao meio ambiente (FELIX, 2010)

Segundo Gallo (1998), o hidróxido de alumínio age como retardante de chama de duas formas. A primeira é como absorção de calor, e a segunda como

liberação de uma grande quantidade de água quando aquecido acima de 230°. Durante a queima, alguns produtos são formados, e estes possuem características que ajudam no processo de redução da queima. Além disso, devido a processos químicos durante a queima, é formado na superfície do material um composto refratário ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que tem como característica o isolamento térmico, pois forma uma camada protetora do material, reduzindo a transferência de calor entre a região da queima e a superfície do polímero ou compósito.

Silva (2006) utilizou em seu trabalho como retardante de chama a Alumina Tri-Hidratada (ATH) no compósito de polipropileno reciclado com fibra de coco, que após os ensaios de queima, viu-se a eficiência do retardante de chama na extinção da chama no compósito.

### 2.3.3 Halogenados

São compostos carbohalogenados de fórmula geral “RX”, sendo “R” um radical orgânico e “X” um halogênio (flúor, cloro, bromo e iodo), que afetam o mecanismo de radicais livres em fase gasosa que dá origem ao processo de queima de materiais poliméricos. Os agentes fluorados e os iodados não apresentam qualquer efeito retardante de chama. Os fluorados devido a sua ligação forte e os iodados devido a sua baixa energia quando decomposto. Dos dois halogênios restantes, o Bromo é o mais efetivo, pois tem mais facilidade de formar radicais livres (GALLO, 1998).

Segundo Ramos (2015), os retardantes de chamas Halogenados são os mais utilizados, pois são muito eficazes em quantidades relativamente baixas, tendo um baixo impacto sobre as características do polímero, e são baratos. Porém o reconhecimento da sua toxicidade e acumulação no meio ambiente conduziram à proibição da produção e da utilização de muitos destes compostos. Portanto a queima de polímeros que contenham retardantes de chama Halogenados tem-se uma atenção em especial aos gases e substâncias tóxicas emitidas junta com a fumaça.

#### 2.3.4 Fosfatos

Os fosfatos quando submetidos a queima, sofrem decomposição gerando ácido fosfórico, que desidrata a base do polímero formando uma camada protetora incombustível, inibindo o mecanismo de retroalimentação térmica de modo análogo aos boratos. A desidratação libera também grandes quantidades de água e gases não combustíveis, que colaboram para o efeito de retardância de chama. Tais gases sofrem catalisação, reduzindo a energia da chama (GALLO,1998).

Martins (2013), em sua dissertação de mestrado, utilizou o polifosfato de amônio como retardante de chama, possibilitando assim com que material fosse classificado com V-0 no ensaio de inflamabilidade vertical.

#### 2.3.5 Hidróxido de Magnésio

O hidróxido de magnésio apresenta efeito de retardância de chama similar ao hidróxido de alumínio, porém apresenta uma temperatura de decomposição mais elevada (300°C). Por apresentar um custo elevado, o hidróxido de magnésio é usado apenas nos polímeros que apresentam temperaturas de processamento acima da temperatura de decomposição térmica do ATH (GALLO, 1998).

Martins (2011) utilizou hidróxido de magnésio e alumínio como retardante de chama na fibra de vidro. Os resultados obtidos demonstram uma maior retardância de chama, contudo, ainda não se atinge a classificação V-0, ou seja, composto polimérico que não goteja ou extingue a chama.

#### 2.3.6 Justificativa de escolha da ATH

Com a finalidade de justificar a escolha da ATH na PU derivada de óleos vegetais, e considerando que a mesma será aplicada em componentes de interiores de veículos de transporte e redução ao impacto ambiental, deve-se ficar atento com relação a seu comportamento quanto submetido a condições de incêndio A seguir,



será mostrado algumas vantagens e desvantagens dos retardantes de chama citados no tópico 2.3.

Os boratos e fosfatos, como retardantes de chama, necessita-se de usar em conjunto com outros aditivos, para que os mesmo tenham eficiência. Deste modo, estes foram descartados de possível aplicação, pois teria um custo um pouco maior e quando adicionado mais um componente, o mesmo pode interferir nas propriedades mecânicas.

Como mencionado acima, levando em consideração também o impacto ambiental, foi descartado os retardantes de chama Halogenados pois estes apresentam um alto impacto ambiental por emitirem substâncias tóxicas quando exposto à chama.

Finalmente, restam apenas dois tipos de aditivos: o hidróxido de alumínio e o hidróxido de magnésio. Os mesmo apresentam a mesma eficiência e o mesmo mecanismo no processo de redução de chama. Portanto, tendo como finalidade reduzir custo e facilidade no manuseio, a melhor opção de aditivo para a poliuretana (PU) é a ATH.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 METODOLOGIA E FABRICAÇÃO

Para a possível classificação quanto à queima os corpos de prova foram divididos em CDP de PU sem adição de ATH, CDPs com adição de 10%, 20% e 30% de Alumina tri hidratada (ATH), e para o desenvolvimento da câmara de inflamabilidade, foi necessário levar em consideração os requisitos necessários descritos pelas normas ASTM D3801 – 10 e ASTM D635 – 14. Em seguida será descrito os processos de fabricação dos corpos de prova, assim como o desenvolvimento da câmara.

#### 3.1.1 Poliuretana derivada de óleos vegetais. (PU pura)

A poliuretana utilizada no presente trabalho é obtida através de dois componentes, o polioliol (componente A – AG201) e o pré-polímero (componente B – AG201), fornecido pela empresa KEHL. A proporção utilizada de cada componente é de 1:1, que logo após a homogeneização dos mesmos, o polímero é colocado durante 20 minutos na câmara de vácuo para retirada de vazios. Este é vertido em moldes de silicone antes de atingir seu *pot life* e, em seguida, colocados em vaso de pressão a 4 MPa durante 48 horas. Após esse tempo no vaso de pressão a PU estava curada o suficiente para que fosse removido do molde de silicone, apresentando uma certa estabilidade dimensional no formato do corpo de prova. Com isso, os CDPs eram catalogados (numerados, registrados em livro de produção com as referidas datas de produção, umidade relativa do ar e temperatura de produção), tendo em vista que as condições do ambiente influenciam bastante na homogeneização das duas partes que constituem a PU, em virtude da mesma ser higroscópica, ou seja, sensível à umidade. Também vale ressaltar que se a temperatura estiver abaixo dos 20° as partes e componentes da PU começam a turvar e aumentar sua viscosidade, o que dificulta a homogeneização dessas partes, bem como a adição da ATH.

### 3.1.2 Poliuretana aditivada com Alumina Tri – hidratada. (PU + ATH)

A fabricação do corpo de prova da poliuretana aditivada com ATH é semelhante à da poliuretana pura. O único processo diferente é que antes de fazer a homogeneização dos componentes A e B, deve-se misturar previamente ao polioli a ATH, já peneirada. Foi utilizado a proporção 1:1, como na poliuretana pura, com adição de ATH de 10%, 20% e 30 % da massa total de PU.

### 3.1.3 Câmara de Inflamabilidade

Para o desenho e desenvolvimento estrutural da câmara de ensaio de inflamabilidade foi utilizado o software *Solidworks*. Para a construção da mesma, foram utilizadas barras de aço de perfis retangular (30x20 milímetros) para a parte estrutural, chapas de aço de 1/16 polegadas para realizar o fechamento da estrutura denotando o formato da câmara e elementos de fixação, como rebites, para fazer a fixação das chapas na estrutura. Por se tratar de uma câmara fechada e como descrito anteriormente nas normas ASTM D3801 – 10 e ASTM D635 – 14, foi utilizado uma porta de vidro resistente ao calor na parte frontal da câmara, que além da colocação e retirada do corpo de prova, ela ainda permite o acompanhamento e a avaliação da queima durante o ensaio. Além do mais, para a realização do ensaio, foi utilizado como queimador um bico de Bunsen com uma válvula reguladora do fluxo de gás, permitindo assim o ajuste da chama para a realização do ensaio.

Para a aproximação do bico de Bunsen até o corpo de prova, foi desenvolvido um sistema de movimentação, a qual é constituído por uma engrenagem motora e uma polia movida, tendo uma correia dentada como elemento de ligação entre a engrenagem e a polia. As extremidades da correia estão fixas em uma mesa corrediça que suporta o bico de Bunsen. O acionamento desse sistema é manual e se dá por meio de um manípulo colocado na parte externa da câmara, o qual é acionado de acordo com o tempo de exposição ou afastamento da chama ao corpo de prova.

Com base nas normas, já mencionadas anteriormente, a câmara ainda possui uma saída de ar, que tem como objetivo um sistema de exaustão para que não haja o acúmulo de gases proveniente da queima do corpo de prova no seu interior. Tal sistema de exaustão só deve ser acionado quando os testes forem finalizados, de modo que o mesmo não interfira por meio de correntes de ar nos resultados dos ensaios.

Como critério de avaliação para o ensaio de inflamabilidade vertical, a câmara conta com a utilização de algodão, enquanto para os ensaios de inflamabilidade na horizontal, a câmara necessita de uma tela de arame para conter o material proveniente da queima do corpo de prova.

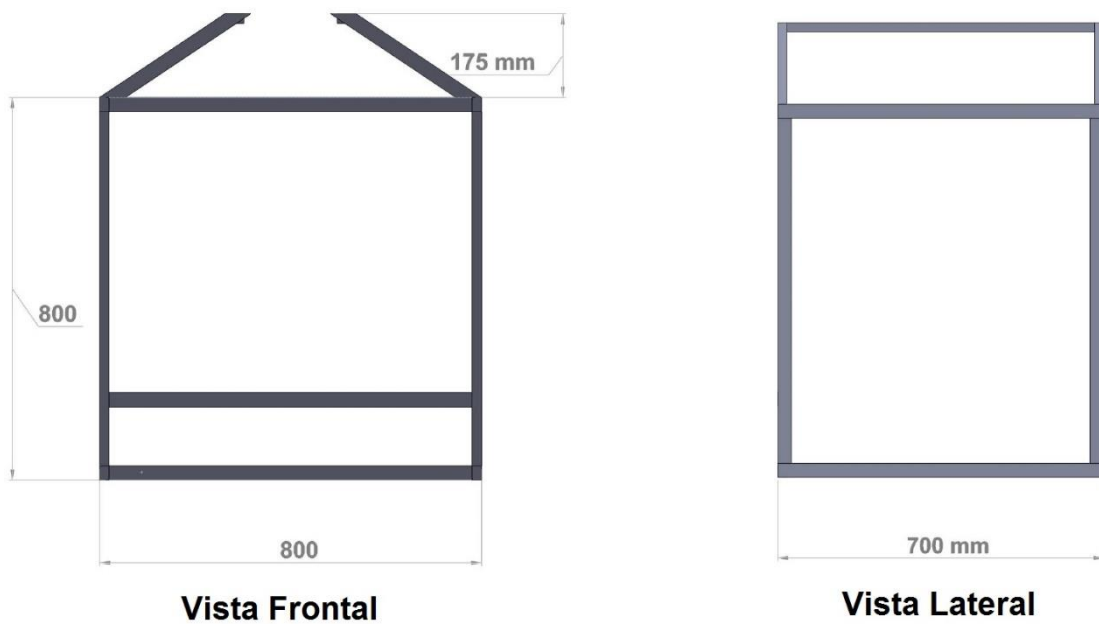
Para a fixação do corpo de prova e o suporte de bico de Bunsen, também foram utilizados chapas e barras de aço de perfis retangular, de modo que os mesmos atendam aos requisitos necessários para a realização do ensaio quanto a direção correta de aproximação do queimador até o corpo de prova no ensaio vertical, e as angulações do corpo de prova e bico de Bunsen no ensaio de inflamabilidade horizontal.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONFIGURAÇÃO FINAL DA CÂMARA DE INFLAMABILIDADE

Atendendo um dos requisitos, descrito nas normas ASTM D3801 – 10 e ASTM D635 – 14, a Figura 7 mostra as principais dimensões (em milímetros) da câmara de modo que a mesma possua um volume no interior de pelo menos 0,5 m<sup>3</sup>.

Figura 7 - Vista frontal e lateral da câmara com suas respectivas dimensões

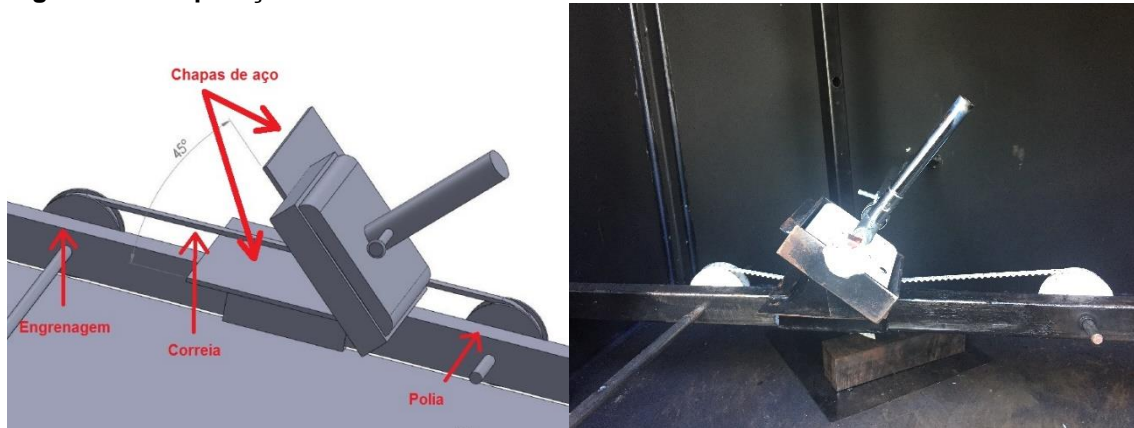


Fonte: Autoria própria

Em relação a aproximação correta do queimador (Bico de Bunsen) para o ensaio de inflamabilidade na vertical (ASTM D3801 – 10) e a angulação necessária do mesmo para o ensaio de inflamabilidade na horizontal (ASMT D635 – 14), foi desenvolvido dois mecanismos. O primeiro é um mecanismo de transmissão com engrenagem, polia e correia que possibilite a movimentação correta do queimador, e o segundo mecanismo trata-se de duas chapas de aço fixadas com uma junção

articular, permitindo que o queimador rotacione até o ângulo de 45° (Figura 8), conforme solicitação da norma ASMT D635 – 14.

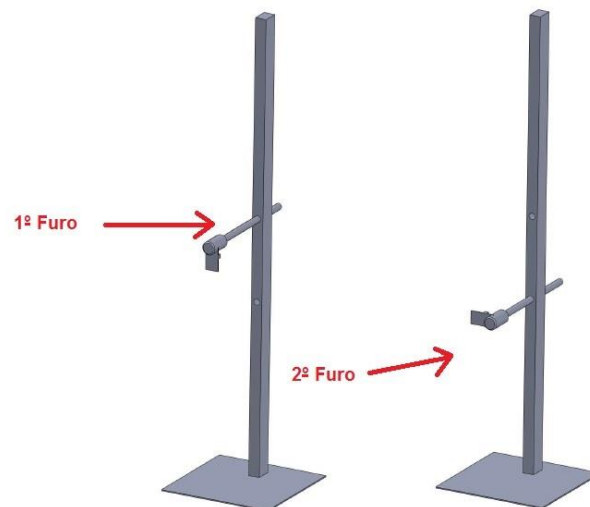
**Figura 8 - Comparação do mecanismo de transmissão do software com o construído**



Fonte: Autoria própria

O Suporte de fixação do corpo de prova é constituído de uma coluna em perfil de aço retangular 30 x 20 mm de seção retangular e comprimento de 800 mm, sendo que nesta coluna existe dois furos, na qual, o primeiro furo será utilizado quando for realizar testes na vertical e o segundo furo quando for realizado testes na horizontal, Figura 9.

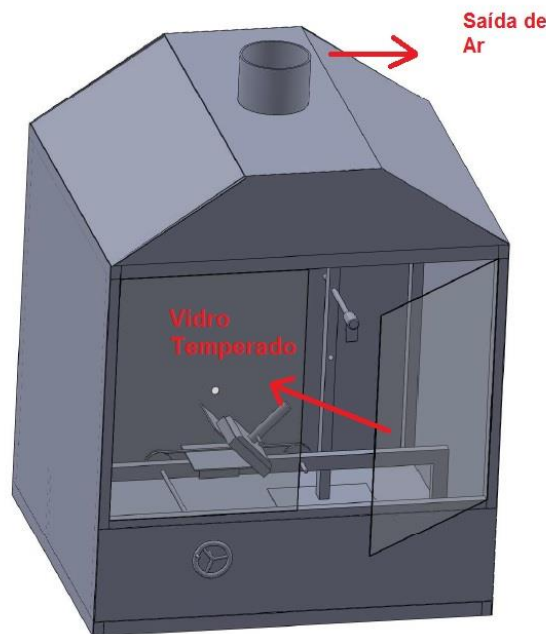
**Figura 9 - Furos do suporte do corpo de prova**



Fonte: Autoria própria

Além dos requisitos já citados anteriormente para o desenvolvimento da câmara, a mesma apresenta porta de vidro temperado na parte frontal, para que seja possível o acompanhamento do ensaio durante a queima, e a saída de ar para que não ocorresse o acúmulo de gases provenientes da combustão do polímero (Figura 10).

**Figura 10 - Câmara de inflamabilidade gerada pelo Software *Solidworks***



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 11, mostra a câmara semi-acabada, comparando-se com a Figura 10, ou seja, falta a parte de exaustão dos gases. Além do mais, uma das principais comparações que pode-se fazer, que afinal era um dos objetivos desse trabalho, é em relação ao custo da câmara. Uma câmara comercial tem um custo de aquisição na ordem de R\$ 4.500,00 à R\$ 5.400,00 reais, enquanto o custo total para o desenvolvimento desta câmara ficou em média R\$ 1.000,00 um mil reais.

**Figura 11 - Câmara construída em uma das suas fases finais**



**Fonte: A autoria própria**

#### 4.2 ENSAIO DE INFLAMABILIDADE NA VERTICAL

Como mencionado anteriormente, após a construção da câmara foram realizados os testes de inflamabilidade vertical e horizontal. Para avaliar o comportamento da poliuretana com adição de alumina tri-hidratada (ATH) no ensaio de inflamabilidade vertical, foram necessários 5 corpos de prova para cada porcentagem de ATH, com seus respectivos registros de tempo de *Afterflame time* ( $t_1$  e  $t_2$ ) e *Afterglow time* ( $t_3$ ) após os 10 segundos de aplicação da chama no corpo de prova.

A seguir será apresentado os dados obtidos por meio do ensaio de inflamabilidade vertical para a PU pura, PU com 10% (de sua massa total), 20% e 30% de ATH.



**Tabela 2 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU PURA**

Corpo de Prova	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	Queima até a região que prende o corpo de prova	Algodão pegou fogo
1	93,8	-	-	Sim	Sim
2	90,70	-	-	Sim	Sim
3	109,59	-	-	Sim	Sim
4	96,08	-	-	Sim	Sim
5	93,28	-	-	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria

**Tabela 3 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 10% ATH**

Corpo de Prova	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	Queima até a região que prende o corpo de prova	Algodão pegou fogo
1	158,33	-	-	Sim	Sim
2	162,61	-	-	Sim	Sim
3	167,07	-	-	Sim	Sim
4	190,28	-	-	Sim	Sim
5	97,83	-	-	Não	Sim

Fonte: Autoria própria

**Tabela 4 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 20% ATH**

Corpo de Prova	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	Queima até a região que prende o corpo de prova	Algodão pegou fogo
1	36,21	94,56	-	Sim	Sim
2	36,32	90,80	-	Sim	Sim
3	36,39	100,19	-	Sim	Sim
4	133,65	-	-	Sim	Sim
5	123,87	-	-	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria

**Tabela 5 - Dados do ensaio de inflamabilidade Vertical na PU + 30% de ATH**

Corpo de Prova	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	Queima até a região que prende o corpo de prova	Algodão pegou fogo
1	40,31	71,23	-	Não	Sim

(continua)

<b>Corpo de Prova</b>	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	<b>Queima até a região que prende o corpo de prova</b>	<b>Algodão pegou fogo</b>
2	2,00	30,08	-	Não	Sim
3	109,59	64,00	-	Não	Sim
4	96,08	101,04	-	Não	Sim
5	93,28	89,91	-	Não	Sim

**Fonte: A autoria própria**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Média ± Desvio Padrão</b>		
	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$
PU Pura	96,69 ± 7,4	-	-
PU + 10 % de ATH	155,32 ± 34,4	-	-
PU + 20% de ATH	73,19 ± 50,75	95,18 ± 4,76	-
PU + 30% de ATH	68,25 ± 45,5	71,25 ± 27,3	-

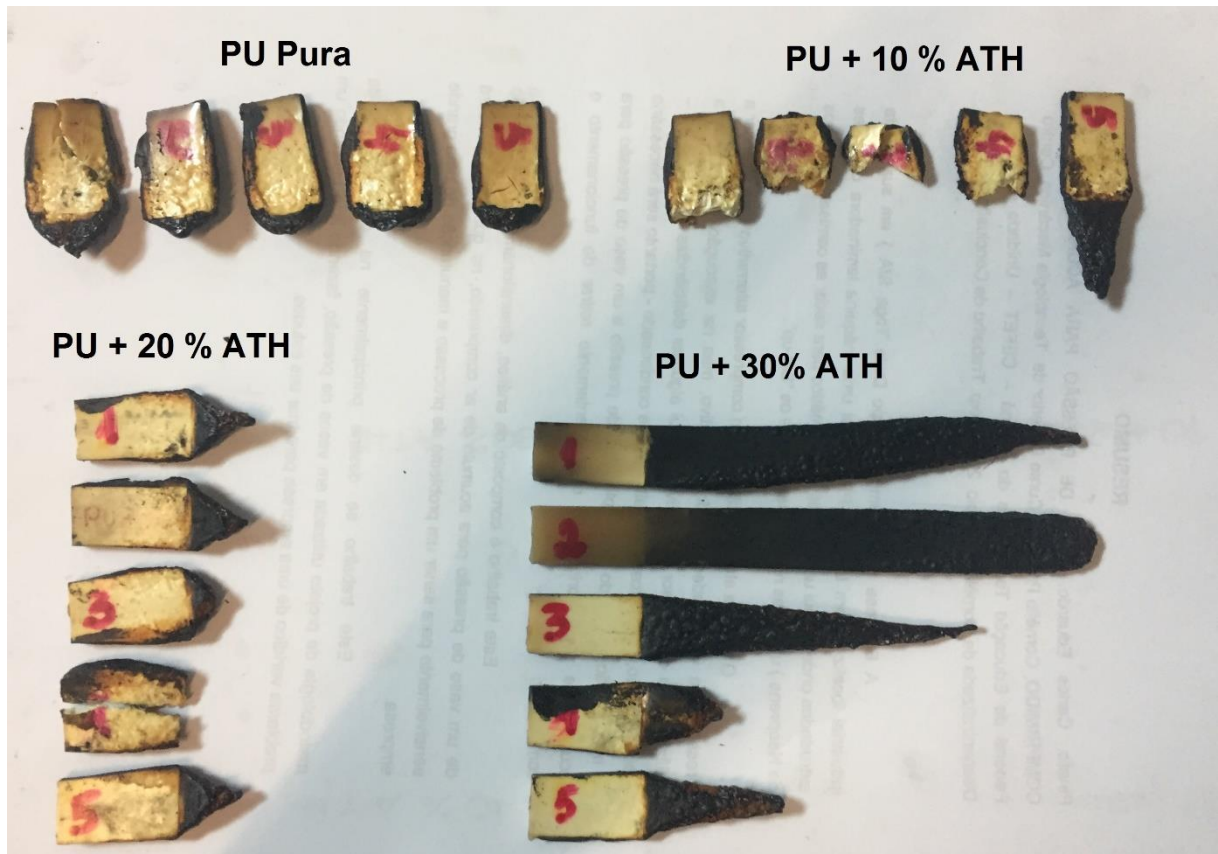
**Fonte: A autoria própria**

Analisando as tabelas para cada material, pode-se concluir que na tabela da PU pura (tabela 2) os tempos  $t_1$  dos 5 corpos de prova estão bastante semelhantes, apresentando assim um desvio padrão baixo com relação aos demais corpos de prova com adição de ATH. A PU com 10% de ATH, apresentou, no corpo de prova 5, um tempo bastante diferente dos demais. Quando descartado o mesmo, pode-se observar que seu desvio padrão com esse percentual de retardante de chama diminuiu consideravelmente. Na PU com 20% de ATH, descartando os corpos de prova 4 e 5, pode-se observar que seus valores de  $t_1$  e  $t_2$  são bem próximos, tendo assim, uma margem de erro de aproximadamente 4,4. E por fim, nota-se que quando descartado os corpos de prova 1 e 2 de PU com 30 % de ATH, os tempos são bem próximos e o desvio padrão diminuiu para 8,72.

De modo geral, pode-se observar que o único percentual de retardante de chama que apresentou classificação quanto a norma ASTM D3801 – 14 foi o corpo de prova 2 de PU aditivada com 30% de ATH. A Mesma apresentou classificação V-2 por atender todos os requisitos da tabela 1.

A Figura 12 mostra os corpos de prova após a realização do ensaio de inflamabilidade na vertical.

**Figura 12 - Corpos de prova após a realização do ensaio de inflamabilidade na vertical**



Fonte: Autoria própria

#### 4.3 ENSAIO DE INFLAMABILIDADE NA HORIZONTAL

Nos ensaios de inflamabilidade horizontal, o material é classificado quanto a sua velocidade de queima, dada em mm/min. Para a realização de tal ensaio, são necessários 10 corpos de prova para cada porcentagem de ATH, porém como falado já anteriormente, se a chama ultrapassar a marcação de 25 mm, em três corpos de provas já são o suficiente para a validação do ensaio. Vale destacar que durante a realização se faz necessário a cronometragem do tempo após a chama atingir a marcação de 25 mm e a distância em que a chama se extinguiu.

A seguir, será apresentado tabelas com os dados obtidos no ensaio, juntamente com suas velocidades já calculadas.

**Tabela 7 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU PURA**

Corpos de Prova	T (min)	L (mm)	v (mm/min)
1	3,22	75,00	23,44
2	3,60	75,00	20,83
3	3,87	75,00	19,38

Fonte: Autoria própria

**Tabela 8 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 10% de ATH**

Corpos de Prova	T (min)	L (mm)	v (mm/min)
1	6,25	75,00	12,00
2	4,83	54	11,18
3	5,35	75,00	14,02

Fonte: Autoria própria

**Tabela 9 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 20% de ATH**

Corpos de Prova	T (min)	L (mm)	v (mm/min)
1	6,07	69,00	11,37
2	5,67	75,00	13,23
3	0,34	Não alcançou 25 mm	-
4	0,50	Não alcançou 25 mm	-
5	5,95	75	12,6
6	4,50	35,00	7,70

Fonte: Autoria própria

**Tabela 10 - Dados do ensaio de inflamabilidade horizontal PU + 30% de ATH**

Corpos de Prova	T (min)	L (mm)	v (mm/min)
1	0,42	Não alcançou 25 mm	-
2	0,82	Não alcançou 25 mm	-

(continua)

<b>Corpos de Prova</b>	<b>T (min)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>v (mm/min)</b>
3	0,55	Não alcançou 25 mm	-
4	0,35	Não alcançou 25 mm	-
5	0,78	Não alcançou 25 mm	-
6	1,37	Não alcançou 25 mm	-
7	1,3	Não alcançou 25 mm	-
8	0,47	Não alcançou 25 mm	-
9	0,91	Não alcançou 25 mm	-
10	1,01	Não alcançou 25 mm	-

**Fonte: Autoria própria**

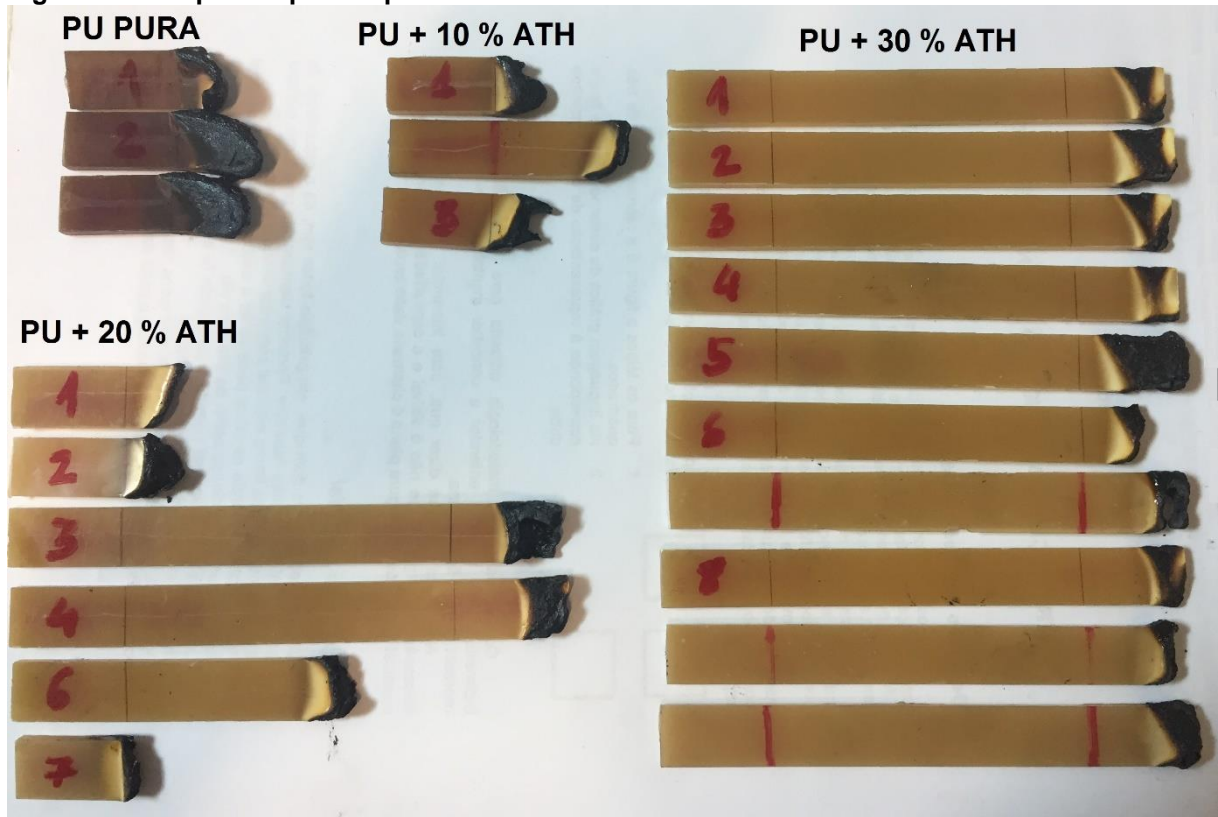
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Média ± Desvio Padrão</b>
	Velocidade de queima
PU Pura	21,22 ± 2,057
PU + 10 % de ATH	12,04 ± 1,46
PU + 20% de ATH	11,22 ± 2,47
PU + 30% de ATH	-

**Fonte: Autoria própria**

De acordo com os resultados nas tabelas, pode-se observar que a PU pura apresenta uma alta velocidade de queima em relação a poliuretana aditivada com ATH. Os valores de velocidades obtidos da PU pura e da mesma aditivada com 10 % de ATH ficaram semelhantes, bem próximas com o valor da média e com um desvio padrão de 2,05 e 1,46 respectivamente. A PU com 20 % de ATH também apresentou resultados satisfatórios, ou seja, velocidade de queima semelhante. Porém deve-se desprezar o corpo de prova 6. E por fim, não foi possível calcular a velocidade da poliuretana aditivada com 30 % de ATH, pois os 10 corpos de prova não ultrapassaram a marca de 25 mm inicial, demonstrando a influência deste percentual de ATH no resultando de resistência à chama.

A Figura 13, mostra os corpos de prova após o ensaio de inflamabilidade na horizontal.

Figura 13 - Corpos de prova após o ensaio de inflamabilidade na horizontal



Fonte: Autoria própria

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a grande utilização dos materiais poliméricos e compósitos nas indústrias automobilísticas e aeroespaciais, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma câmara de inflamabilidade e, bem como, a realização dos ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal da poliuretana derivada de óleos vegetais (PU) pura, e a mesma com adição de 10%, 20% e 30% de ATH da massa total.

Com a conclusão do desenvolvimento da câmara, foi possível a realização dos ensaios de queima e se percebeu o bom funcionamento da mesma, destaca-se ainda, que o custo de investimento na câmara desenvolvida é de aproximadamente 78% menor do que a câmara comercial. A única diferença entre elas é que a câmara comercial é automatizada, ou seja, apresenta micro controladores para facilitar no deslocamento do queimador, e nas cronometragem do tempo referente a queima, enquanto a câmara desenvolvida tanto a cronometragem quanto a movimentação do queimador é feita manualmente.

Posteriormente ao desenvolvimento da câmara, foram feitos ensaios de inflamabilidade vertical e horizontal na PU pura e a mesma com 10%,20% e 30% de ATH da sua massa total. Durante os ensaios observou-se que a poliuretana pura apresenta um baixa resistência a chama, enquanto a PU com 30% de ATH, apresentou a maior resistência a chama comparado com a de 10% e 20%.

De modo geral, conclui-se que a câmara está dentro dos requisitos exigidos pela norma e a efetividade do retardante de chama no polímero. E portanto, torna-se possível a realização desses ensaios de inflamabilidade em diferentes polímeros e com diferentes retardantes de chama.

### 5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

São propostas para trabalhos futuros:

- Ensaios de inflamabilidade na espuma de poliuretana, e a mesma aditivada com 10%,30% e 50% de Alumina Tri-Hidratada;

- Ensaio de inflamabilidade no composto de poliuretano com fibra de algodão, e a mesma aditivada com 10%, 20% e 30% de Alumina Tri-Hidratada.



## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3801 – 10:** Standard Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position, 2010.

\_\_\_\_\_. **ASTM D635 – 14:** Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position, 2014.

COSTA, R. R. C. **Aplicabilidade de modelos construtivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímero.** 2007. 171 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FELIX, Taís. **Produção de compósitos e nanocompósitos de poliestireno de alto impacto com propriedades anti-chamas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2010.

FERNEDA, A. B. **Estudo teórico-experimental do comportamento elastoplástico do poliuretano derivado do óleo de mamona (Ricinus Communis).** 135 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FISCHER, Bruna da S.; NUNES, Salvelino A., Hidróxido de Magnésio Marinho aplicado em Polietileno como retardante de chama alternativo aos compostos halogenados. **20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais,** Joinville, Santa Catarina, 2012.

FONSECA, Viviane M.; ALVES, Tatianny S.; BRAZ, Cristiano J. F.; CARVALHO, Laura H. Efeitos da adição de retardantes de chamas nas propriedades mecânicas na inflamabilidade de compósitos poliuretana/tecidos híbridos. **8º Congresso Brasileiro de Polímeros,** 2004.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M., Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia,** 1998.

GARRISON, T. F.; KESSLER, M. R.; LAROCK, R. C.; Effects of unsaturation and different ring-opening methods on the properties of vegetable oil-based polyurethane coatings. **Polymer,** v. 55, p. 1004-1011, 2014.

GEMAQUE, Marcos Jorge Alves. **Características de inflamabilidade de materiais poliméricos com aplicação no setor aeroespacial**. Dissertação (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 2012.

Hemais, Carlos A. **Polímeros e a Indústria Automobilística**. 2003.

JANG, Jyongsik; LEE, Eungki. Improvement of the flame retardancy of paper-sludge / polypropylene composite. *Polymer Testing*. South Korea, v. 20, p7-13, 2000.

KONG, X.; LIU, G.; CURTIS, J. M. Characterization of canola oil based polyurethane wood adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 31, p. 559- 564, 2011.

LINDEMAYER. Cristiane Kroll. **Estudo e avaliação de termoplásticos utilizados na confecção de órteses**. 2004. 57 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Bioengenharia, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2004.

MARTINS, J. C., *et. Al.*, **Avaliação das propriedades retardantes de chama de hidróxido de magnésio e alumínio com fibra de vidro em polipropileno**. 1º Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IF-SC, Campus Criciúma, 2011.

MU, Y.; WAN, X.; HAN, Z.; PENG, Y.; ZHONG, S. Rigid polyurethane foams based on activated soybean meal. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 124, p. 4331-4338, 2011.

NUNES, Salvelino A. **Retardantes de chama halogenados e não halogenados aplicados em poliolefinas**, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina.

PINHEIRO, M. S. M. Aplicação do poliuretano na fabricação dos para-choques de automóveis. **XVIII CREEM**. Erechim, 2011.

RABELLO, Marcelo Silveira. **Aditivção de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2000.

RAMOS, M. S. A.. **Estudo de retardantes de chama, isentos de halogéneos, em espumas de Poliuretano monocomponente.** Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química, 2015.

SILVA, V. R.; MOSIEWICKI, M. A.; YOSHIDA, M. I.; SILVA, M. C.; STEFANI, P. M.; MARCOVICH, N. E. Polyurethane foams based on modified tung oil and reinforced with rice husk ash II: Mechanical characterization. **Polymer Testing**, v. 32, p. 665-672, 2013.

da SILVA, A. A. X.; *et al.*, Projeto de Câmara de Ensaio de Inflamabilidade Vertical e Horizontal. **18º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da FATEC-SP**, São Paulo, 2016.

da SILVA, Vera Lúcia Dias. **Comportamento Mecânico e de Flamabilidade de Compósito de Polipropileno Reciclado com Fibra de coco e Hidróxido de Alumínio.** 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. 2006.

TAGUTI, Marcos, V. H. **Caracterização e modelagem do comportamento mecânico de poliuretana enriquecida com carbonato de cálcio.** 2015. 88f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

VERA, R. V. **Estruturas Aeronáuticas de Interior em Compósito Natural: Fabricação, Análise Estrutural e de Inflamabilidade.** 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.