



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LIZANDRA LIRA MADUREIRA

**POLÍMEROS UTILIZADOS EM ROUPAS DE SEGURANÇA  
ANTI-CHAMAS**

Recife  
2023

LIZANDRA LIRA MADUREIRA

**POLÍMEROS UTILIZADOS EM ROUPAS DE SEGURANÇA ANTI-  
CHAMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Carolina Lipparelli Morelli

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Madureira, Lizandra Lira.

Polímeros utilizados em roupas de segurança anti-chamas / Lizandra Lira  
Madureira. - Recife, 2023.

82 : il., tab.

Orientador(a): Carolina Lipparelli Morelli

Coorientador(a): Carolina Lipparelli Morelli

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais -  
Bacharelado, 2023.

8.

1. Polímeros. 2. Fibras têxteis. 3. Roupas anti-chamas. 4. Retardante de  
chamas. I. Morelli, Carolina Lipparelli. (Orientação). II. Morelli, Carolina  
Lipparelli. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – EEP  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ATA DE DEFESA

Trabalho de Conclusão de Curso

A aluna **Lizandra Lira Madureira** apresentou seu Trabalho de Conclusão de Curso 2 – TCC2 em 04/10/2023 perante a banca composta por Carolina Lipparelli Morelli (Orientadora), Dayanne Diniz de Souza (Examinadora Interna) e Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno). A apresentação do trabalho intitulado “**Polímeros utilizados em roupas de segurança anti-chama**” teve duração de 30 minutos. Durante a apresentação, a graduanda mostrou a relevância de seu trabalho e discorreu sobre o tema de forma clara e objetiva. Depois da apresentação, a banca examinadora passou a fazer comentários e sugestões sobre o trabalho, finalizando com algumas arguições à candidata. Em separado a banca se reuniu e deliberou pela aprovação da candidata, atribuindo-lhe a média 8,0 (oito).

Banca examinadora:

Profa. Carolina Lipparelli Morelli (Orientadora)

1. \_\_\_\_\_; Nota: (8,0)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CAROLINA LIPPARELLI MORELLI  
Data: 05/10/2023 14:15:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dayanne Diniz de Souza (Examinadora Interna)

2. \_\_\_\_\_; Nota: (8,0)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DAYANNE DINIZ DE SOUZA  
Data: 05/10/2023 16:48:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno)

3. \_\_\_\_\_; Nota: (8,0)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** OSCAR OLIMPIO DE ARAUJO FILHO  
Data: 05/10/2023 18:06:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 04 de Outubro de 2023

A Deus por ter me dado força ao longo desses anos para finalizar essa graduação. Aos meus pais, Edvan (*in memoriam*) e Ivaneide, por todo o amor, incentivo e dedicação para seguir os meus objetivos e realizar meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu graça, sabedoria, inteligência e paciência ao longo desses anos para enfrentar todas as dificuldades durante a graduação.

Aos meus pais Edvan Pinto Madureira filho (*in memoriam*) e Ivaneide de Lira Madureira, ao meu irmão Yehudah Yehzekiel Lira Madureira, pelo apoio, força e compreensão, por acreditar no meu esforço, todos os dias, pelas abdições que fizeram para que eu chegasse até aqui, desde o ensino fundamental, médio, técnico e graduação.

A minha orientadora Profa. Dra. Carolina Lipparelli Morelli, meus sinceros agradecimentos pelos conselhos, conhecimento, oportunidades de crescimento profissional e paciência no ensino.

Aos meus amigos que eu fiz ao longo da graduação, que estiveram presentes nos momentos bons e ruins, um ajudando ao outro e deixando essa graduação mais leve.

A esta Universidade, ao Departamento de Engenharia Mecânica, pela estrutura oferecida para realização do curso. Ao INTM, onde comecei a trilhar o caminho da pesquisa na iniciação científica voluntária, projeto de extensão, empresa júnior e a aprender o potencial da Engenharia de Materiais para a sociedade.

Sei que podes fazer todas as coisas;  
nenhum dos teus planos pode ser frustrado.

Jó 42:2

## RESUMO

A proteção contra incêndios é uma preocupação vital em diversas áreas de atuação, especialmente em atividades de alto risco. Nesse contexto, as roupas antichamas desempenham um papel crucial na segurança dos trabalhadores expostos a situações de fogo e calor extremo. Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma compilação através de uma revisão bibliográfica sobre os impactos dos polímeros com retardantes de chama na sociedade, na área industrial e no meio ambiente. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica para contextualizar a importância da proteção contra chamas em diferentes setores e atividades profissionais. Em seguida, foram analisadas as propriedades dos polímeros que conferem às roupas antichamas sua capacidade de resistir ao fogo, como a baixa inflamabilidade e a retardância de chamas. Em suma, este trabalho proporciona uma visão abrangente sobre os polímeros utilizados em roupas antichamas, suas propriedades, processos de fabricação, avaliação de desempenho e aplicações práticas. Fica evidente a importância desses materiais na prevenção de acidentes relacionados a incêndios, bem como as possibilidades de avanço e aprimoramento nessa área. Recomenda-se, portanto, uma maior atenção e investimento no desenvolvimento de roupas antichamas para garantir a segurança dos profissionais expostos a riscos de fogo e calor intenso.

**Palavras-chaves:** Polímeros; Fibras têxteis; Roupas anti-chamas; Retardante de chamas.

## **ABSTRACT**

Fire protection is a vital concern in many areas of activity, especially in high-risk activities. In this context, flame-retardant clothing plays a crucial role in the safety of workers exposed to situations of fire and extreme heat. The main aim of this work is to compile a literature review on the impact of flame retardant polymers on society, industry and the environment. Initially, a literature review was carried out to contextualize the importance of flame protection in different sectors and professional activities. This was followed by an analysis of the properties of polymers that give flame-retardant clothing its ability to resist fire, such as low flammability and flame retardancy. In short, this work provides a comprehensive overview of the polymers used in flame-retardant clothing, their properties, manufacturing processes, performance evaluation and practical applications. The importance of these materials in preventing fire-related accidents is evident, as are the possibilities for advancement and improvement in this area. Greater attention and investment in the development of flame-retardant clothing is therefore recommended in order to guarantee the safety of professionals exposed to the risks of fire and intense heat.

**Keywords:** Polymers; Textile fibers; Flame-retardant clothing; Flame retardant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de cadeias poliméricas (A) Cadeia sem ramificação,.....	19
Figura 2 - Classificação das fibras.....	21
Figura 3 - Previsão da produção de fibras no mundo.....	24
Figura 4 – Consumo mundial de fibras de 1960 a 2010.....	25
Figura 5 - Evolução do fogo no tecido com tratamento retardante a chamas e sem retardante a chamas. ....	26
Figura 6 - Triângulo do fogo. ....	28
Figura 7 - Tetraedro do fogo.....	29
Figura 8 - Identificação classe A. ....	29
Figura 9 - Identificação classe B. ....	30
Figura 10 - Identificação classe C. ....	30
Figura 11 - Identificação classe D. ....	31
Figura 12 - Identificação classe K. ....	31
Figura 13 - Processo de queima.....	34
Figura 14 - Classificação dos materiais em função do valor LOI. ....	37
Figura 15 - Ilustração do processo de transferência de calor durante a queima.....	38
Figura 16 – Ação retardante a chamas com ação de halogenados.....	44
Figura 17 - Funcionamento dos retardantes de chamas.....	45
Figura 18 - Diferentes camadas de roupas de proteção, (a) diagrama esquemático, (b) imagem de microscopia óptica mostrando a seção transversal da estrutura de três camadas. ....	49
Figura 19- Tecidos de revestimento externo usados em conjuntos de roupas de combate a incêndio, (a) tecido de estrutura de trama rip stop, (b) tecido de estrutura de trama de sarja quebrada. ....	51
Figura 20 - Exemplos de barreiras de umidade usadas em conjuntos de roupas de combate a incêndios, (a) barreira de umidade de três camadas com suporte de tecido, (b) barreira de umidade de duas camadas com suporte de tecido não tecido.....	52
Figura 21 – Composição de uma roupa de proteção. (a) Colete de proteção contra incêndio. ....	54
Figura 22 - Roupas anti-chamas DuPont Nomex®. ....	55
Figura 23 - Uniforme com ação anti-chamas. ....	56

Figura 24 - Execução e realização da prova de fogo utilizando o manequim RALPH no laboratório BTTG de Manchester.....	57
Figura 25 - Esquema da bancada de ensaios térmicos com manequim THERMOMAN. .....	58
Figura 26 – Formas físicas da fibra aramida. ....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cadeias macromoleculares em meros. ....	18
Quadro 2 - Classificação geral dos polímeros. ....	20
Quadro 3 - Exemplo das Fibras Naturais. ....	22
Quadro 4 - Exemplo de Fibras Sintéticas. ....	23
Quadro 5 – Comparação entre as fibras e suas propriedades. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo mundial de fibras.....	24
Tabela 2 - Temperatura de decomposição de alguns polímeros.....	35
Tabela 3 - Pontos de fulgor e de ignição de alguns polímeros.....	36
Tabela 4 - Demonstração dos materiais têxteis em relação à chama.....	37
Tabela 5 – Percentual de consumo de retardantes de chamas. ....	47
Tabela 6 – Caracterização da propriedade térmica média da jaqueta apresentada na figura acima. ....	54
Tabela 7 – Comparação entre para-aramida e a meta-aramida. ....	64
Tabela 8 – Comparação entre vários tipos de Kevlar® .....	65

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1. OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1. Objetivo geral</b> .....	16
<b>1.1.2. Objetivos específicos</b> .....	16
1.2 . JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
2.1. Polímeros .....	18
2.2. Fibras têxteis poliméricas .....	20
2.3. Fibras utilizadas em roupas anti-chamas .....	25
2.4. Processo de combustão .....	28
2.5 Comportamento do polímero quando exposto à chama.....	33
<b>2.5.1. Aquecimento</b> .....	34
<b>2.5.2. Pirólise</b> .....	34
<b>2.5.3. Ignição</b> .....	35
<b>2.5.4. Combustão e Propagação</b> .....	36
<b>2.5.5. Extinção</b> .....	37
2.6. Retardantes de chama .....	38
<b>2.6.1. Mecanismo de Ação Química dos Retardantes de chamas</b> .....	41
<b>2.6.2. Mecanismo de Ação Física dos Retardantes de chamas</b> .....	42
2.7. Roupas de segurança anti-chamas .....	47
<b>2.7.1. Características das roupas de segurança anti-chamas</b> .....	48
<b>2.7.2. Simulações físicas para as roupas de segurança anti-chamas</b> .....	56
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	59
<b>4. RESUMO DOS POLÍMEROS ABORDADOS</b> .....	60
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	70
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL) as roupas anti-chamas são vestimentas que não expõem a pele aos efeitos do arco elétrico ou fogo instantâneo. Elas são projetadas com tecidos com propriedades retardantes de chamas. Estes tecidos destinam-se a proteger trabalhadores que são frequentemente expostos a altos níveis de calor ou chamas em sua área de atuação (Abracopel, 2012).

Tecidos anti-chamas são feitos de fibras poliméricas com propriedades retardantes de chama, que ajudam a proteger os trabalhadores em muitas áreas como por exemplo: indústrias, hospitais e áreas de segurança pública e resgate, como no caso dos bombeiros (Gallo; Agnelli., 1998).

Polímeros são macromoléculas constituídas por unidades de repetição (meros) ligadas covalentemente entre si, e são muito usados na forma de fibras têxteis para confecção de roupas em geral. De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), fibra têxtil é toda matéria natural, de origem vegetal, animal ou mineral, assim como toda matéria artificial ou sintética, que, pela alta relação entre seu comprimento e seu diâmetro, e, ainda, por suas características de flexibilidade, suavidade, elasticidade, resistência, tenacidade e finura, está apta às aplicações têxteis (Inmetro, 2019).

Quando expostos a chamas os polímeros podem apresentar diferentes comportamentos. Porém, em geral, possuem baixa resistência ao fogo, o que significa que, quando expostos a altas temperaturas, podem ser decompostos e inflamar com facilidade. O processo de queima do polímero, de modo geral, passa por diferentes etapas, como: aquecimento, pirólise, ignição, combustão e propagação, finalizando com a extinção. Quando um polímero é exposto ao fogo, a temperatura aumenta e o material começa a se decompor, liberando gases que podem ser inflamáveis. Esses gases reagem com o oxigênio do ar e se incendiam, propagando as chamas (Gallo; Agnelli., 1998).

Uma das formas de alterar o comportamento de um polímero é usando aditivos retardantes de chama. Os aditivos retardantes de chama são utilizados através da incorporação física de certas substâncias durante a etapa de processamento dos polímeros. Existem mais de 200 tipos distintos de retardantes de chama, e os elementos químicos mais frequentemente usados

em sua composição incluem bromo, cloro, fósforo, nitrogênio e hidróxidos metálicos (Alago, 2020).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Retardantes de Chama (ABICHAMA), os retardadores de chama são produtos químicos que retardam a ignição, reduzem a taxa de combustão e minimizam as emissões de fumaça dos materiais nos quais são incorporados. Eles são usados para reduzir a inflamabilidade dos polímeros e aumentar sua resistência ao fogo. Isso significa que o uso de retardante de chama retarda a propagação do fogo, o que proporciona um dos maiores benefícios do uso desse tipo de produto: salvar vidas (Abichama, 2021).

Os aditivos anti-chamas atuam como barreira física ou química, retardando ou mesmo impedindo a propagação das chamas. Quando o polímero tratado com retardante de chama é exposto ao fogo, uma das possibilidades é o aditivo liberar gases que se misturam com os gases inflamáveis, interrompendo a reação em cadeia que sustenta as chamas. Essa reação química, portanto, torna o polímero mais resistente ao fogo, aumentando a sua segurança em situações de incêndio (Gallo; Agnelli, 1998).

Desse modo, o presente trabalho se propõe a fazer um profundo levantamento bibliográfico sobre polímeros aplicados em roupas de segurança anti-chamas. E o objetivo geral será analisar a importância dos polímeros retardantes de chamas aplicados em roupas de segurança.

## 1.1. OBJETIVOS

Neste capítulo, são expostos os objetivos que orientaram tanto o desenvolvimento deste trabalho quanto a pesquisa em questão.

### 1.1.1. Objetivo geral

Realizar uma análise através de uma revisão bibliográfica sobre a importância e os impactos dos polímeros com propriedades retardantes de chama aplicados em roupas de segurança.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma abordagem sobre os conceitos, classificações e comportamento dos materiais poliméricos retardantes de chamas;
- Conceituar retardantes de chamas e seus diferentes tipos;
- Apresentar algumas aplicações de polímeros utilizados em roupas de segurança;
- Identificar os polímeros com propriedades retardantes de chamas e analisar a importância desses polímeros;

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Os polímeros com propriedades retardantes de chama são importantes em roupas de segurança uma vez que podem ajudar a prevenir ou reduzir a gravidade dos ferimentos causados pelo fogo ou exposição ao calor. Roupas de segurança feitas com esses polímeros podem ajudar a proteger os trabalhadores em vários setores, tais como petróleo e gás, fabricação de produtos químicos e combate a incêndios.

Quando expostos a altas temperaturas, os tecidos convencionais podem se inflamar e continuar queimando, aumentando o risco de ferimentos ao usuário. Os polímeros retardantes de chama, por outro lado, são projetados para inibir ou, quando possível, eliminar a propagação do fogo, quando expostos a chamas

ou calor, limitando a propagação do fogo e reduzindo o risco de ferimentos, além de ter resistência a produtos químicos e à abrasão, durabilidade e conforto. Essas propriedades podem ajudar a garantir que as roupas de segurança permaneçam eficazes na proteção dos trabalhadores ao longo do tempo, mesmo em ambientes de trabalho perigosos.

Há diversos ambientes em que o uso de roupas de segurança anti-chamas é essencial para prevenir acidentes graves. Alguns exemplos incluem:

- Indústria química: Trabalhadores que manuseiam substâncias inflamáveis, como produtos químicos, solventes e gases, estão expostos a riscos de explosões e incêndios. Nesse contexto, as roupas de segurança anti-chamas são cruciais para garantir a proteção pessoal dos trabalhadores.
- Setor de petróleo e gás: Profissionais que trabalham em plataformas *offshore*, refinarias e terminais de distribuição de combustíveis estão sujeitos a riscos de fogo e explosão em decorrência das operações com derivados de petróleo. O uso de roupas de segurança anti-chamas é obrigatório para minimizar esses riscos.
- Bombeiros e brigadistas: Esses profissionais atuam diretamente no combate a incêndios em diferentes ambientes e cenários. As roupas de segurança anti-chamas são fundamentais para proteger o corpo contra o calor intenso, chamas e outros perigos presentes no local do incidente.

No geral, o uso de polímeros retardantes de chama em roupas de segurança é crucial para ajudar a proteger os trabalhadores contra os perigos em qualquer ambiente em que haja risco de exposição a chamas, altas temperaturas e materiais inflamáveis. Com isso, o uso de roupas de segurança anti-chamas é imprescindível para prevenir acidentes graves, lesões e mortes no local de trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Polímeros

Conforme Mano e Mendes (1999), os polímeros são macromoléculas que se destacam pelo seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Eles são compostos por unidades químicas, chamadas meros, que se repetem de forma regular ao longo da cadeia polimérica através de ligações covalentes. O grau de polimerização diz respeito ao número de meros que compõem a cadeia polimérica.

A expressão homopolímero é utilizada quando o polímero é constituído por apenas um tipo de unidade de repetição. Já a designação copolímero é empregada quando o polímero é composto por mais de um tipo de mero, proveniente de dois ou mais monômeros (Silva, A. L. B. B. E; Silva, E. O. da, 2003). O Quadro 1 traz exemplos de tipos de meros.

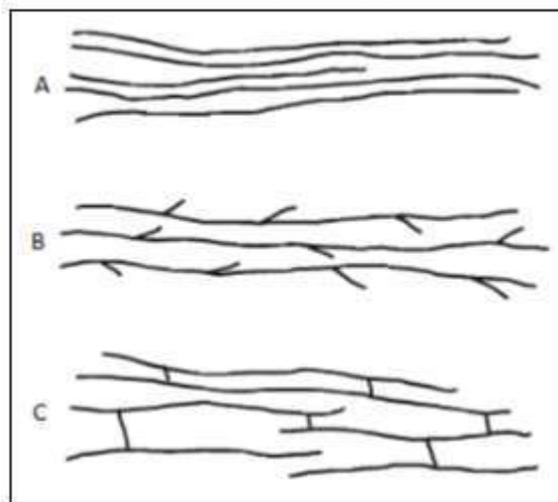
Quadro 1 - Cadeias macromoleculares em meros.

<b>POLÍMERO</b>		<b>REPRESENTAÇÃO</b>
Homopolímero		...A-A-A-A-A...
Homopolímero		...B-B-B-B-B...
Copolímero	Alternado	...A-B-A-B-A-B...
	Bloco	...A-A-A-B-B-B...
	Aleatório	...A-A-B-A-B-B...

Fonte: Adaptado Mano e Mendes, 1999.

Existem três tipos principais de polímeros em relação à estrutura de suas cadeias: os polímeros lineares, que não apresentam ramificações; os polímeros ramificados, que possuem graus variáveis de complexidade decorrentes de suas ramificações; e os polímeros reticulados, que possuem cadeias altamente complexas com ligações cruzadas entre si, que são ligações covalentes intermoleculares (Mano; Mendes, 1999). Na Figura 1 é apresentada a representação de cadeias poliméricas.

Figura 1 - Representação de cadeias poliméricas (A) Cadeia sem ramificação, (B) Cadeia com ramificações e (C) Cadeia reticulada.



Fonte: Adaptado Mano e Mendes, 1999.

Os polímeros podem ser divididos em dois grandes grupos de acordo com sua origem: naturais e sintéticos. Além disso, a estrutura química da cadeia polimérica, ou seja, os grupos funcionais presentes na macromolécula, pode levar a inúmeras classificações arbitrárias dos polímeros, incluindo poliolefinas, poliamidas, poliésteres, poliéteres, poliacetais, poliuretanos, entre outros (Callister Jr; Rethwisch, 2016).

Os materiais poliméricos também podem ser classificados em três grupos principais com base em seu comportamento mecânico: borrachas, plásticos e fibras. Cada um desses materiais tem características típicas. A borracha, ou elastômero, é um material macromolecular que apresenta grande elasticidade em uma ampla faixa de temperaturas (Mano; Mendes, 1999).

O plástico, por sua vez, é um material macromolecular que, embora seja sólido em seu estado final, pode se tornar fluido e moldável em algum estágio de seu processamento, geralmente sob ação combinada de calor e pressão. Os plásticos podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos, com base em suas características de fusibilidade e/ou solubilidade, que determinam o processo tecnológico mais adequado para seu processamento. Os polímeros termoplásticos podem ser fundidos por aquecimento e solidificam por resfriamento em um processo reversível, sendo que os polímeros lineares ou ramificados pertencem a esse grupo. Esses polímeros também podem ser dissolvidos em solventes apropriados. Já os polímeros termorrígidos, quando

submetidos a altas temperaturas, se tornam infusíveis e adquirem uma estrutura reticulada, com ligações cruzadas (Canevarolo Jr, 2006).

Fibra é um termo geral usado para descrever um termoplástico orientado com pequena seção transversal e alta razão entre comprimento e diâmetro (superior a 100). As cadeias poliméricas estão altamente orientadas ao longo da direção longitudinal da fibra, apresentando maior resistência mecânica nessa direção (Canevarolo Jr, 2006). No Quadro 2 é exibida a classificação geral dos polímeros.

Quadro 2 - Classificação geral dos polímeros.

<b>CRITÉRIO</b>	<b>CLASSE DO POLÍMERO</b>	
Origem do polímero	Natural	Animal
		Vegetal
		Mineral
	Sintética	
Número de meros	Homopolímero	
	Copolímero	
Estrutura química da cadeia polimérica	Poliamida, poliéster, polipropileno, etc.	
Fusibilidade e/ou Solubilidade do polímero	Termoplástico	
	Termorrígido	
Comportamento mecânico do polímero	Plástico	
	Borracha ou elastômero	
	Fibra	

Fonte: Adaptado Mano e Mendes, 1999.

## 2.2. Fibras têxteis poliméricas

Uma fibra têxtil é geralmente definida como uma matéria-prima caracterizada pela flexibilidade, finura, com pequena seção transversal e uma elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100), podendo ser composta de material polimérico ou não (Ladchumananandasivam, 1999).

De acordo com Canevarolo Jr (2006) uma fibra polimérica é um termoplástico orientado com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (eixo maior), devendo satisfazer

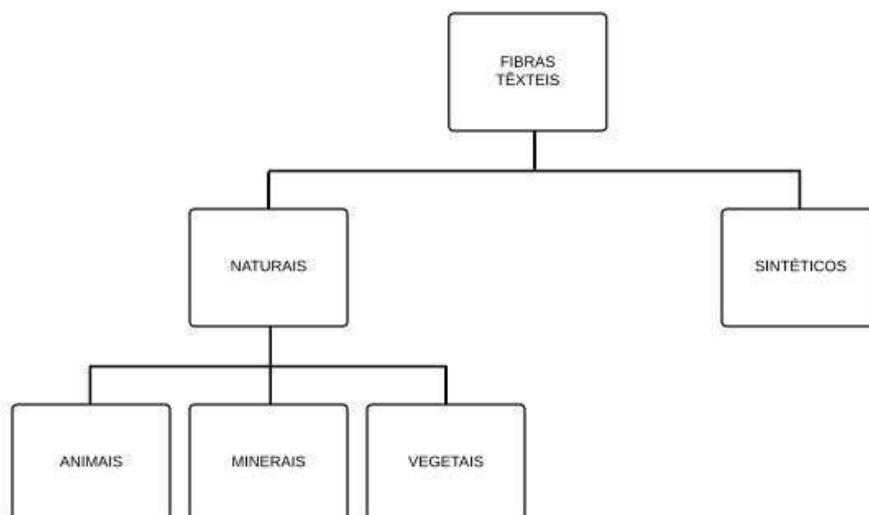
a condição geométrica do comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro ( $L/D > 100$ ).

As fibras têxteis, que podem ser naturais ou sintéticas, representam uma grande porcentagem do total de polímeros consumidos em todo o mundo, uma vez que as necessidades básicas de alimentação, vestuário e habitação aumentam com o crescimento da população (Mano; Mendes, 1999).

Para ser considerada uma fibra têxtil industrial de qualidade, é fundamental que ela apresente uma série de características essenciais, tais como estabilidade em relação ao ar, luz, calor e umidade; resistência a microorganismos e insetos; capacidade de suportar solventes, detergentes e oxidantes; facilidade para tingir; alta resistência mecânica com baixa deformação permanente sob tração; alta resiliência, pouco amassamento e facilidade de empacotamento; capacidade de resistir à abrasão; e baixa absorção de odores (Kuasne, 2008).

A cadeia produtiva do setor têxtil pode ser classificada, em primeiro lugar, de acordo com as fibras têxteis empregadas, conforme fluxograma representado na Figura 2. As fibras naturais, por exemplo, são aquelas que já existem na natureza em sua forma bruta, mas que precisam passar por alguns processos físicos para se tornarem fios. Dentro dessa categoria, é possível identificar três subgrupos, de acordo com sua origem: fibras têxteis animais, fibras têxteis vegetais e fibras têxteis minerais, conforme Quadro 3.

Figura 2 - Classificação das fibras.



Fonte: Adaptado de Kuasne, 2008.

Quadro 3 - Exemplo das Fibras Naturais.

<b>FIBRAS NATURAIS</b>		
<b>ANIMAIS</b>	Lã e pelos finos	Angorá
		Cachemira
		Coelho
		Lã de ovelha
		Mohair
	Pelos grossos	Cabra
	Seda	Cultivada
		Silvestre
<b>MINERAIS</b>	Amianto (asbesto)	Crisotila
		Crocidolita
<b>VEGETAIS</b>	Caules	Cânhamo
		Juta
		Linho
		Malva
		Rami
	Folhas	Caroá
		Sisal
		Tucum
	Frutos e sementes	Algodão
		Cocô

Fonte: Adaptado de Kuasne, 2008.

As fibras sintéticas, ao contrário das fibras naturais, não são encontradas na natureza. Em vez disso, elas são produzidas pelo homem através de processos de síntese química, formando macromoléculas sintéticas. Exemplos de fibras não naturais incluem o poliéster, a poliamida, o polipropileno, o acrílico, o elastano, entre outros. No Quadro 4 observar-se exemplos de fibras não naturais.

Quadro 4 - Exemplo de Fibras Sintéticas.

<b>FIBRAS SINTÉTICAS</b>			
<b>ANIMAIS</b>	Caseína		
<b>VEGETAIS</b>	Alginatos		
	Celulose	Celulose regenerada	Cupro
			Celulose
	Ésteres de celulose		Liocel
			Acetato
Triacetato			
<b>POLÍMEROS SINTÉTICOS</b>	Acrílica		
	Elastana		
	Elastodieno		
	Modacrílica		
	Poliamida		
	Policarbamida		
	Policloreto de vinila		
	Policloreto de vinilideno		
	Policlorofluoretileno		
	Poliéster		
	Poliestireno		
	Politetrafluoretileno		
	Poliuretano		
	Vinal		
	Vinilal		
<b>OUTRAS FIBRAS</b>	Carbono		
	Vidro		
	Metálico		
	Escória		
	Rocha		

Fonte: Adaptado de Kuasne, 2008.

As fibras naturais apresentam várias propriedades semelhantes, tais como: fácil e rápida combustão, odor semelhante ao de papel queimado, produção de resíduos leves e cinzas que variam de negro a acinzentado. Embora a celulose seja decomposta por soluções fortes de ácidos minerais, ela exibe excelente resistência a soluções alcalinas (Kuasne, 2008).

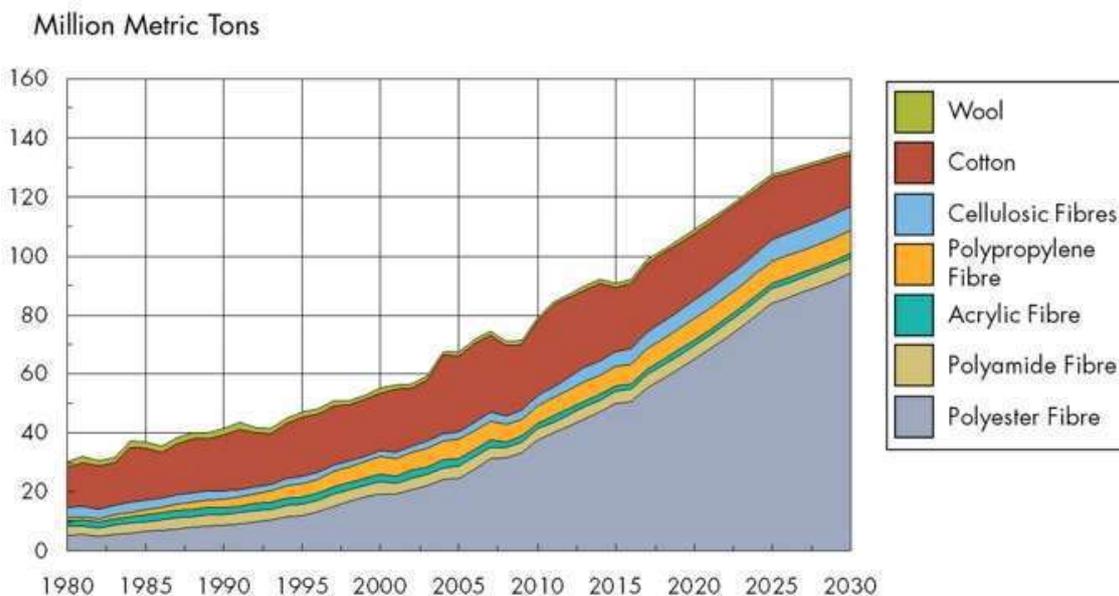
As fibras sintéticas são excelentes para a indústria, não dependem das oscilações das colheitas, são fabricadas com padrão, rapidez e possuem como suas principais características: baixa espessura (medida em título), resistência mecânica (tenacidade), resistência à abrasão, resistência bacteriológica, flexibilidade, reciclabilidade, estabilidade térmica, processabilidade e baixa absorção de umidade (Pimenta, 2023).

Uma grande vantagem das fibras sintéticas é a capacidade de serem modificadas durante o processo de fabricação, o que permite uma ampla gama de possibilidades para ajustar suas características, como caimento, textura, brilho, tratamentos (antibacterianos, anti-chamas), absorção de água,

resistência, volume, entre outras (Kuasne, 2008). A Figura 3 e a Figura 4 apresenta um gráfico com os percentuais de produção de fibras mundiais e a Tabela 1 mostra o consumo das fibras mundialmente.

Figura 3 - Previsão da produção de fibras no mundo.

### World fibre production 1980 – 2030



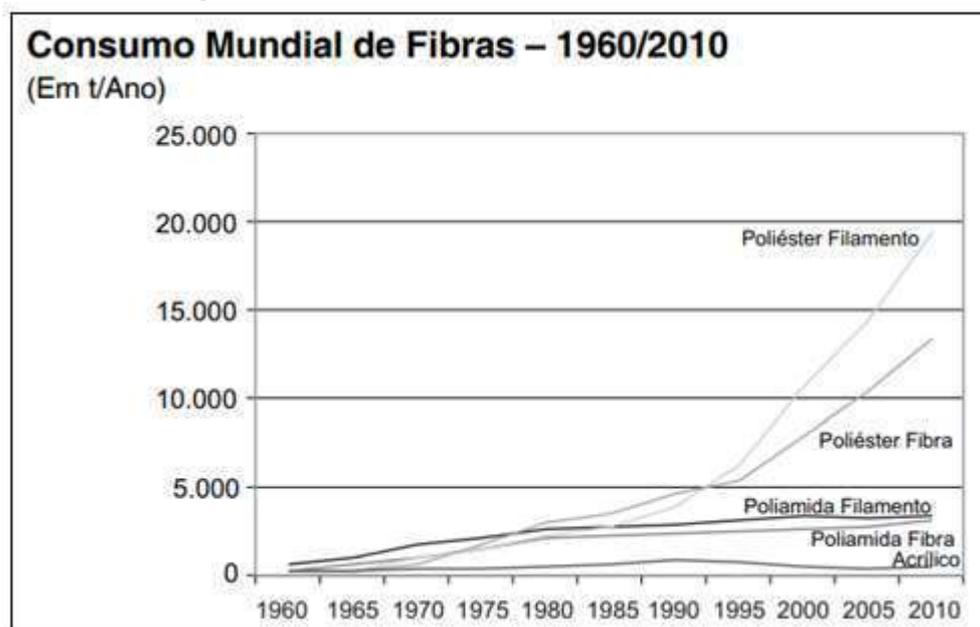
Fonte: Fryer e Johnson, 2000.

Tabela 1 - Consumo mundial de fibras

Fibras	Consumo		Taxa de crescimento (%)		
	2002 (Mil t)	2003 (Mil t)	2000	2003	2004
<b>Fibras naturais</b>	22.012	22.249	1,8	1,1	2
<b>Fibras não naturais</b>	33.963	35.186	4,2	3,6	4,8
<b>Acrílico</b>	2.690	2.685	1,6	-0,2	3,8
<b>Poliéster</b>	21.027	22.154	5,8	5,4	6,5
<b>Nylon</b>	3.912	3.911	0,1	0	0,3
<b>Total Geral</b>	55.975	57.435	3,3	2,6	3,7

Fonte: Adaptado de Barbosa et al, 2004.

Figura 4 – Consumo mundial de fibras de 1960 a 2010.



Fonte: Adaptado de Barbosa et al, 2004.

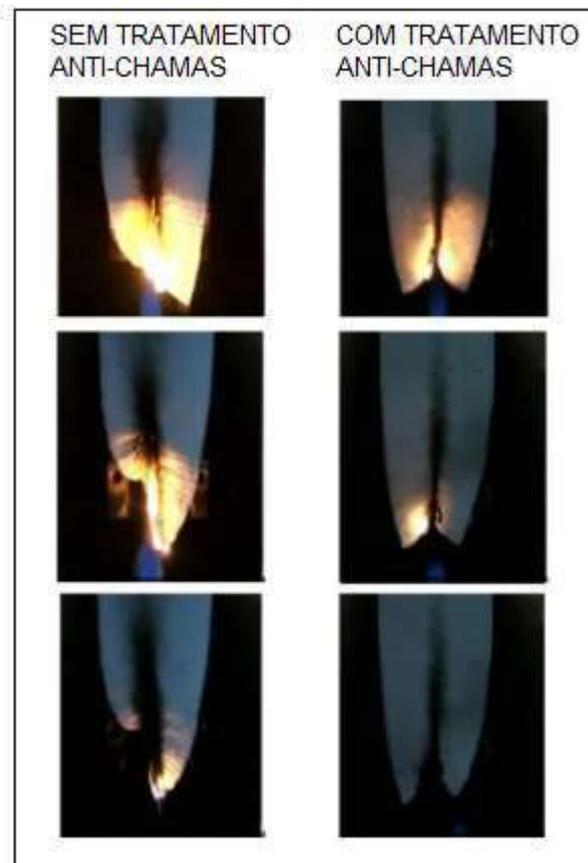
### 2.3. Fibras utilizadas em roupas anti-chamas

A composição da fibra é determinante para sua resistência ao fogo. Fibras celulósicas, como o linho, viscose e algodão, são mais propensas a incendiar facilmente em temperaturas mais baixas, enquanto as fibras proteicas, como a lã e o pelo, só inflamam em temperaturas mais altas e queimam lentamente, evitando a propagação da combustão. As fibras termoplásticas, como poliamida e poliéster, têm a capacidade de encolher quando expostas a uma chama e, devido à sua temperatura de fusão ser menor do que a temperatura de ignição, tendem a derreter em temperaturas relativamente baixas. Quando expostas a uma chama, a temperatura aumenta e elas começam a queimar, porém, se a chama for removida, a propagação do fogo é interrompida (Araújo; Castro, 1986).

Fibras naturais sem tratamento retardante de chama tendem a queimar de forma contínua até que todo o material combustível seja consumido, mesmo após a retirada da fonte de calor. Por outro lado, fibras sintéticas de polímeros termoplásticos que não possuem resistência à chama tendem a derreter (Alves, 2016).

Nos tecidos resistentes à chama, a queima cessa quase que instantaneamente quando a fonte de calor é retirada, como mostrado na Figura 5 (Miyada *et al.*, 2010).

Figura 5 - Evolução do fogo no tecido com tratamento retardante a chamas e sem retardante a chamas.



Fonte: Garcia e Monteiro, 2010.

Fibras sintéticas como acetato, polipropileno, que derretem em temperaturas abaixo de 315°C, não são adequadas para roupas resistentes ao fogo, seja utilizada sozinha ou em combinação com outros tecidos. Portanto, tecidos com essas fibras não devem ser utilizados em vestimentas resistentes ao fogo (Miyada *et al.*, 2010).

As propriedades exigidas dos tecidos que protegem do calor e das chamas são: alto nível de retardamento da chama e alta proteção contra lesões ao portador da roupa, integridade do tecido mantendo uma barreira e não tendo exposição direta ao risco, baixo encolhimento, boa camada de isolamento do ar, bom isolamento térmico de modo a dar tempo do usuário escapar antes do calor e o fogo causarem danos à sua saúde, fácil de limpar e resistente a lavagem,

sem perder suas características retardantes de chama, além de ser confortável (Alves, 2016).

A lã tem inflamabilidade média a baixa, mas pode ser tornada à prova de fogo, através de tratamentos químicos, revestimentos intumescentes, Misturar a lã com fibras que são naturalmente resistentes ao fogo pode tornar todo o material mais seguro contra incêndios, alguns métodos de fabricação podem incorporar tratamentos anti-chamas diretamente na lã durante o processo de produção, garantindo uma proteção duradoura, cobrir a lã com tecidos ou materiais que sejam naturalmente à prova de fogo pode ser uma estratégia eficaz para tornar o produto final à prova de fogo. Feltros de alta densidade podem ser elaborados com lã, o que pode torná-la resistente a temperaturas mais altas do que o algodão (Alves, 2016).

Feltros de alta densidade confeccionados a partir de lã apresentam uma notável resistência a temperaturas elevadas em comparação com aqueles fabricados com algodão, uma qualidade atribuída às propriedades intrínsecas distintivas da lã. O ponto de ignição superior da lã, sua habilidade de autoextinção, e a sua excepcional capacidade de isolamento térmico contribuem para sua durabilidade e integridade estrutural em condições de alta temperatura. Além disso, a lã pode ser submetida a tratamentos com retardadores de chama, ampliando ainda mais sua resistência ao fogo (Araújo; Castro, 1986).

Estas características singularmente favoráveis posicionam a lã como uma escolha preferencial em aplicações sujeitas a ambientes de temperatura elevada, garantindo um desempenho robusto e uma segurança aprimorada. Já o algodão é inflamável e queima, a menos que seja tratado para ser à prova de chamas. A chamuscagem ocorre em torno de 230 °C (Araújo; Castro, 1986).

O Nylon<sup>®</sup> (poliamida) possui sua temperatura de início de amolecimento em cerca de 235 °C e sua fusão ocorre em torno de 260 °C. A poliamida possui resistência a chamas e propriedades retardantes de calor. As propriedades retardantes de chama são atribuídas à presença de grupos amida (-NH-CO-) em sua estrutura molecular. Estes grupos contêm átomos de nitrogênio, que têm a capacidade de absorver e dissipar calor, retardando a propagação das chamas. Durante a combustão, a poliamida libera gases incombustíveis que criam uma barreira física contra a propagação do fogo. Além disso, as ligações covalentes na estrutura polimérica conferem estabilidade às

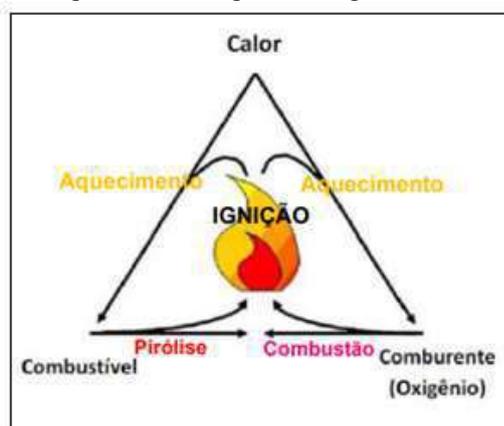
propriedades mecânicas e estruturais do Nylon® em altas temperaturas, mantendo sua integridade mesmo próximo ao ponto de fusão. Testes mostraram que, após 1000 horas em ar seco a 260 °C, sua carga de ruptura à temperatura ambiente foi cerca de 65% do valor antes da exposição (Araújo; Castro, 1986).

Já a poliacrilonitrila possui ponto de fusão ligeiramente superior à fibra de poliamida, em torno de 280 °C. A fibra de poliéster, constituída por polietileno tereftalato, apresenta inflamabilidade semelhante à lã, com fusão ocorrendo a 260 °C e amolecimento a aproximadamente 235 °C. A fibra de poliéster, composta de polietileno tereftalato, e a lã compartilham uma inflamabilidade comparável, ambas suscetíveis à combustão quando expostas ao calor. No entanto, a lã tende a queimar mais lentamente e possui uma propensão maior à autoextinção do que o poliéster. Os poliuretanos podem ser utilizados em temperaturas de até 100-120 °C e resistem até 200 °C por períodos muito curtos (Araújo; Castro, 1986).

#### 2.4. Processo de combustão

O fogo é uma reação de combustão rápida que produz luz e calor. Ele é composto por três elementos distintos que formam o chamado "Triângulo do Fogo", são eles: o combustível (o material que é queimado, como a madeira), o comburente (a entidade que permite a combustão, como o oxigênio) e o calor. Sem um ou mais desses elementos, o fogo não pode existir. Ao contrário das formas de matéria sólida, líquida ou gasosa, o fogo é uma forma de energia (Areaseg, 2023). Na Figura 6 é possível observar o triângulo do fogo.

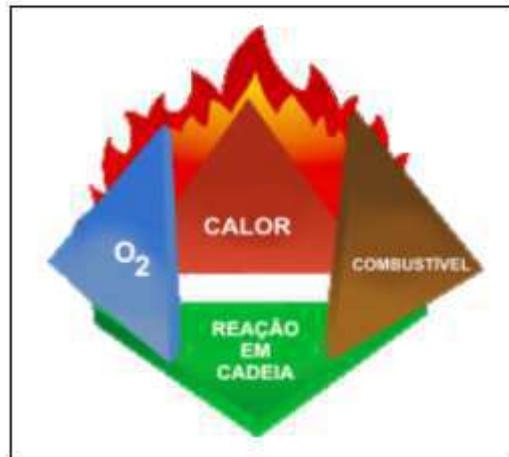
Figura 6 - Triângulo do fogo.



Fonte: Oliveira, 2020.

Um novo modelo de estudo do fogo foi desenvolvido considerando a necessidade de um novo componente: a reação em cadeia. O "Tetraedro do Fogo" pode ser observado na Figura 7 (Garcia; Monteiro, 2010).

Figura 7 - Tetraedro do fogo.



Fonte: Garcia e Monteiro, 2010.

De acordo com Casaolivetti (2023), a Classe de Fogo é uma classificação que indica o tipo de fogo de acordo com o material combustível envolvido. Existem diversas classes de fogo, sendo as principais:

- Classe A - utilizada para denominar o fogo que ocorre em materiais de fácil combustão que queimam em sua superfície e profundidade, deixando resíduos, como madeira, papel, tecidos e fibras, identificados conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Identificação classe A.



Fonte: Casaolivetti, 2023.

- Classe B - utilizada para denominar o fogo que ocorre em produtos inflamáveis que queimam somente em sua superfície, sem deixar resíduos, como óleo, graxas, tintas, vernizes, gasolina, entre outros, identificados conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Identificação classe B.



Fonte: Casaolivetti, 2023.

- Classe C - utilizada para denominar o fogo que ocorre em equipamentos elétricos energizados, como motores, transformadores, quadros de distribuição, fios, entre outros, identificados conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Identificação classe C.



Fonte: Casaolivetti, 2023.

- Classe D - utilizada para denominar o fogo que ocorre em elementos pirofóricos, como magnésio, zircônio, titânio, entre outros, identificados conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Identificação classe D.



Fonte: Casaolivetti, 2023.

- Classe K - utilizada para a classificação do fogo em óleo e gordura em cozinhas, conforme Figura 12.

Figura 12 - Identificação classe K.



Fonte: Casaolivetti, 2023.

Existem temperaturas importantes para os materiais relacionadas ao processo de queima como o ponto de fulgor, ponto de combustão e ponto de ignição. O Ponto de Fulgor é a temperatura (diferente para cada combustível) na

qual um combustível libera vapores em quantidade suficiente para serem inflamados por uma fonte externa de calor, mas não em quantidade suficiente para manter a combustão após remoção da fonte de calor. O Ponto de Combustão é a temperatura do combustível acima da qual ele libera vapores em quantidade suficiente para serem inflamados por uma fonte externa de calor e continuar queimando, mesmo quando a fonte de calor é retirada (Wings, 2020).

O Ponto de Ignição é a temperatura mínima em que ocorre uma combustão sem uma fonte externa de ignição, somente pela alta temperatura aplicada, quando o simples contato dos vapores com o oxigênio do ar já é suficiente para estabelecer a combustão. É a temperatura em que um combustível entra em ignição espontânea, como uma chama ou faísca. É importante ressaltar que, após a ignição, a combustão pode continuar mesmo se a fonte de calor for removida, desde que haja combustível e oxigênio suficientes para mantê-la. Por isso, é importante agir rapidamente para interromper a cadeia de reação química (Wings, 2020).

Os combustíveis podem ser classificados quanto ao seu estado físico e a sua volatilidade. Com base no estado físico eles podem ser sólidos (incluem carvão, madeira, pólvora, entre outros), líquidos (incluem gasolina, álcool, éter, óleo, entre outros) e gasosos (incluem metano, etano, etileno, entre outros). Em relação à volatilidade, os combustíveis voláteis são substâncias que, em temperatura ambiente, são capazes de evaporar e formar vapores que podem inflamar, como o álcool, éter e benzina. Não voláteis são substâncias que necessitam de um aquecimento acima da temperatura ambiente para desprenderem vapores inflamáveis, como é o caso do óleo combustível e óleo lubrificante (Reis, 2002).

As fibras apresentam a capacidade de serem consumidas mediante dois processos de queima distintos, designadamente, a combustão latente ou lenta (também referida como combustão heterogênea) e a combustão flamejante (ou combustão homogênea). Apesar de serem caracterizados por propriedades distintas, é pertinente notar que esses dois processos podem transitar mutuamente entre si. (Lewin, 2006).

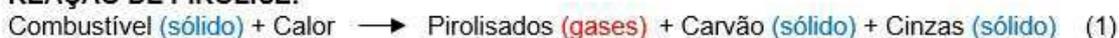
A combustão latente, caracterizada como um processo de queima lenta, se desenrola em temperaturas moderadas. Reconhecida como um fenômeno de combustão de longa duração (Rein, 2016), esta modalidade compreende a

capacidade de diversos materiais incendiarem sem a produção visível de chamas. Ocorre em materiais como carvão, espuma de poliuretano, galhos secos, folhas, cigarros, cabelos, penas de aves, palha, cavacos de madeira e algodão, entre outros. A combustão latente se fundamenta, essencialmente, na interação heterogênea entre o combustível sólido e um agente oxidante e está representada pela Equação 2 exposta abaixo (Lewin, 2006).

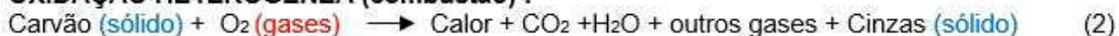
A combustão flamejante, notoriamente a mais vigorosa e enérgica, é caracterizada por uma intensa liberação de calor, assim como pela formação de chamas e luz. Dado que as fibras poliméricas consistem em cadeias com elevado peso molecular, é imperativo que elas atravessem o processo de decomposição, liberando fragmentos poliméricos de menor peso, para que possam ser inflamadas. Tais fragmentos, quando expostos ao oxigênio circundante, passam por reações de oxidação que resultam na emissão de energia, culminando na ocorrência da ignição. (Santoso *et al.*, 2019). A combustão flamejante está representada pela Equação 3 exposta abaixo (Lewin, 2006).

Tanto a combustão latente quanto a combustão flamejante são desencadeadas através da etapa de pirólise (Equação 1). A pirólise, que precede e também ocorre durante a combustão, possibilita a transição entre os dois modos de combustão. Em outras palavras, a combustão flamejante pode evoluir para uma modalidade latente, e vice-versa. (Santoso *et al.*, 2019)

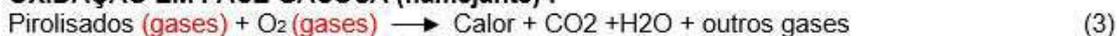
**REAÇÃO DE PIRÓLISE:**



**OXIDAÇÃO HETEROGÊNEA (combustão) :**



**OXIDAÇÃO EM FASE GASOSA (flamejante) :**



## 2.5 Comportamento do polímero quando exposto à chama

Conforme Gallo e Agnelli (1998) as cinco etapas do processo de queima de um polímero estão representadas na Figura 13 e podem ser descritas da seguinte forma: aquecimento, pirólise, ignição, combustão e propagação, por fim, extinção.

Figura 13 - Processo de queima.



Fonte: Gallo e Agnelli, 1998.

### 2.5.1. Aquecimento

Durante o processo, o material é aquecido por uma fonte externa, resultando em um aumento gradual da temperatura. Esse calor pode ser transferido por contato direto com uma chama, contato com gases quentes ou condução através de um corpo sólido. Nesta etapa, os principais fatores envolvidos são o calor específico, a condutividade térmica e o calor latente associado a quaisquer mudanças de fase que possam ocorrer (Gallo; Agnelli, 1998).

### 2.5.2. Pirólise

À medida que os diferentes componentes do material polimérico atingem suas temperaturas de decomposição, eles começam a liberar uma ou mais das seguintes substâncias: gases combustíveis, como alcanos, alcenos, formaldeído e monóxido de carbono; gases não combustíveis, como vapor d'água e dióxido de carbono; gases corrosivos, como cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio; líquidos, geralmente fragmentos das cadeias poliméricas; partículas sólidas, como fuligem, fibras de vidro e cargas minerais; e radicais livres (Gallo; Agnelli., 1998). Na Tabela 2 é possível ver a temperatura de decomposição de alguns polímeros.

Tabela 2 - Temperatura de decomposição de alguns polímeros.

<b>POLÍMERO</b>	<b>TEMPERATURA DE DECOMPOSIÇÃO (°C)</b>
Poliétileno	340 - 440
Polipropileno	320 - 400
Poliestireno	300 - 400
Policloreto de vinila	200 - 300
Politetraflúoretileno	500 - 550
Polimetilmetacrilato	180 - 280
Poliacrilonitrila	250 - 300
Poliamida 6	300 - 350
Poliamida 66	320 - 400
Celulose	280 - 380

Fonte: Adaptado de Gallo e Agnelli, 1998.

A fumaça resulta das diferentes combinações físicas dessas substâncias liberadas durante a decomposição do material polimérico. O principal fator envolvido nessa etapa é a temperatura de início de pirólise de cada componente. Em grande parte dos casos, a pirólise ocorre por meio de um mecanismo de radicais livres, iniciado por traços de oxigênio ou outras impurezas oxidantes presentes nos polímeros desde seu processamento. Durante esse processo, são formados grupamentos hidroperóxidos (ROOH), cuja decomposição produz espécies altamente reativas, como H. e HO., que são importantes nos estágios mais avançados da queima.

### 5.2.3. Ignição

À medida que os produtos da pirólise se difundem a partir da superfície do material polimérico, eles encontram oxigênio que se difunde na direção oposta, criando uma zona de queima gasosa. Nessa zona, as condições de temperatura e concentração de gases combustíveis e oxigênio atingem níveis que permitem a ignição por meio de uma fonte externa de calor ou, se a temperatura for suficientemente alta, por autoignição. O ponto em que o primeiro fenômeno ocorre é conhecido como ponto de fulgor, enquanto o ponto em que o segundo ocorre é chamado de ponto de ignição (Gallo; Agnelli, 1998). A Tabela 3 apresenta os valores de pontos de fulgor e ignição para alguns polímeros.

Tabela 3 - Pontos de fulgor e de ignição de alguns polímeros.

<b>POLÍMERO</b>	<b>PONTO DE FULGOR (°C)</b>	<b>PONTO DE IGNIÇÃO (°C)</b>
Polietileno	340	350
Polipropileno	320	350
Poliestireno	350	490
Policloreto de vinila	390	450
Politetraflúoretileno	560	580
ABS	390	480
Polimetilmetacrilato	300	430
Poliacrilonitrila	480	560
Poliamida 6	420	450
Poliamida 66	490	530
Poliuretano	310	415
Algodão	210	400

Fonte: Adaptado de Gallo e Agnelli, 1998.

Os fatores mais importantes que afetam esta etapa são as temperaturas de ignição e autoignição, além do índice de oxigênio, que é definido como a concentração mínima de oxigênio necessária para manter a combustão.

#### **2.5.4. Combustão e Propagação**

Os radicais livres gerados durante a pirólise desempenham um papel crucial na etapa de ignição, iniciando reações altamente exotérmicas de combustão. O calor liberado por essas reações dá início a um processo chamado de retroalimentação térmica, que sustenta os processos de pirólise e ignição enquanto houver material combustível disponível. Nesta fase, o fogo se propaga pela superfície do material, alcançando outras áreas e tornando o processo de queima completamente irreversível. O principal fator que afeta essa etapa é o calor de combustão dos componentes do material polimérico.

O índice limite de oxigênio (LOI) é uma medida da menor porcentagem de oxigênio presente na mistura oxigênio/nitrogênio que é necessária para sustentar a combustão de plásticos. O índice limite de oxigênio (LOI) pode variar entre 0 e 100, representando uma atmosfera sem oxigênio ( $[O_2] = 0$ ) e uma atmosfera sem nitrogênio ( $[N_2] = 0$ ), respectivamente. O ar contém cerca de 1/5 de oxigênio (precisamente 20,95% em volume), o que significa que os materiais com valor de LOI igual ou inferior a 20,95 são altamente inflamáveis. Materiais com valores de LOI entre 20,95% e 28,0% são geralmente considerados

combustíveis de combustão lenta. Já os materiais com valores de LOI entre 28,0% e 100% são considerados autoextinguíveis. Por fim, os materiais com valor de LOI igual a 100% são classificados como intrinsecamente não combustíveis (Caetano, 2022). A Figura 14 apresenta a classificação dos materiais em função do valor LOI e a Tabela 4 mostra a demonstração dos materiais têxteis em relação à chama.

Figura 14 - Classificação dos materiais em função do valor LOI.



Fonte: Adaptado de Caetano, 2022.

Tabela 4 - Demonstração dos materiais têxteis em relação à chama.

FIBRAS	LOI	CALOR DE COMBUSTÃO (Kcal/G)	TEMPERATURA DE COMBUSTÃO (°C)	PONTO DE FUSÃO (°C)
Acrílico	18,2	7,6	530-565	253-320
Algodão	18,4	3,9	255	Não funde
Triacetato	18,4	-	450-520	293
Polipropileno	18,6	11,1	570	164-170
Viscose	19,7	3,9	420	Não funde
Algodão de polivinilo	19,7	-	-	Não funde
Poliamida	20,1	7,9	485-575	160-260
Poliéster	20,6	5,7	485-560	252-292
Lã	25,2	4,9	570-600	Não funde
Modacrílica	26,8	-	-	160-190
Nomex® 7-450	30	-	800	316
Lã Zipro	28-34	-	-	Não funde
Policloreto de vinilo	37,1	5,1	-	100-160

Fonte : Adaptado de Garcia e Monteiro, 2010.

### 2.5.5. Extinção

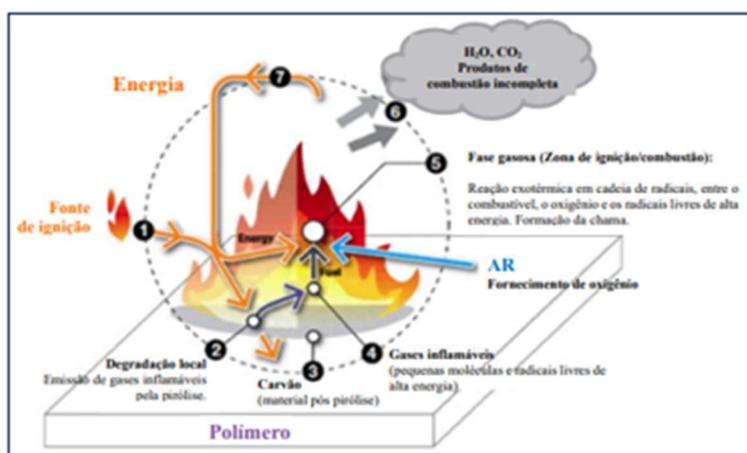
À medida que o fogo se propaga pelo corpo do polímero, as quantidades de material combustível e oxigênio diminuem, chegando a um ponto em que o calor gerado pela combustão não é mais capaz de sustentar o mecanismo de retroalimentação térmica. Esse estágio é conhecido como estágio de extinção

do processo de queima. O índice de oxigênio do material polimérico é o principal fator que influencia esta etapa do processo de queima (Gallo; Agnelli, 1998).

Quando um material é submetido a ignição, quanto mais facilmente sua combustão for extinta, menor será seu risco de incêndio. A facilidade de extinção pode ser determinada por meio de testes, como o índice de oxigênio (LOI) descrito na norma ASTM D2863 (Fontoura, 2021).

As estratégias para diminuir a inflamabilidade dos polímeros podem ser divididas em geral em quatro categorias: modificação química dos polímeros com o uso de agentes retardantes de chama reativos, utilização de agentes retardantes de chama como aditivos, aplicação de revestimentos anti-chamas ou a combinação destes diferentes métodos (Gallo; Agnelli, 1998), é possível observar na Figura 15 o processo de transferência de calor durante a queima.

Figura 15 - Ilustração do processo de transferência de calor durante a queima.



Fonte: Oliveira, 2020.

## 2.6. Retardantes de chama

Retardantes de chama são materiais que dificultam a iniciação, bem como a propagação da chama. São importantes em aplicações na construção civil, na qual a propagação do fogo em incêndios deve ser minimizada. Como exemplos tem-se: compostos de bromo, compostos de boro, alumina tri-hidratada, etc (Canevarolo Jr, 2006).

Os retardantes de chama são compostos químicos que podem atuar retardando a ignição, diminuindo a velocidade de combustão e minimizando a

emissão de fumaça dos materiais aos quais são adicionados. Eles são empregados para reduzir a inflamabilidade intrínseca dos polímeros, aumentando sua resistência à combustão. O uso de retardantes de chama torna a propagação do fogo mais lenta, o que é extremamente benéfico, pois pode ajudar a salvar vidas (Ribeiro, 2011).

Existem duas opções para reduzir a inflamabilidade: desenvolver um polímero termicamente estável ou modificar os polímeros existentes com retardantes de chama. Geralmente, a segunda opção é a mais viável em termos de custo-benefício, e pode ser realizada adicionando componentes com propriedades anti-chama (Ribeiro, 2011).

Uma condição essencial é que os retardantes de chama, ao serem aplicados sobre a matriz têxtil, revelem propriedades adequadas de modo a promover uma interação sinérgica entre os compostos empregados e as fibras constituintes. Essa sinergia é fundamental para que, durante o episódio de combustão, se efetive o efeito inibidor desejado (Bajaj, 1992; Wakelyn, 2008).

De acordo com Bajaj (1992) e Wakelyn (2008), existe alguns requisitos primordiais que os têxteis contendo retardantes de chama devem satisfazer, são os seguintes:

- **Sustentabilidade:** É imperativo que tais materiais não persistam no meio ambiente (não sejam bioacumulativos) e que não apresentem toxicidade para seres humanos, animais, solo, água e ecossistemas em geral.
- **Biocompatibilidade:** Em contextos nos quais o têxtil tem contato direto com a pele, é crucial que o acabamento seja biocompatível, garantindo a ausência de alergias, irritações ou enfermidades nos usuários.
- **Resistência às chamas:** É essencial que o tecido não seja suscetível a queima ou à propagação do fogo, a fim de evitar a liberação de calor, gases e líquidos inflamáveis, e, por conseguinte, conter a disseminação de incêndios.
- **Integridade da estrutura:** O material têxtil deve ser capaz de manter sua integridade estrutural, evitando enrugamentos, encolhimentos, derretimentos, fragilidade ou rupturas, a fim de proteger o usuário de exposições indesejáveis.

- Isolamento térmico: As vestimentas devem retardar a transferência de calor para o usuário, proporcionando um intervalo suficiente para tomar medidas de evasão ou resfriamento diante de uma situação de combustão. O tecido deve oferecer proteção contra calor convectivo, calor direto, calor radiante, faíscas, vapores quentes e respingos de polímeros ou metais fundidos, minimizando riscos de queimaduras.
- Durabilidade: O tratamento empregado no tecido deve ser resiliente diante das condições a que será submetido. Tecidos destinados a vestuário devem ser resistentes a lavagens (evitando a lixiviação), radiação UV, água com teor de minerais elevado e/ou cloro, atrito e forças de tração. No caso de tecidos para revestimentos, decoração e outras aplicações de natureza seca, a resistência ao envelhecimento (tanto oxidativo quanto radiativo) e ao atrito é primordial.
- Laudo analítico: Diversas análises térmicas podem ser empregadas concomitantemente para caracterizar a estabilidade térmica e inflamabilidade dos tecidos. Exemplos incluem a determinação do índice de oxigênio (LOI), medição das taxas de liberação de calor (HRR), avaliação da estabilidade térmica (através de técnicas como TG-DTG e DSC), e testes normalizados de resistência à chama aberta (vertical e horizontal), entre outros métodos.

A inclusão de retardantes de chama pode significativamente prolongar o tempo de escape em caso de incêndio, aumentando de cerca de 2 para 20 minutos em média, permitindo que as pessoas tenham um tempo 10 vezes maior para evacuar o local com segurança. Além disso, a utilização desses aditivos pode reduzir a produção de fumaça no local do incêndio, o que é uma vantagem adicional (Abichama, 2021).

Segundo a Abichama (2021) os retardantes de chama agem de três maneiras diferentes:

- Podem interromper o estágio de combustão do ciclo do fogo prevenindo ou atrasando o "*flashover*", ou seja, a combustão generalizada dos materiais combustíveis em um mesmo ambiente.
- Podem atuar limitando o processo de decomposição do material inflamável por meio do isolamento físico das fontes de combustível disponíveis, formando uma camada resistente ao fogo.

- Também podem atuar diluindo os gases inflamáveis e reduzindo a concentração de oxigênio na região onde a chama se forma, através da liberação de gases inertes como água, nitrogênio ou outros.

Há uma ampla gama de retardantes de chama que agem de forma distinta. Alguns funcionam de maneira independente, enquanto outros são usados como "agentes sinérgicos", potencializando o efeito de outros tipos de retardantes de chama. Essa diversidade de produtos é essencial devido às grandes diferenças na natureza e composição dos materiais tratados.

As possibilidades para adicionar componentes com propriedades anti-chama incluem a formação de reações endotérmicas que absorvem parte do calor gerado durante a combustão do polímero, a criação de uma camada carbonácea superficial que isola termicamente o polímero, dificultando a entrada de oxigênio e diminuindo a velocidade de difusão dos fragmentos inflamáveis originados do substrato. Além disso, podem ser geradas espécies voláteis que interferem nas reações dos radicais livres durante a chama, agindo como inibidores de velocidade para diminuir a taxa de queima da substância. Outra opção é a liberação ou geração de produtos não combustíveis que atuam como diluentes de concentração das espécies inflamáveis na fase gasosa, tornando mais difícil a queima do substrato (Ribeiro, 2011).

### **2.6.1. Mecanismo de Ação Química dos Retardantes de chamas**

Os aditivos retardantes de chama, cuja atuação é mediada por processos químicos, desempenham tal função por intermédio de reações que se processam tanto na fase gasosa quanto na fase condensada. No contexto da fase condensada, os retardantes de chama experimentam decomposição, resultando na emissão de fragmentos radicais de menor massa molecular, os quais apresentam volatilização. Paralelamente, na etapa gasosa, os radicais oriundos dos retardantes de chama, quando submetidos a condições térmicas, são capazes de interagir com os radicais livres provenientes da decomposição pirolítica do material submetido à combustão, efetuando assim uma neutralização desses radicais. Essa neutralização culmina na interrupção das reações exotérmicas de natureza oxirredução, conduzindo a uma notável redução na liberação de energia. Este fenômeno, por sua vez, resulta em um

resfriamento significativo do sistema em questão (Gallo; Agnelli, 1998; Laoutid *et al.*, 2008).

Na fase condensada, os aditivos retardantes de chama desempenham uma função de destaque como precursores e catalisadores para a reação de degradação polimérica, um processo que resulta na aceleração da formação de uma camada de carbonização. Esta camada carbonácea manifesta-se como um estrato que assume relevante importância, uma vez que obstaculiza a difusão dos gases originados no processo de pirólise em direção à fase gasosa. Além disso, essa camada desempenha um papel crucial ao bloquear a retroalimentação do fluxo térmico rumo ao interior do substrato, dado que apresenta uma barreira eficaz de isolamento térmico. A natureza da camada carbonácea pode variar, manifestando-se ora em um estado vítreo, ora sob uma configuração intumesciente, caracterizada por uma expansão significativa (Gallo; Agnelli, 1998; Kiliaris; Papaspyrides, 2010; Liu *et al.*, 2015; Zhang, S. *et al.*, 2010).

### **2.6.2. Mecanismo de Ação Física dos Retardantes de chamas**

Assim como mencionado anteriormente, o mecanismo físico subjacente ao retardo da combustão por meio dos aditivos retardantes de chama pode manifestar-se tanto na fase gasosa quanto na fase condensada (GALLO; AGNELLI, 1998; KILIARIS; PAPASPYRIDES, 2010; LAOUTID *et al.*, 2008; ZHANG, S. *et al.*, 2010), por exemplo:

- Diluição do combustível: A decomposição dos compostos retardantes de chama resulta na formação de espécies voláteis não combustíveis ou inertes, como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, e outras, que se misturam aos gases inflamáveis produzidos pela pirólise. Essa diluição dos gases combustíveis contribui para a diminuição da concentração de componentes reativos na mistura.
- Efeito de resfriamento: A decomposição dos retardantes de chamas através de reações endotérmicas gera um consumo de calor, resultando em um efeito de resfriamento durante a combustão. Esse fenômeno resulta na redução das temperaturas no sistema, levando-as a níveis inferiores aos requeridos para a degradação polimérica.

- Formação de camada de revestimento: A interação dos aditivos retardantes de chamas pode levar à formação de uma camada física protetora e isolante, como é o caso de compostos de silício. Essa camada, ao se desenvolver, atua como uma barreira que bloqueia a retroalimentação de calor para o material em combustão, além de obstruir a difusão dos gases combustíveis em direção à zona de ignição.

Certos aditivos retardantes de chama baseados em hidróxidos metálicos preponderam no emprego do mecanismo físico. No entanto, é comum identificar a coexistência de múltiplos mecanismos retardantes de chama em uma variedade de aplicações (Gallo; Agnelli, 1998; Kiliaris; Papaspyrides, 2010).

Pode-se afirmar que o termo "retardante de chama" não se limita a uma categoria específica de substâncias químicas, mas sim descreve a função desses compostos. Existem mais de 200 tipos diferentes de retardantes de chama, sendo que alguns dos elementos químicos frequentemente utilizados em sua composição incluem bromo, cloro, fósforo, nitrogênio e hidróxidos metálicos (ABICHAMA, 2021).

Os retardantes de chama halogenados atuam predominantemente na fase gasosa, liberando radicais de baixa energia, como Br ou Cl, que substituem os radicais livres de alta energia H. e OH.. Isso inibe a decomposição exotérmica que contribui para a formação da chama.

Retardantes de chama que contêm nitrogênio (N) atuam ajudando na formação de ligações cruzadas em estruturas moleculares do material tratado, o que inibe a pirólise. Além disso, esses retardantes liberam gases inertes de nitrogênio que diluem a mistura de oxigênio, evitando a combustão (Caetano, 2022).

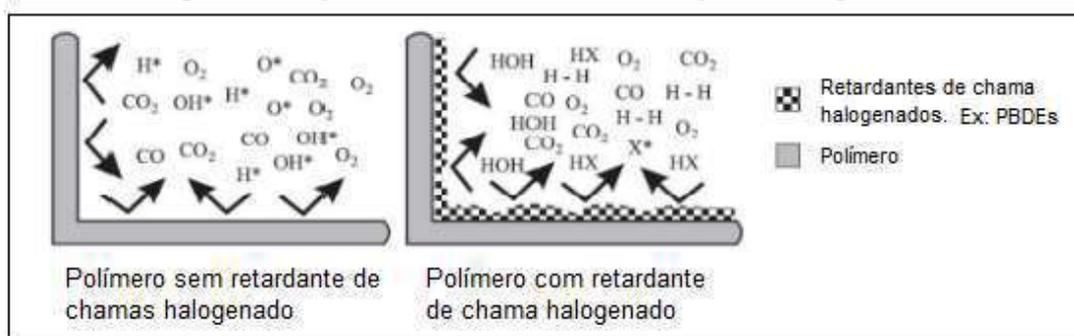
Os compostos contendo nitrogênio reagem de forma sinérgica com outros elementos para proporcionar uma contribuição cooperativa na mitigação de incêndios. Na análise literária, verifica-se que os tratamentos fosforados, quando acompanhados da inclusão de agentes nitrogenados, resultando na formação de sais de fosfato de amônio que se ligam ao substrato, exibem uma eficácia consideravelmente superior em comparação às aplicações isoladas destes compostos (Alongi, 2013; Dasari *et al.*, 2013; Laoutid *et al.*, 2008).

A aplicação de ureia e seus derivados em processos de incorporação à matriz celulósica é amplamente reconhecida na literatura. Entretanto, quando se trata do processo de carbamilação da celulose, observa-se que este exibe uma influência limitada, ou quase nula, na capacidade de retardamento da ignição do material, quando empregado de maneira isolada. Contrariamente, ao incorporar fontes de fósforo à matriz, os resultados concernentes à capacidade de retardância frequentemente revelam um grau de eficácia bastante considerável (Alongi, 2013; Dasari *et al.*, 2013; Laoutid *et al.*, 2008).

Esta tendência se deve à presença de interações ou sinergias manifestadas entre os dois componentes, culminando na inibição do processo de combustão. Dentro deste contexto, entre os compostos retardantes mais comuns e eficazes, porém de caráter não sustentável, podem ser citados os polifosfatos de amônio (Alongi, 2013; Dasari *et al.*, 2013; Laoutid *et al.*, 2008).

Representada a Figura 16 na ação retardante a chamas com ação de halogenados.

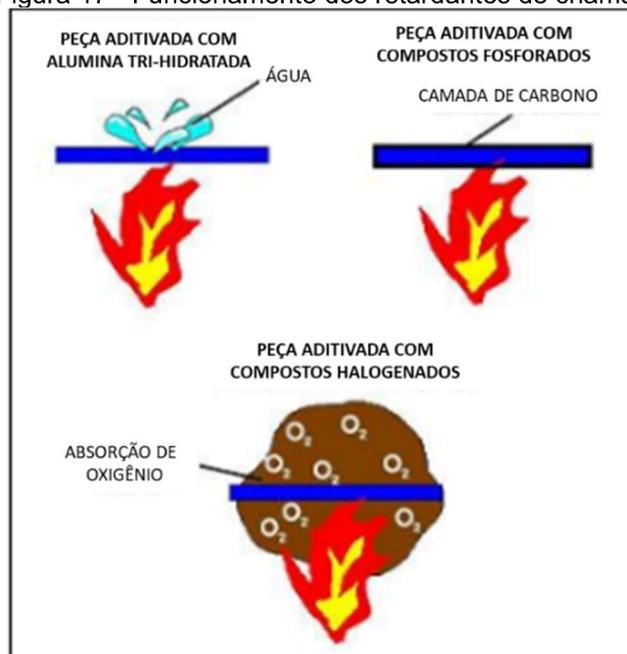
Figura 16 – Ação retardante a chamas com ação de halogenados.



Fonte: Garcia e Monteiro, 2010.

Com uma textura fina, homogênea e uma cor branca, a alumina tri-hidratada (ATH) é um composto capaz de substituir parcial ou totalmente a carga mineral do polímero. Além de retardar as chamas, ele atua como supressor de fumaça e possui baixa abrasividade. A principal razão para sua propriedade retardante de chamas é sua capacidade de reduzir a temperatura durante a combustão. Isso ocorre porque a decomposição do hidróxido de alumínio em alumina é uma reação endotérmica que libera água e ocorre aproximadamente entre 220°C e 600°C. No entanto, sua utilização é limitada em polímeros com ponto de fusão elevado, como é o caso da poliamida (Roda, 2014). A Figura 16 mostra o funcionamento dos retardantes de chamas.

Figura 17 - Funcionamento dos retardantes de chamas.



Fonte: Roda, 2014.

Para obter alta eficiência dos retardantes de chama, é necessário levar em consideração alguns requisitos, como: elevada temperatura de decomposição, estabilidade térmica durante o processamento do polímero, baixa emissão de fumaça, compatibilidade química com o polímero, não gerar gases tóxicos e ter baixa toxicidade, não afetar as propriedades desejáveis do polímero, ser reciclável e ter baixo custo (Ribeiro, 2011).

Os retardantes de chama à base de fósforo (P) possuem a capacidade de atuar tanto na fase sólida quanto na fase gasosa. Quando expostos ao calor, liberam uma forma polimérica de ácido fosfórico, que causa a carbonização do material tratado, formando uma camada vítrea de carbono. Essa camada inibe o processo de pirólise, que é responsável por fornecer combustível para a chama. Assim, os retardantes de chama fosfóricos são eficazes na prevenção e retardamento da combustão. Os hidretos metálicos são compostos inorgânicos que desaceleram o processo de pirólise. Eles liberam moléculas de água em seu estado gasoso, o que dilui a mistura de oxigênio (comburente) e produz uma camada na superfície do material que é resistente e não-inflamável (Caetano, 2022).

O mecanismo preponderante desses compostos em termos de retardo à combustão se desenrola majoritariamente na fase condensada. A decomposição térmica desses compostos durante o processo de combustão frequentemente

conduz à formação de ácidos, notavelmente o ácido fosfórico. Esses ácidos demonstram ação ao acelerar a decomposição superficial do material em combustão, favorecendo de forma expedita a constituição de uma camada superficial de carbonização na interface entre as fases. A camada carbonácea, por sua natureza termicamente mais resistente, exerce a função de minimizar a transferência de gases de pirólise oriundos da fase condensada para a fase gasosa. Além disso, ela reduz o fluxo de calor e a retroalimentação de oxigênio direcionada ao interior do material submetido à combustão. Como resultado, verifica-se uma diminuição gradual e contínua da temperatura do sistema até a extinção completa da chama (Alongi, 2013; Dasari *et al.*, 2013; Gallo; Agnelli, 1998; Laoutid *et al.*, 2008; Montazer; Harifi, 2018).

Certos compostos fosforados, por sua vez, desempenham um papel na fase gasosa, uma vez que são capazes de gerar radicais reativos, tais como  $\{PO_2\cdot / PO\cdot / HPO\cdot\}$ . Estes últimos, quando submetidos a reações com os radicais de combustão, engendram um processo de neutralização, resultando no progressivo enfraquecimento da combustão e, conseqüentemente, na sua extinção (Alongi, 2013; Dasari *et al.*, 2013; Gallo; Agnelli, 1998; Laoutid *et al.*, 2008; Montazer; Harifi, 2018).

Dentro do escopo dos compostos de silício, podem ser identificados diversos componentes pertencentes a esta categoria, incluindo sílicas, silicatos, siloxanos, silicones, entre outros. Esses compostos, devido à sua composição, oferecem possibilidades variadas de aplicação, seja como agentes retardantes de chama reativos e/ou como aditivos. Notavelmente, os compostos à base de silício tendem a exibir uma notável estabilidade térmica, o que os torna de particular interesse para setores industriais diversificados. Alguns exemplos de silicatos naturais, como o talco, por sua vantajosa relação custo-benefício, são incorporados como aditivos em polímeros, visando a redução da inflamabilidade destes materiais (Oliveira, 2020).

Em seguida, a Tabela 5 apresenta o percentual de consumo de retardantes de chamas.

Tabela 5 – Percentual de consumo de retardantes de chamas.

<b>CLASSE</b>	<b>TIPO</b>	<b>PERCENTUAL DE CONSUMO (%)</b>	<b>PERCENTUAL GERAL (%)</b>
Inorgânicos	Alumina tri-hidratada	44,4	57,2
	Trióxido de antimônio	7,6	
	Compostos de boro	1,7	
	Outros	3,5	
Orgânicos não reativos	Compostos de fósforo	14,7	29,3
	Compostos de cloro	8,2	
	Compostos de bromo	6,4	
Orgânicos reativos		13,5	13,5

Fonte: Adaptado de Ladchumananandasivam, 1999.

A utilização de aditivos retardantes de chama envolve a incorporação física de substâncias durante a fase de processamento dos polímeros. Em comparação com a técnica de modificação química, o uso de retardantes de chama do tipo aditivo é vantajoso em termos de custo de matéria-prima e facilidade de incorporação. Por essas razões, essa é atualmente a técnica mais amplamente utilizada.

## 2.7. Roupas de segurança anti-chamas

É cada vez mais evidente que governos e empresas estão se preocupando com o bem-estar físico das pessoas em geral e dos trabalhadores em particular. Nesse sentido, a indústria têxtil tem desenvolvido soluções tecnológicas para atender a essas novas necessidades. Nas últimas décadas houve um grande avanço em relação à concepção e desenvolvimento de vestimentas de proteção. Além do aumento da proteção contra riscos, há uma preocupação com o conforto do usuário e a durabilidade do produto. É importante enfatizar que o tipo de fibra, o ligamento do tecido, a gramatura e o acabamento do tecido utilizados nessas vestimentas estão diretamente relacionados com a função específica da proteção, podendo variar para cada aplicação no ambiente de trabalho (Alves, 2016). A Figura 17 exibe um macacão, uma calça e uma camisa anti-chamas.

Figura 17 – Macacão, calça e camisa anti-chama.



Fonte: Vectra, 2023.

O fogo repentino é uma combustão acidental de curta duração, porém extremamente intensa, que ocorre geralmente devido à energia de uma centelha ou fonte de calor em combinação com a presença de materiais combustíveis ou inflamáveis. A resistência ao fogo das fibras está parcialmente relacionada à sua composição (Alves, 2016).

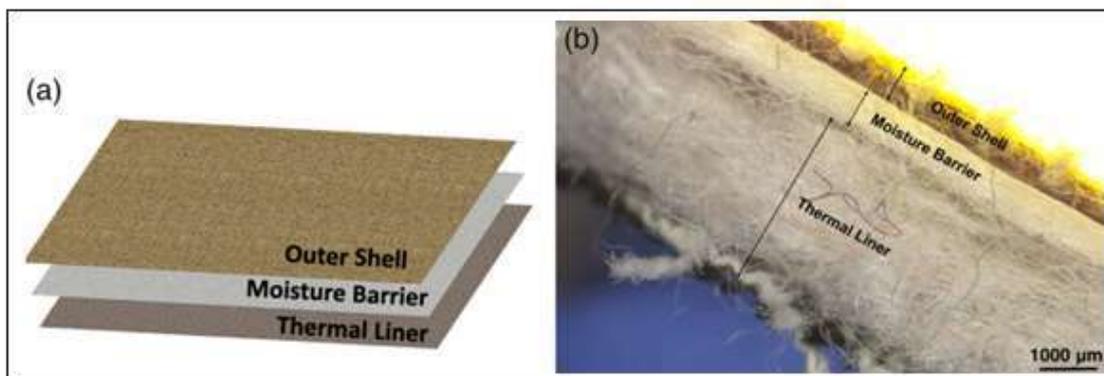
### **2.7.1. Características das roupas de segurança anti-chamas**

Duas categorias primárias podem ser identificadas no âmbito das vestimentas de proteção: indumentárias de proteção primária e indumentárias de proteção secundária. As primeiras, ou seja, as indumentárias de proteção primária, são empregadas em situações em que o usuário enfrenta possibilidades iminentes de entradas em contato com respingos de substâncias em estado fundido, temperaturas extremamente elevadas e exposição direta a chamas. Por sua vez, as indumentárias de proteção secundária foram especificamente concebidas para cenários nos quais o usuário pode ser exposto a riscos de maneira intermitente. Essas circunstâncias também podem envolver ocorrências como calor radiante, salpicos de substâncias derretidas e presença de chamas, embora as probabilidades de exposição constante a esses riscos sejam menores (Song; Wang, F., 2019).

O equipamento de proteção constitui um exemplo de indumentária de proteção primária, sendo frequentemente sobreposto ao uniforme de base quando esses profissionais respondem a chamados de emergência ou participam de atividades de treinamento. Por outro lado, as vestimentas de proteção secundária são desenvolvidas com vistas ao uso prolongado. Exemplificam esse tipo de vestimenta camisas, calças e macacões especialmente concebidos para uso como uniformes, caracterizando, assim, indumentárias de proteção secundária (Song; Wang, F., 2019).

A vestimenta de proteção utilizada em operações estruturais é comumente configurada como um conjunto composto por múltiplas camadas. Essa configuração inclui uma camada externa, uma barreira resistente à umidade e um forro térmico, cada uma desempenhando um papel específico no sistema de proteção (Song; Wang, F., 2019), como é possível observar na Figura 18 as diferentes camadas de roupas de proteção.

Figura 18 - Diferentes camadas de roupas de proteção, (a) diagrama esquemático, (b) imagem de microscopia óptica mostrando a seção transversal da estrutura de três camadas.



Fonte: Hoque e Dolez, 2023.

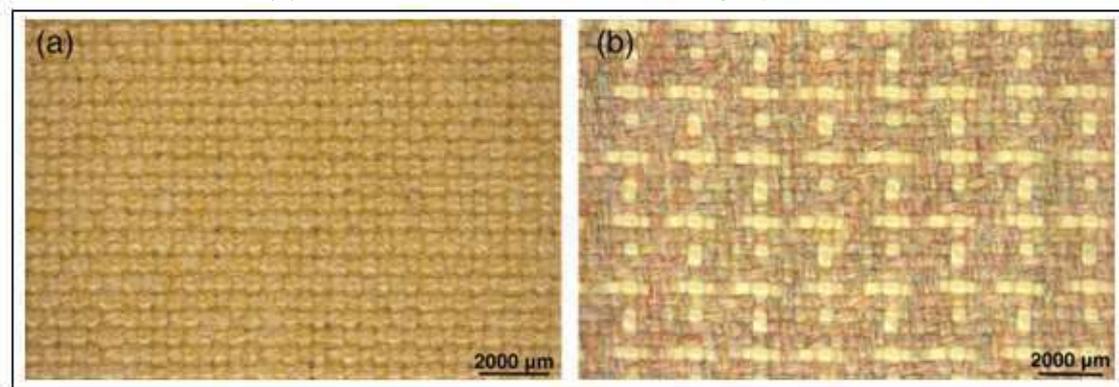
Conforme Hoque e Dolez (2023) as vestimentas de proteção convencionais são compostas por estruturas multicamadas, conforme ilustrado na Figura 18 (b), em uma disposição da esquerda para a direita:

A camada externa, localizada à esquerda na Figura 18 (b), é fabricada a partir de fibras sintéticas (polímeros) que são meticulosamente entrelaçadas. Esta camada desempenha o papel de um invólucro de defesa contra chamas e umidade. É pertinente notar que este tecido é intrinsecamente autoextinguível, o que implica que carece de um ponto de fusão definido, consequentemente inibindo a propagação de chamas.

O termo "invólucro externo" em relação à vestimenta de proteção é definido como "o componente mais externo de um elemento ou item que não inclui guarnição, ferragens, material de reforço, bolsos, material de pulseira, acessórios, encaixes ou sistemas de suspensão" (NFPA, 2017). O tecido que constitui essa camada exterior do equipamento de combate a incêndios está mais exposto às condições perigosas em comparação com as outras duas camadas. (Song; Wang, F., 2019) Adicionalmente, convém ressaltar que o tecido empregado na constituição do invólucro externo desempenha uma função essencial enquanto barreira protetora, alicerçando tanto a barreira contra umidade subjacente quanto o forro térmico adjacente. A eficácia desse sistema reside na presença do ar retido no interior e entre as distintas camadas, conferindo o isolamento térmico necessário. Portanto, é fundamental reconhecer que a utilização de um tecido externo inadequado, suscetível a encolhimento, pode comprometer significativamente a proteção térmica conferida pelo conjunto (Holmes; Horrocks, 2016).

A camada externa das vestimentas de proteção é tipicamente confeccionada através da utilização de um tecido trançado que incorpora uma estrutura de trama básica. As estruturas de trama simples, sarja e algumas de suas variantes, tais como rip-stop e sarja de conforto, representam as opções mais comuns na composição do tecido destinado ao revestimento externo. Dentre essas alternativas, destaca-se a estrutura de trama rip-stop, a qual tem experimentado recente preferência devido à sua excepcional resistência à ruptura e elevada capacidade de suportar esforços de tração. A Figura 19 ilustra dois exemplos representativos de estruturas típicas presentes no tecido utilizado para a camada de revestimento externo (Zhu; Young, 2002).

Figura 19- Tecidos de revestimento externo usados em conjuntos de roupas de combate a incêndio, (a) tecido de estrutura de trama rip stop, (b) tecido de estrutura de trama de sarja quebrada.



Fonte: Oliveira, 2020.

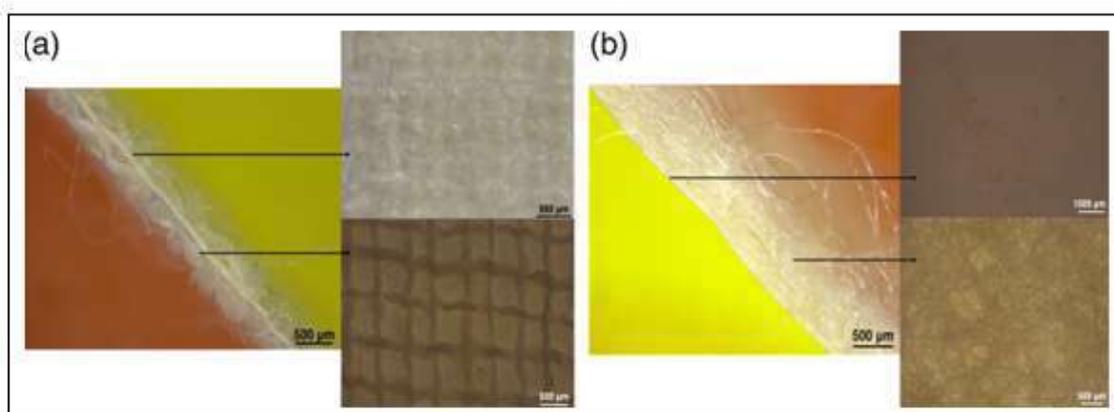
Dado que representa a derradeira barreira de defesa, a camada externa desempenha um papel crucial na resistência a diversas formas de perigo, tais como temperaturas elevadas e chamas intensas, agentes químicos tóxicos e emissões gasosas resultantes da combustão, além de abrasão e perfurações. A atribuição principal dessa camada é proporcionar proteção por um período limitado, permitindo ao trabalhador executar suas atividades operacionais e posteriormente retirar-se para um local seguro. Paralelamente à sua função protetora, é imperativo que os tecidos empregados para a casca externa também sejam caracterizados por sua flexibilidade e leveza, de modo a não sobrecarregar os trabalhadores em suas ações.

A fim de aliar proteção e conforto de maneira otimizada, uma variedade de tipos e composições de fibras de elevada performance é utilizada na fabricação dos tecidos de revestimento externo. Tais fibras, inerentemente resistentes a chamas e altas temperaturas, englobam materiais como aramidas, polibenzimidazol (PBI) e polibenzoxazol (PBO). Vale mencionar que, em adição à sua intrínseca capacidade de resistência ao fogo, algumas dessas fibras também apresentam notável resistência mecânica e estabilidade química (Bourbigot; Flambard, 2002).

A segunda camada da vestimenta de proteção é conhecida como a barreira contra umidade. Esta camada desempenha o papel crucial de impedir a transferência de água quente e substâncias químicas para a pele do profissional, garantindo assim a proteção contra tais elementos.

A camada intermediária presente no conjunto de vestimenta utilizado pelo colaborador corresponde à denominada barreira de umidade. Essa camada assume a função de atuar como uma resistente barreira contra líquidos, ao mesmo tempo que possibilita um grau moderado de transferência de vapor de água para fora do traje. Barreiras contra umidade são frequentemente constituídas por uma configuração laminada, que combina uma membrana sobreposta a um substrato têxtil (Young, 2010). A incorporação da barreira contra umidade pode ocorrer por meio de laminagem na face interna do revestimento exterior, posicionamento entre o revestimento exterior e o forro térmico, ou fixação à superfície exterior do revestimento linear térmico (Scott, 2005). Exemplos de barreiras de umidade usadas em roupas de proteção de bombeiros são mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Exemplos de barreiras de umidade usadas em conjuntos de roupas de combate a incêndios, (a) barreira de umidade de três camadas com suporte de tecido, (b) barreira de umidade de duas camadas com suporte de tecido não tecido.



Fonte: Oliveira, 2020.

Diversos tipos de membranas são empregados nas estruturas de barreiras de umidade em roupas de proteção destinadas a bombeiros, entre eles: membranas semipermeáveis, microporosas e não porosas (Schreuder-Gibson *et al.*, 2003). Em particular, uma notável tecnologia microporosa de membrana, fundamentada em politetrafluoretileno expandido (ePTFE), desenvolvida pela marca Gore-Tex, é amplamente adotada. Essa abordagem une propriedades de resistência térmica e química, eficácia enquanto barreira líquida e permeabilidade ao vapor de água. A mencionada membrana de ePTFE compreende uma estrutura contendo mais de nove bilhões de poros, proporcionando, assim, uma transferência eficiente de vapor de umidade.

Ademais, outras alternativas de membranas microporosas incorporam o uso de poliuretano FR (PU) e fluoreto de polivinilideno (PVDF) (Schreuder-Gibson *et al.*, 2003). Adicionalmente, foi proposta a adoção de uma trama de nanofibras eletrofiada, modelada sobre um substrato têxtil, para desempenhar a função de barreira contra umidade.

Nesse contexto, é importante ressaltar que, usualmente, a membrana empregada na configuração da barreira de umidade é laminada sobre um substrato têxtil, provendo o suporte mecânico necessário. Tais substratos têxteis empregam fibras de alto desempenho idênticas àquelas encontradas nos tecidos de revestimento externo das vestimentas utilizadas por bombeiros (Song; Wang, F., 2019).

A camada interna mais profunda é reservada ao propósito de isolamento térmico e, frequentemente, é composta por um ou dois tecidos consecutivos (representando os últimos dois tecidos no lado direito da Figura 20 (b)). Distingue-se, contudo, das fibras sintéticas empregadas na camada externa, uma vez que estas não são submetidas à tecelagem. Em vez disso, tais fibras são dispostas em uma configuração porosa, contribuindo para a formação de uma camada que confere um isolamento térmico altamente eficaz.

A camada interna mais interna presente nas vestimentas de proteção destinadas a bombeiros é conhecida como forro térmico, cuja função primordial é conferir proteção térmica (NFPA, 2017). Em conjunto com a barreira de umidade, o forro térmico contribui de forma conjunta para aproximadamente 75% do total de proteção térmica oferecida (Young, 2010). O forro térmico, frequentemente encontrado nas roupas de proteção para bombeiros, tipicamente compreende uma estrutura em que uma manta não-tecida é acolchoada em um substrato têxtil de espessura reduzida (Figura 4). Importa salientar que ambas as camadas mencionadas são predominantemente confeccionadas a partir de fibras de elevada performance, tais como para-aramida, meta-aramida, PBI e PBO (Song; Wang, F., 2019).

Em particular, as estruturas não-tecidas "agulhadas" e "*spunlace*" são amplamente empregadas na confecção dos forros térmicos das vestimentas de proteção dos bombeiros. Essas estruturas ostentam numerosos compartimentos microscópicos de ar, proporcionando, dessa forma, um isolamento térmico substancial. No que se refere ao lado voltado à pele, o tecido que compõe a

superfície do forro térmico é concebido para viabilizar a absorção da umidade e oferecer uma sensação de toque suave (Young, 2010). É possível observar na Figura 21 a composição de uma roupa de proteção e na Tabela 6 a caracterização da propriedade térmica desta roupa de proteção.

Figura 21 – Composição de uma roupa de proteção. (a) Colete de proteção contra incêndio. (b) Diferentes camadas.



Fonte: Collin *et al.*, 2015.

Tabela 6 – Caracterização da propriedade térmica média da jaqueta apresentada na figura acima.

AMOSTRAS	CAMADA MAIS EXTERNA	BARREIRA DE UMIDADE	CAMADA MAIS INTERNA
LARGURA (m)	$0,42 \times 10^{-3}$	$0,75 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^{-3}$
DENSIDADE (kg/m <sup>3</sup> )	601	187	103
DENSIDADE DA SUPERFÍCIE (g/m <sup>2</sup> )	252	140	159
CAPACIDADE TÉRMICA (J/Kg/K)	1187,5	1296,2	1219,1
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m/K)	0,0811	0,041	0,0379

Fonte: Adaptado de Collin *et al.*, 2015.

A fibra de meta-aramida resistente a calor e chamas, DuPont™ Nomex®, é amplamente utilizada em diversas aplicações, sendo mais conhecida como um componente-chave em tecidos que são utilizados para criar vestimentas de proteção. Por causa de sua combinação única de proteção contra calor, chamas e arco elétrico, durabilidade e conforto, a marca Nomex® é amplamente confiável por aqueles que trabalham em condições perigosas, como bombeiros; pilotos militares e tripulação de veículos de combate; pilotos de automobilismo, equipe de pit stop e oficiais de pista; e trabalhadores industriais que estão expostos a riscos de incêndio instantâneo e arco elétrico (DuPont, [s.d.]).

A Figura 22 apresenta uma vestimenta de proteção fabricada em fibra de meta-aramida pela empresa DuPont Nomex®.

Figura 22 - Roupas anti-chamas DuPont Nomex®.



Fonte: Dupont.

Os uniformes profissionais geralmente são produzidos em cores fortes e com tecidos resistentes para suportar o trabalho pesado do dia a dia. As peças como calças, camisas, macacões e jalecos são simples em seu design, mas oferecem conforto para quem as usa. Além da proteção essencial contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino, as vestimentas devem apresentar características que assegurem sua durabilidade ao longo do tempo, como resistência mecânica do tecido e das linhas de costura, e retenção de cor (Pluniformes, 2021).

A gramatura do tecido é uma das características importantes na avaliação e escolha das vestimentas, pois afeta a proteção oferecida pela vestimenta contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino. Tecidos retardantes ao fogo, ou retardantes a chama, geralmente apresentam gramaturas maiores do que as utilizadas na confecção de uniformes convencionais (Pluniformes, 2021). A Figura 23 ilustra um uniforme com ação anti-chamas.

Figura 23 - Uniforme com ação anti-chamas.



Fonte: Pluniformes, 2021.

Existem limitações nos tecidos anti-chama, pois a resistência à chama é apenas uma das características essenciais das vestimentas de proteção. Além disso, é importante considerar outros fatores como conforto, encolhimento, durabilidade, lavabilidade e confiabilidade, que podem afetar significativamente o sucesso do programa de vestimentas anti-chama. É importante ressaltar que nem todos os tecidos anti-chama oferecem o mesmo nível de conforto e desempenho a longo prazo, o que pode levar os trabalhadores a não utilizá-las corretamente ou mesmo evitar seu uso (Westex, 2021).

### **2.7.2. Simulações físicas para as roupas de segurança anti-chamas**

Os métodos que se fundamentam em simulações físicas através da utilização de manequins estão ganhando crescente destaque no contexto operacional. A crescente sofisticação na concepção desses locais de trabalho possibilita uma replicação cada vez mais precisa das situações reais. As instalações de trabalho em si, assim como as câmaras climáticas, dotadas da

capacidade de programar de maneira precisa as condições simuladas por meio de um sistema de controle digital, configuram-se como um pré-requisito para a reprodução fidedigna das circunstâncias reais. Essa reprodução depende, em parte, da capacidade de medição com elevado grau de precisão e do registro em formato de vídeo da execução dos testes, ambos componentes essenciais do processo de teste em questão. A Figura 24 apresenta a execução e a realização da prova de fogo em uma simulação de teste.

Figura 24 - Execução e realização da prova de fogo utilizando o manequim RALPH no laboratório BTTG de Manchester.



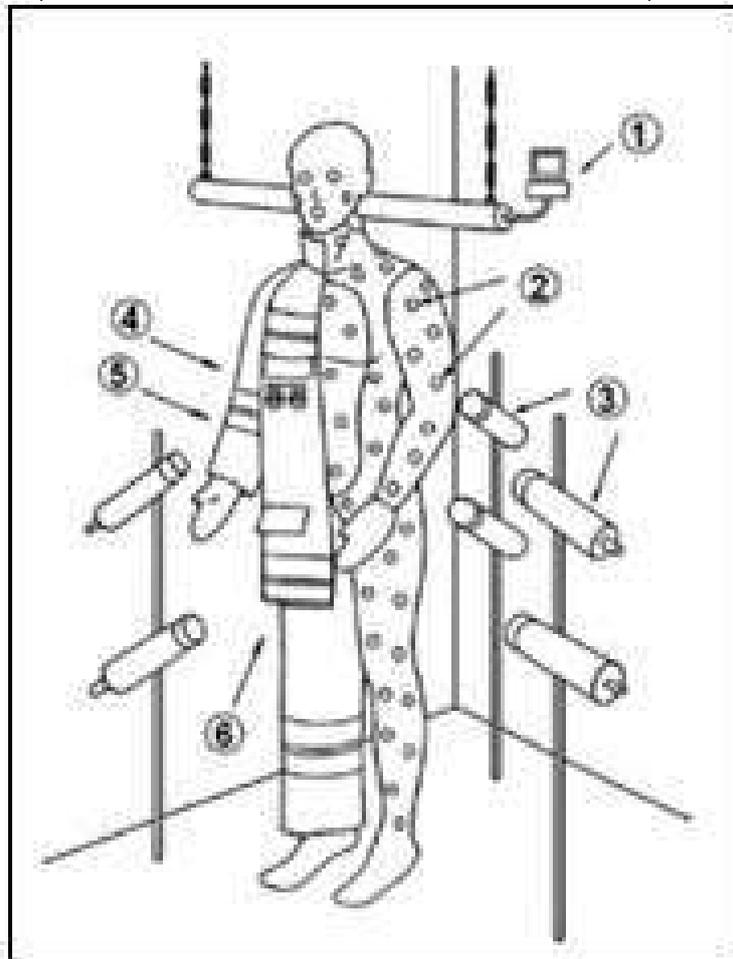
Fonte: Wolańsk e Rabajczyk, 2023.

Em todas as situações, para além da obtenção de medidas relativas à temperatura alcançada em unidades de tempo específicas na superfície do manequim, há também a possibilidade de observar o comportamento do vestuário de proteção. A aplicação de manequins de natureza térmica viabiliza a avaliação do desempenho do isolamento térmico do vestuário em análise. Os resultados oriundos desse método proporcionam um conjunto de avaliações e conclusões edificantes, exercendo um papel crucial no contexto de iniciativas de modernização e desenvolvimento (Wolańsk; Rabajczyk, 2023).

Outra função de notável relevância para os potenciais utilizadores diz respeito à obtenção de informações acerca dos riscos associados a determinados níveis de exposição a queimaduras. Consequentemente, testes são realizados utilizando manequins especializados, como o modelo THERMOMAN, a fim de avaliar o impacto dos fluxos de calor, tanto no contexto das exigências do trabalho quanto no tocante à troca de calor e umidade no interior do vestuário. Mediante a utilização desses manequins, é possível

determinar a resistência ao vapor de água dos conjuntos de vestimenta, seguindo as diretrizes da norma ASTM F2370-10. Tal norma estabelece a descrição, os requisitos e a metodologia aplicável aos ensaios (Wolańsk; Rabajczyk, 2023). A Figura 25 ilustra um esquema de bancada de ensaios térmicos, onde: 1. Sistema que registra as variações de temperatura dadas pelos sensores e prepara uma previsão de possíveis queimaduras utilizando a peça de vestuário em teste. 2. Sensores de temperatura distribuídos pela superfície do manequim (122 peças). A temperatura não é registrada nas zonas cobertas pelo braseiro, capacete, luvas e botas. 3. 8 queimadores de gás dispostos a volta do manequim. 4. Amostra de vestuário a ensaiar. 5. Casaco. 6. Calças.

Figura 25 - Esquema da bancada de ensaios térmicos com manequim THERMOMAN.



Fonte: Wolańsk; Rabajczyk, 2023.

Destacam-se, ademais, exemplos de pesquisas conduzidas na Universidade Técnica de Lodz, nas quais foi empregado o manequim de Newton, bem como no Instituto Central de Proteção do Trabalho – Instituto Nacional de Investigação.

O manequim NEWTON é confeccionado a partir do emprego de cobre, tendo sua silhueta revestida por um laminado epóxi reforçado com fibras de carbono.

Ele é indicado para simulações de carga de trabalho físico dentro de uma faixa de temperaturas ambiente que varia entre 20°C e 50°C. Salienta-se, adicionalmente, que manequins desenvolvidos para fins ergonômicos frequentemente consideram as especificidades de gênero, exemplificando-se o equivalente feminino do manequim NEWTON, denominado manequim DIANA. (Wolańsk; Rabajczyk, 2023)

### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho foi concebido com base em uma abordagem metodológica de pesquisa descritiva. A fundamentação teórica se respaldou em uma gama diversificada de fontes, abrangendo literatura internacional extraída de livros, teses e artigos, bem como periódicos científicos de renome, tais como o Science Direct, Scielo, Google Acadêmico e Periódicos da Capes. Além disso, foram consultadas diretrizes provenientes da American Society for Testing and Materials (ASTM), ampliando a base de conhecimento normativo. Vale destacar que a pesquisa foi enriquecida com informações oriundas do ambiente virtual, como plataformas de comércio eletrônico e portais/blogs especializados em engenharia, nos quais as informações se encontram no domínio público.

A condução do presente Trabalho de Conclusão de Curso teve por escopo a identificação e compilação de contribuições científicas disseminadas por instituições acadêmicas e centros de pesquisa no âmbito da pesquisa de polímeros dotados de propriedades retardantes de chama, quando empregados em vestimentas de segurança. O foco se direcionou para a identificação de trabalhos que estivessem em consonância com os critérios predefinidos.

Por conseguinte, este método de pesquisa se vale de dados qualitativos obtidos a partir de eventos concretos, visando à explicação, exploração ou descrição de fenômenos contemporâneos imersos em seu próprio contexto. Através desta abordagem, cada artigo, estudado foi examinado minuciosamente, possibilitando a apresentação de exemplos concretos e a articulação de conceitos relacionados às fibras têxteis que ostentam características de resistência à propagação de chamas.

#### **4. RESUMO DOS POLÍMEROS ABORDADOS**

Para uma melhor compreensão do conteúdo, este texto aborda a importância das propriedades intrínsecas das fibras têxteis na resistência ao fogo e na proteção térmica. Fibras naturais não tratadas quimicamente têm a capacidade de sustentar a combustão contínua, enquanto fibras sintéticas sem resistência intrínseca à chama tendem a derreter quando expostas a altas temperaturas. No entanto, materiais têxteis concebidos para resistência à chama podem suprimir a propagação da combustão após a remoção da fonte de ignição.

A escolha da fibra utilizada na composição de materiais têxteis desempenha um papel crucial na resistência ao fogo. Em resumo, o texto enfatiza a importância de compreender as características das fibras têxteis e a seleção apropriada de materiais para garantir a proteção contra incêndios e a segurança pessoal em ambientes de trabalho com riscos de fogo, contribuindo assim para a prevenção de lesões e danos. Como é possível observar no Quadro 5 uma comparação entre as fibras e suas respectivas temperaturas de fusão, temperatura de combustão, índice limite de oxigênio (LOI).

Quadro 5 – Comparação entre as fibras e suas propriedades.

<b>Fibras</b>	<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	<b>Temperatura de Combustão (°C)</b>	<b>LOI</b>	<b>Características</b>
<b>Poliéster</b>	252-292	485-560	20,6	São muito fortes e duráveis, resistentes a muitas substâncias químicas, distensão, encolhimento, mofo e abrasão, contudo, é um tecido que não “respira”. É de fácil limpeza e secagem. É revestida por um acabamento à prova de água, o que intensifica sua natureza hidrofóbica.
<b>Poliamida - Nylon®</b>	220	485-575	24,3	É uma fibra leve, resistente e lisa, que derrete com facilidade quando exposta a altas temperaturas e que não retém sujeira. Sua capacidade de absorção é muito baixa, o que permite que seque facilmente.
<b>Polipropileno</b>	164-170	570	18,6	Boa dureza superficial, boa tenacidade, baixíssima absorção de umidade, ótima resistência aos agentes químicos sintéticos e naturais, ótima resistência aos solventes em temperatura ambiente, elevada resistência ao desgaste, permitindo peças de longa durabilidade.
<b>Celulose</b>	284	-	-	Tem características parecidas com o algodão: é bastante resistente, modela-se facilmente e é macio, tem boa absorção e é confortável
<b>Linho</b>	260	-	-	Sua fibra é forte e durável, resiste a temperaturas elevadas e a fricções, são fáceis de cuidar, pois resistem a sujeiras e manchas
<b>Viscose</b>	Não funde	420	19,7	Semelhante ao algodão, porém possui melhor toque, caimento, cor mais intensa, melhor textura, possui baixa resistência à luz ultravioleta (amarela facilmente).
<b>Algodão</b>	Não funde	255	18,4	Características como versatilidade, suavidade, respirabilidade, capacidade de absorção, desempenho e durabilidade, é hidrofílico.
<b>Lã</b>	Não funde	570-600	25,2	É considerada a fibra mais resistente, além de ser bem macia e longa. Não contém muito brilho e apresenta elevada absorção, contribuindo para a respiração da pele e propiciando um uso agradável nos dias de elevada temperatura.
<b>Acetato</b>	Não funde	300	-	É um tecido muito macio e tem uma aparência luxuosa parecida com seda. Possui uma excelente maleabilidade. Pode ser tingido e estampado com grande facilidade.

Quadro 5 – Comparação entre as fibras e suas propriedades.

(Continuação)

<b>Fibras</b>	<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	<b>Temperatura de Combustão (°C)</b>	<b>LOI</b>	<b>Características</b>
<b>Couro</b>	Não funde	-	-	Assegura uma resistência térmica, muito necessária na confecção de roupas, mas permite a adaptação rápida à diferentes temperaturas, pois permite a transpiração.
<b>Poliacrilonitrila</b>	280	500	40	Ao ser aquecida, não funde e mantém sua estrutura morfológica, propriedade que é aproveitada para a produção de fibras anti-chama e mantas para filtração de gases quentes
<b>Poliuretano</b>	230	200	18	Propriedades de alongamento e recuperação enobrece tecidos, adicionando novas dimensões de caimento, conforto e contorno das roupas.
<b>Polibenzimidazol</b>	540	-	-	É uma fibra sintética com uma temperatura de decomposição muito elevada e não exibe um ponto de fusão. Tem excepcional estabilidade térmica e química e não se inflama facilmente
<b>Polibenzoxazol</b>	500	-	-	Alto desempenho que possuem uma elevada resistência mecânica, excelente estabilidade térmica e interessantes propriedades fotofísicas
<b>Politetrafluoretileno expandido</b>	327	-	-	Sua estabilidade térmica permite que suas propriedades elétricas e mecânicas não mudem, mesmo à altas (ou baixas) temperaturas e períodos de tempo
<b>Fluoreto de polivinilideno</b>	177	-	-	É um polímero hidrofóbico, atóxico e de alta resistência térmica e química
<b>Triacetato</b>	293	450-520	18,4	É um tecido de acetato melhorado, que não derrete facilmente como também é mais fácil de ser manipulado.
<b>Algodão de polivinilo</b>	Não funde	-	19,7	Os tecidos de PVC são normalmente tecidos de algodão estampados revestidos com um acabamento de plástico PVC.
<b>Modacrilica</b>	160-190	-	26,8	É uma fibra inerentemente antichama que se auto extingue e que confere excelente propriedade antichama para os tecidos e não tecidos misturados a outras fibras naturais e sintéticas. Não há deterioração nas propriedades antichamas mesmo após repetidas lavagens ou no uso normal ao longo do tempo.
<b>Nomex®</b>	316	-	30	Possui resistência ao fogo, isolante elétrico, isolante térmico, é leve e flexível, além da alta absorção de umidade
<b>Lã Zipro</b>	Não funde	-	28-34	Possui inúmeras câmaras de ar imobilizado, fazendo dela um material com baixa condutividade térmica e um excelente isolante térmico.

Quadro 5 – Comparação entre as fibras e suas propriedades.

(Conclusão)

<b>Fibras</b>	<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	<b>Temperatura de Combustão (°C)</b>	<b>LOI</b>	<b>Características</b>
<b>Policloreto de vinilo</b>	100-160	-	37,1	Possui boa resistência a intempéries, boa resistência química, isolamento elétrico, boa resistência mecânica e atoxidade, além de ser autoextinguível
<b>Para-aramida</b>	Não funde	800	30	As aramidas têm resistência excepcional à tração, aos impactos, à abrasão, à corrosão, a produtos químicos e, ainda, com alta estabilidade térmica (seja calor ou frio), sem ser condutora e ter ponto de fusão, tudo isso com baixo peso e elasticidade e considerada cerca de sete vezes mais resistente do que o aço (por unidade de peso).
<b>Meta-aramida</b>	Não funde	700	25	
<b>Kevlar®</b>	> 500	1000	41	O Kevlar® é inerentemente resistente a chamas, protegendo contra riscos térmicos de até 900°C, além disso, é composta por várias ligações inter-cadeias repetidas. Essas cadeias são reticuladas com ligações de hidrogênio, fornecendo uma resistência à tração 10 vezes maior que o aço em uma base de peso igual.

Fonte: Autora (2023).

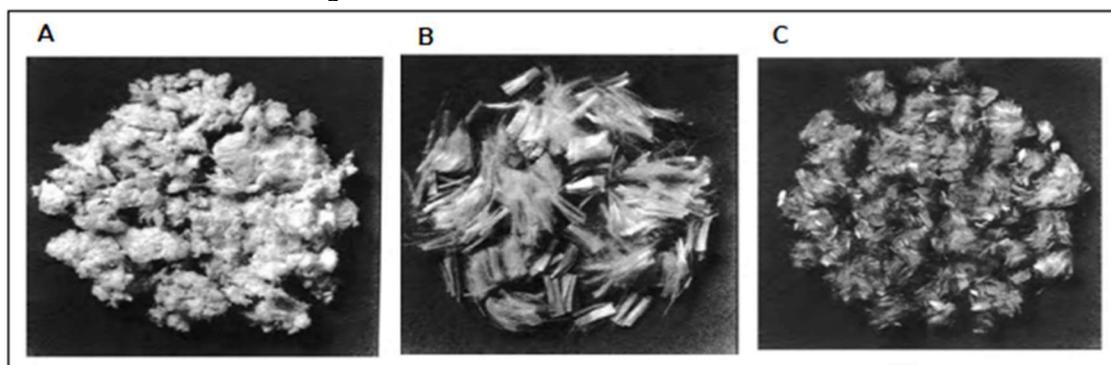
As fibras têxteis mencionadas podem ser comparadas com base em várias propriedades relevantes, tais como resistência ao fogo, resistência mecânica, comportamento à temperatura, entre outras características. A seguir as fibras têxteis serão divididas em 5 grupos distintos para apresentação.

#### Grupo 1: Fibras com Boa Resistência ao Fogo

- Para-aramida (ex: Kevlar®)
- Meta-aramida (ex: Nomex®)
- Polibenzimidazol

Este grupo inclui fibras notáveis por sua excelente resistência ao fogo e propriedades retardantes de chama, sendo amplamente utilizadas em aplicações de proteção pessoal, como uniformes para ambientes com riscos de incêndio. A Figura 26 mostra as formas físicas da fibra aramida, onde (A) é a forma de polpa, (B) está a forma de segmento e o (C) a forma em flocos.

Figura 26 – Formas físicas da fibra aramida.



Fonte: Adaptado de Trombetta, 2012.

A Tabela 7 apresenta a comparação entre duas aramidas e a Tabela 8 compara diversos tipos de Kevlar®.

Tabela 7 – Comparação entre para-aramida e a meta-aramida.

Fibra	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração (GPa)	Deformação máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Para-aramida	1,45	2,9	2,8	135
Meta-aramida	1,38	0,6	22	17

Fonte: Adaptado de Loureiro, 2016.

Tabela 8 – Comparação entre vários tipos de Kevlar®.

Tipos de Kevlar®	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Resistência à Tração (GPa)	Deformação Máxima (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Kevlar® 29	1,43	2,9	3,6	70
Kevlar® 49	1,45	2,9	2,8	135
Kevlar® 119	1,44	3,1	4,4	55
Kevlar® 129	1,45	3,4	3,3	99
Kevlar® 149	1,47	2,3	1,5	143

Fonte: Adaptado de Loureiro, 2016.

### Grupo 2: Fibras Sintéticas com Boa Resistência Mecânica

- Poliéster
- Poliamida (incluindo Nylon®)
- Polipropileno
- Poliuretano

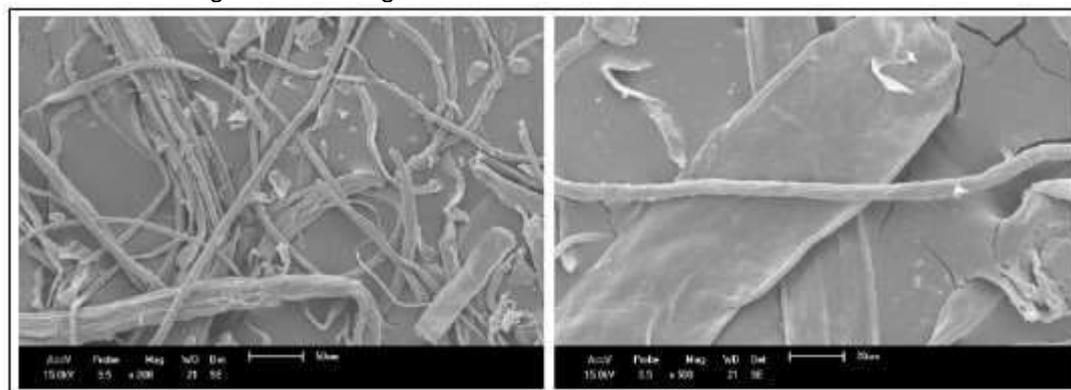
Essas fibras são conhecidas por suas boas propriedades mecânicas, como resistência à tração e durabilidade. No entanto, em relação à resistência ao fogo, elas tendem a derreter quando expostas a altas temperaturas, o que pode ser um fator limitante em aplicações de proteção contra incêndios.

### Grupo 3: Fibras Naturais e Semi-Sintéticas

- Celulose (incluindo linho e viscose)
- Algodão
- Lã
- Acetato
- Couro
- Triacetato
- Modacrílica

Essas fibras são principalmente de origem natural ou semissintética. Elas podem ser inflamáveis e queimar a temperaturas relativamente baixas, embora a lã e o couro tendam a exigir temperaturas mais altas para iniciar a combustão. A resistência ao fogo dessas fibras pode ser aprimorada por meio de tratamentos químicos ou misturas com retardantes de chama. Na Figura 27 é possível observar uma imagem de microscopia eletrônica de varredura de fibras de celulose.

Figura 27: Micrografias de MEV das fibras de celulose.



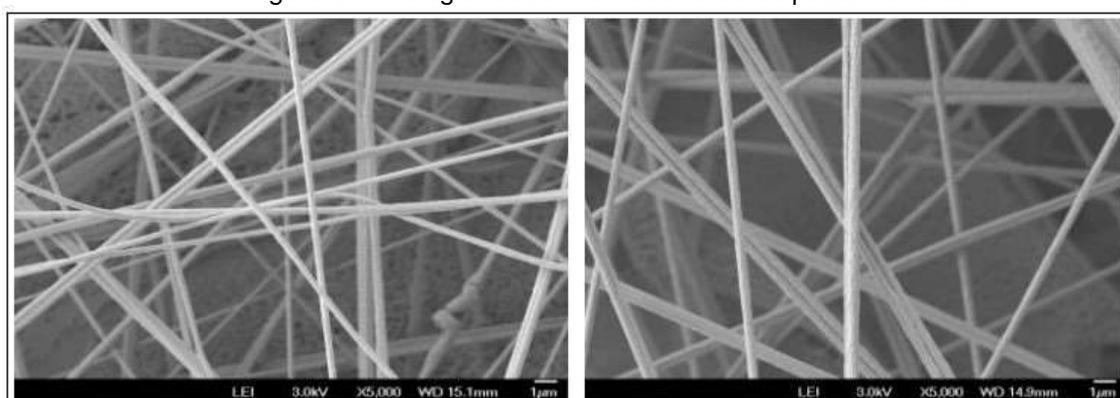
Fonte: Adaptado de Luz, Leão e Zattera, 2015.

#### Grupo 4: Outras Fibras Específicas

- Poliacrilonitrila
- Polibenzoxazol
- Politetrafluoretileno expandido
- Fluoreto de polivinilideno
- Algodão de polivinilo
- Policloreto de vinilo

Essas fibras têm aplicações específicas em setores industriais e podem oferecer propriedades únicas, como resistência química ou elétrica. Sua resistência ao fogo e outras características variam de acordo com a composição e uso específico. Um exemplo é a fibra de poliacrilonitrila que tem sua morfologia na Figura 28.

Figura 28: Micrografias de MEV das fibras de poliacrilonitrila.



Fonte: Adaptado de Camargo et al, 2017.

A escolha de uma fibra têxtil depende das necessidades específicas da aplicação, considerando fatores como resistência ao fogo, resistência mecânica e outras propriedades desejadas. Cada fibra tem suas próprias vantagens e limitações,

e a seleção adequada é fundamental para garantir o desempenho e a segurança em uma variedade de contextos industriais e de proteção pessoal. Entretanto, em materiais têxteis concebidos para resistência à chama, a propagação da combustão é praticamente instantaneamente suprimida após a remoção da fonte de ignição.

A capacidade de um material têxtil resistir ao fogo está, em parte, relacionada ao tipo de fibra utilizada na sua composição. Fibras celulósicas, como linho, viscose e algodão, demonstram uma tendência a inflamar facilmente a temperaturas relativamente baixas, ao passo que fibras proteicas, como lã e pelos, exigem temperaturas mais elevadas para iniciar a combustão e, uma vez inflamadas, queimam de maneira mais lenta, não sustentando a chama de forma persistente. Por sua vez, fibras termoplásticas, como poliamida e poliéster, possuem a propriedade de encolher em resposta à exposição a uma fonte de calor, tal como uma chama.

Os materiais têxteis compreendendo fibras de algodão tratadas com retardantes de chamas, bem como as fibras de meta-aramida, para-aramida e polibenzimidazol, são notáveis devido às suas propriedades intrínsecas de proteção térmica. Notavelmente, a fibra de para-aramida, além de sua eficácia na proteção térmica, apresenta uma característica distintiva que impede a ocorrência do fenômeno denominado "break open," o qual envolve a formação de fissuras no material carbonizado durante exposição a altas temperaturas.

A meta-aramida, como material de interesse, demonstra a notável capacidade de suportar temperaturas elevadas, chegando a resistir a valores de até 500 °C, e mesmo quando submetida a temperaturas aproximadas de 300 °C, conserva suas propriedades mecânicas por um extenso período de tempo. As fibras derivadas da meta-aramida, em virtude de sua elevada resistência à tração e do seu caráter retardante de chamas, desempenham um papel de relevância significativa no contexto industrial, oferecendo uma alternativa de grande importância na composição de vestimentas de proteção pessoal. Essas vestimentas são particularmente utilizadas em ambientes de trabalho que envolvem exposição a riscos relacionados a incêndios ou chamas.

O Nomex<sup>®</sup>, desenvolvido pela DuPont, encontra ampla aplicação na confecção de vestimentas de proteção contra incêndios, notadamente devido à sua resistência ao ácido e a substâncias corrosivas, bem como à sua notável estabilidade estrutural, que impede a transferência eficaz de calor. O Kevlar<sup>®</sup>, por sua vez, oferece uma notável resistência ao calor, rigidez, estabilidade estrutural e baixa condutividade térmica, características essas que contribuem para inibir a propagação de chamas

em tecidos, razão pela qual é empregado em diversos setores industriais com ênfase na segurança contra incêndios.

No entanto, é importante observar que materiais sintéticos, como poliéster, polipropileno, Nylon® e misturas de algodão com fibras sintéticas, não são apropriados para aplicações de proteção térmica, uma vez que apresentam uma tendência a derreter quando expostos a temperaturas inferiores a 315°C, exacerbando, assim, o potencial de lesões por queimaduras.

Adicionalmente, é relevante destacar que fibras naturais, como algodão, misturas de algodão-poliéster, seda, lã e Nylon®, são consideradas materiais inflamáveis. Embora tecidos compostos por fibras de algodão tratadas com retardantes de chamas, meta-aramidas, para-aramidas e polibenzimidazol possam, em determinadas circunstâncias, iniciar a ignição, eles se caracterizam por extinguir a combustão quase que instantaneamente após a remoção da fonte de calor, reduzindo, assim, o risco de propagação do fogo e minimizando danos associados.

Aqui estão as características distintas de algumas das fibras têxteis mencionadas:

#### Poliéster:

- Composição: Polímero sintético de condensação.
- Características: Resistente, durável, de secagem rápida, resistente a rugas, baixa absorção de umidade, boa retenção de cor.

#### Poliamida (Nylon®):

- Composição: Fibra sintética à base de polímeros. É um polímero termoplástico composto por monômeros de amida conectados por ligações peptídicas, podendo conter outros grupamentos
- Características: Alta resistência à tração, durabilidade, boa elasticidade, absorção moderada de umidade.

#### Polipropileno:

- Composição: Fibra sintética à base de polipropileno.
- Características: Leve, resistente à umidade, resistente a manchas, boa resistência química.

#### Celulose:

- Composição: Fibra natural de origem vegetal.

- Características: Suave, confortável, absorvente, tendência à inflamabilidade.

Linho:

- Composição: Fibra natural de origem vegetal (linho).
- Características: Respirável, boa condutividade térmica, enrugamento fácil.

Viscose:

- Composição: Fibra semissintética obtida a partir da celulose.
- Características: Macia, sedosa, absorvente, propensa a enrugamento.

Algodão:

- Composição: Fibra natural de origem vegetal.
- Características: Macio, absorvente, respirável, propenso a encolhimento e rugas.

Lã:

- Composição: Fibra natural de origem animal (ovelhas).
- Características: Isolante térmico, resistente à umidade, elasticidade natural, propenso a encolher e amassar.

Couro:

- Composição: Material de origem animal (pele).
- Características: Durável, resistente à água, flexível, isolante térmico.

Meta-aramida (Nomex®):

- Composição: Fibra sintética com alta resistência ao fogo. É uma poliamida aromática que tem grupos na posição meta.
- Características: Excelente resistência ao calor, retardante de chama, retenção de resistência mecânica em altas temperaturas.

Para-aramida (Kevlar®):

- Composição: Fibra sintética com alta resistência ao fogo. É uma poliamida aromática que tem grupos na posição para.
- Características: Extremamente resistente, leve, alto módulo de elasticidade, resistente a produtos químicos.

Essas características individuais das fibras têxteis são essenciais para a seleção adequada em diversas aplicações, desde vestuário até equipamentos de proteção pessoal e materiais industriais, com base nas necessidades específicas de cada contexto.

## 5. CONCLUSÕES

O presente Trabalho de Conclusão de Curso abordou a relevância dos polímeros aplicados em roupas de segurança anti-chamas, destacando sua contribuição significativa para a proteção e preservação da vida humana em ambientes de alto risco, como aqueles suscetíveis a incêndios e altas temperaturas. Ao longo deste estudo, foi possível perceber que a pesquisa e desenvolvimento de materiais poliméricos avançados desempenham um papel crucial na melhoria da resistência ao fogo, isolamento térmico e conforto das vestimentas de proteção utilizadas por bombeiros, trabalhadores industriais e outros profissionais expostos a situações potencialmente perigosas.

A aplicação bem-sucedida dos polímeros nas roupas anti-chamas tem permitido a criação de produtos mais eficazes e ergonômicos, que garantem a segurança do usuário sem comprometer o conforto durante o desempenho de suas atividades. Além disso, a redução do peso e do volume das vestimentas anti-chamas, possibilitada pelo uso de polímeros avançados, contribui para a mobilidade e flexibilidade dos indivíduos em situações críticas, permitindo uma resposta mais eficiente e eficaz em caso de emergências.

Ao longo deste estudo, foi dentre os polímeros, a para-aramida (como o Kevlar<sup>®</sup>), meta-aramida (como o Nomex<sup>®</sup>) e polibenzimidazol desempenham um papel fundamental na proteção e segurança dos trabalhadores expostos a ambientes de alto risco, onde a exposição ao fogo e altas temperaturas é uma preocupação constante.

A aplicação dos polímeros para-aramida, como o Kevlar<sup>®</sup>, em roupas de segurança anti-chamas é notável devido à sua excepcional resistência ao fogo e ao calor. A capacidade desses materiais em manter sua integridade estrutural e retardar a propagação das chamas é crucial para garantir a segurança dos indivíduos que os utilizam. Além disso, o Kevlar<sup>®</sup> é conhecido por sua resistência à tração, tornando-o ideal para reforçar as roupas de proteção.

No que diz respeito aos polímeros meta-aramida, exemplificado pelo Nomex<sup>®</sup>, sua importância reside na combinação de propriedades como resistência térmica,

resistência química e resistência à tração. Isso torna o Nomex<sup>®</sup> um material valioso para a fabricação de roupas de segurança anti-chamas, que devem não apenas resistir ao calor extremo, mas também oferecer proteção contra produtos químicos perigosos frequentemente presentes em ambientes industriais.

O polibenzimidazol, embora menos conhecido em comparação com os polímeros mencionados anteriormente, também desempenha um papel crucial na proteção contra incêndios. Sua resistência ao fogo excepcional e estabilidade térmica fazem dele um material valioso para aplicações de vestuário anti-chamas, especialmente em cenários em que a exposição a altas temperaturas é inevitável.

A utilização de polímeros como Kevlar<sup>®</sup>, Nomex<sup>®</sup> e polibenzimidazol em roupas de segurança anti-chamas é essencial para proteger a vida e a saúde dos trabalhadores em ambientes de alto risco. A pesquisa contínua e o desenvolvimento desses materiais poliméricos contribuem significativamente para melhorar a eficácia e o conforto das roupas de proteção, proporcionando um ambiente de trabalho mais seguro e confiável. No futuro, espera-se que avanços adicionais nesse campo resultem em produtos ainda mais inovadores, oferecendo proteção incomparável aos trabalhadores em situações de perigo.

Por fim, a ciência dos materiais desempenha um papel crucial na produção de roupas de segurança anti-chamas, utilizando retardantes de chama, beneficiando tanto a sociedade quanto a indústria. Na sociedade, elas garantem a segurança e integridade física dos trabalhadores, reduzindo o risco de ferimentos graves. Na indústria, o desenvolvimento contínuo de materiais anti-chamas impulsiona a inovação e a qualidade dos produtos. A pesquisa nessa área resulta em materiais mais eficientes e confortáveis, além de estimular o crescimento do mercado de roupas de segurança. Portanto, a ciência dos materiais e a criação de roupas anti-chamas não apenas salvaguardam vidas, mas também promovem o progresso industrial, proporcionando um ambiente de trabalho seguro e sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ABICHAMA. Retardantes de Chamas. 2021. Disponível em: <<http://www.abichama.com.br/retardantes-de-chama/>>. Acesso em: 30 abr.2023.
- ABRACOPEL. O que é vestimenta FR “Fire Retardant” (Retardante de Chama).9 ago. 2012. Disponível em: <[https://abracopel.org/download/artigo-tecnico-o-que-e-vestimenta-fr-fire-retardant-retardante-de-chama/?doing\\_wp\\_cron=1682943926.4901270866394042968750](https://abracopel.org/download/artigo-tecnico-o-que-e-vestimenta-fr-fire-retardant-retardante-de-chama/?doing_wp_cron=1682943926.4901270866394042968750)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.
- ALAGO, I. Segurança Química. CONHEÇA AS MELHORES PRÁTICAS NA GESTÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS, 27 out. 2020. Disponível em: <<https://www.chemicalrisk.com.br/gestao-de-produtos-quimicos-melhores-praticas/>>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- ALVES, E. V. Desenvolvimento de um produto retardante de chamas paratecidos puros de algodão. 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.univap.br/dados/00002c/00002cc4.pdf>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.
- ARAÚJO, M. De; CASTRO, M. De M. E. Manual de Engenharia Textil. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. Disponível em: <<https://www.bertrand.pt/livro/manual-de-engenharia-textil-i-mario-de-araujo/164476>>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- AREASEG. Fogo e Incêndio. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.areaseg.com/fogo/>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.
- BAJAJ, P. Fire-retardant materials. Bulletin of Materials Science, 1992. p. 67–76. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02745218>. Acesso em: 15 maio 2023.

BARBOSA, M. C. *et al.* Setor de fibras sintéticas e suprimento de intermediários petroquímicos. [S.l.]: [s.n.], 2004. Disponível em: <  
[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2493/3/BS%2020%20O%20setor%20de%20fibras%20sint%C3%A9ticas\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2493/3/BS%2020%20O%20setor%20de%20fibras%20sint%C3%A9ticas_P.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2023.

BOURBIGOT, S.; FLAMBARD, X. Heat resistance and flammability of high performance fibres: A review. *Fire and Materials*, jul. 2002. v. 26, n. 4–5, p. 155–168. Disponível em: <  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fam.799>>. Acesso em: 15 maio 2023.

CAMARGO, L. A. De *et al.* PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFIBRAS DE POLIACRILONITRILA POR FIAÇÃO POR SOPRO EM SOLUÇÃO COMO PRECURSOR PARA NANOFIBRAS DE CARBONO. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/168151/1/P-Producao-e-Characterizacao-de-Nanofibras-....pdf>. Acesso em: 1º maio 2023.

CAETANO, M. J. L. Flamabilidade: Índice Limite de Oxigênio. 2022. Disponível em: <  
[CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução. \[S.l.\]: LTC, 2016. V. 9. Disponível em:  
\[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6140748/mod\\\_resource/content/1/473965973-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9%C2%AA-Edicao-pdf.pdf\]\(https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6140748/mod\_resource/content/1/473965973-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9%C2%AA-Edicao-pdf.pdf\). Acesso em: 6 maio 2023.](https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-termicas/flamabilidade/indice-limite-de-oxigenio-loi/#:~:text=Os%20materiais%20que%20possuem%20valores,em%20geral%20considerados%20auto%2Dextingu%C3%ADveis.></a>. Acesso em: 1º maio 2023.</p></div><div data-bbox=)

CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros. São Paulo: ArtLiber, 2006. V. 2. Disponível em: <  
[http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541\\_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%CC%83o%20V..pdf](http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastiao%CC%83o%20V..pdf)>. Acesso em: 3 maio 2023.

CASAOLIVETTI. CLASSES DE INCÊNDIO. 2023. Disponível em: <<http://www.casaolivetti.com.br/classes.html>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

COLLIN, A. *et al.* Study on visible–IR radiative properties of personal protective clothings for firefighting. *Fire Safety Journal*, jan. 2015. v. 71, p. 9–19. Disponível em: < <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037971121400157X>>. Acesso em: 3 ago. 2023.

COLONESE, P. O homem e o fogo. *InVivo - Museu da Vida*, 29 nov. 2021. Disponível em: <<http://www.invivo.fiocruz.br/cienciaetecnologia/o-homem-e-o-fogo/#:~:text=Entre%201%2C8%20milh%C3%B5es%20e,f%C3%A1cil%20combust%C3%A3o%2C%20pegaria%20fogo%20normalmente>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

DASARI, A. *et al.* Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*, set. 2013. v. 38, n. 9, p. 1357–1387. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670013000774>>. Acesso em: 5 ago. 2023.

DUPONT. Fibras Nomex® para proteção contra calor e resistência a chamas. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.dupont.com.br/products/nomex-fibers.html>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

FONTOURA, M. Da. COMPORTAMENTO AO FOGO DOS POLÍMEROS HALOGENADOS (PVC, CPVC, PTFE). 2021. Disponível em: <[file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/183-MARINA\\_v6\\_2021\\_especial.pdf](file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/183-MARINA_v6_2021_especial.pdf)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

GALLO, J. B.; AGNELLI., J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. *Polímeros*, mar. 1998. v. 8, n. 1, p. 23–38. Disponível

em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14281998000100005&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281998000100005&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 15 ago. 2023.

GARCIA, P. L.; MONTEIRO, E. V. Qualidade no uniforme profissional - A importância das informações técnicas para utilização do uniforme profissional com propriedades Anti Estática e Anti Chamas. 2010. Disponível em: <[http://ric-cps.eastus2.cloudapp.azure.com/bitstream/123456789/1451/1/20102S\\_GARCIAPriscilaLopes\\_TCCTX0155.pdf](http://ric-cps.eastus2.cloudapp.azure.com/bitstream/123456789/1451/1/20102S_GARCIAPriscilaLopes_TCCTX0155.pdf)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

HOLMES, D. A.; HORROCKS, A. R. Technical textiles for survival. Handbook of Technical Textiles. [S.l.]: Elsevier, 2016, p. 287–323. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782424659000100>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

HOQUE, Md. S.; DOLEZ, P. I. Aging of HIGH-PERFORMANCE fibers used in firefighters' protective clothing: State of the knowledge and path forward. Journal of Applied Polymer Science, 20 ago. 2023. v. 140, n. 32, p. e54255. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.54255>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

INMETRO. CAPÍTULO III - DA DENOMINAÇÃO DAS FIBRAS TÊXTEIS E DOS FILAMENTOS TÊXTEIS. 12 jun. 2019. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002583.pdf>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

KILIARIS, P.; PAPASPYRIDES, C. D. Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670010000304?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 set. 2023.

KUASNE, A. FIBRAS TEXTEIS. Araranguá: [s.n.], 2008. V. 2. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila\\_fibras.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila_fibras.pdf)>. Acesso em: 8 ago. 2023.

LADCHUMANANANDASIVAM, R. Ciência dos Polímeros e Engenharia dasFibras  
II. Disponível em:  
<[file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/UNIVERSIDADE\\_FEDERAL\\_D  
O\\_RIO\\_GRANDE\\_DO\\_NO.pdf](file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/UNIVERSIDADE_FEDERAL_D_O_RIO_GRANDE_DO_NO.pdf)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

LAOUTID, F. *et al.* New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. 2008. Disponível em:  
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X08000892?via%3Dihub>>. Acesso em: 29 ago. 2023.

LEWIN, M. Handbook of Fiber Chemistry. Boca Raton: [s.n.], 2006. V. 3. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420015270/handbook-fiber-chemistry-menachem-lewin>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LIU, Y. *et al.* The Effect of a Novel Intumescent Flame Retardant-Functionalized Montmorillonite on the Thermal Stability and Flammability of Eva. [S.l.], 2015. Disponível em:  
<<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/096739111502300507>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LOUREIRO, L. REUTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE PARA-ARAMIDA COMO REFORÇO MECÂNICO EM POLIAMIDA 6,6. 2016. Disponível em:  
<<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/8160/DissLL.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 10 set. 2023.

LUZ, S. M. Da; LEÃO, R.; ZATTERA, Ademir J. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIESTIRENO REFORÇADO COM CELULOSE DE BAGAÇO DE CANA. 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/320233735\\_PROPRIEDADES\\_MECANICAS\\_DE\\_COMPOSITOS\\_DE\\_POLIESTIRENO\\_REFORCADO\\_COM\\_CELULOSE\\_DE\\_BAGACO\\_DE\\_CANA](https://www.researchgate.net/publication/320233735_PROPRIEDADES_MECANICAS_DE_COMPOSITOS_DE_POLIESTIRENO_REFORCADO_COM_CELULOSE_DE_BAGACO_DE_CANA)>. Acesso em: 10 set. 2023.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. INTRODUÇÃO A POLÍMEROS. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 1999. Disponível em: <[file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/\[MANO\]%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Pol%C3%ADmeros%20-%202a%20ed.pdf](file:///C:/Users/HOME%20OFFICE/Downloads/[MANO]%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Pol%C3%ADmeros%20-%202a%20ed.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2023.

MIYADA, F. H. *et al.* Tratamento Anti-Chama em Materiais Têxteis. 2010. Disponível em: <[https://www.academia.edu/11506785/Tratamento\\_Anti\\_Chama\\_em\\_Materiais\\_T%C3%AAxteis](https://www.academia.edu/11506785/Tratamento_Anti_Chama_em_Materiais_T%C3%AAxteis)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

MONTAZER, M.; HARIFI, T. Flame-retardant textile nanofinishes. Nanofinishing of Textile Materials. [S.l.]: Elsevier, 2018, p. 163–181. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008101214700011X>>. Acesso em: 30 jul. 2023.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 1971: Norma sobre Conjuntos de Proteção para Combate a Incêndio Estrutural e Combate a Incêndio de Proximidade. Eua: Nfpa, 2017.

OLIVEIRA, C. R. S. D. Acabamento retardante de chamas em tecido de algodão a partir da incorporação de um compósito nano-híbrido caulinita-TiO<sub>2</sub> via processo solvotermal. 2020. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/230873?show=full>>. Acesso em: 29 ago. 2023.

PIMENTA, E. Fibras Têxteis Polipropileno suas características e vantagens frente a seus concorrentes. 2023. Disponível em:

<<https://www.braskem.com.br/technical-service/tsd-detalle-noticia/fibras-texteis-polipropileno-suas-caracteristicas-e-vantagens-frente-a-seus-concorrentes#:~:text=As%20fibras%20sint%C3%A9ticas%20s%C3%A3o%20excelescentes,abras%C3%A3o%2C%20resist%C3%Aancia%20bacteriol%C3%B3gica%2C%20flexibilidade%2C>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

PLUNIFORMES. Uniformes Antichamas NR 10. 2021. Disponível em:

<<https://pluniformes.com.br/uniformes-antichamas-nr-10-rio-de-janeiro-rj/#:~:text=Tecidos%20inerentemente%20retardantes%20a%20chamas,mais%20alta%20tecnologia%20do%20mercado>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

REIS, V. Dos. Combustíveis e Sistemas de Combustível. Disponível em:

<<https://aerotd.com.br/decoleseufuturo/wp-content/uploads/2015/05/COMBUST%C3%8DVEIS-E-SISTEMAS-DE-COMBUST%C3%8DVEL.pdf>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

RIBEIRO, L. M. Estudo da flamabilidade e resistência à chama de compósito de poliéster insaturado e fibra da folha de abacaxizeiro (PALF). 2011. Disponível em:

<[https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15662/1/LucieneMR\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15662/1/LucieneMR_DISSERT.pdf)>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

RODA, D. T. ADITIVOS RETARDANTES DE CHAMAS. 27 jan. 2014. Disponível em: <<https://www.tudosobreplasticos.com/aditivos/antichamas.asp>>. Acesso em: 1<sup>o</sup> maio 2023.

SANTOSO, M. A. et al. Review of the Transition From Smouldering to Flaming Combustion in Wildfires. 2019. v. 5. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2019.00049/full>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

SCHREUDER-GIBSON, H. L. et al. Chemical and Biological Protection and Detection in Fabrics for Protective Clothing. 2003. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA431382.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SCOTT, R. A. Textiles for protection. [S.l.]: [s.n.], 2005. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=d-yiAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=OGf0a\\_6Uv3&sig=aGaDfemkaEwBy3jH1JJ-AVFP70w&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=d-yiAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=OGf0a_6Uv3&sig=aGaDfemkaEwBy3jH1JJ-AVFP70w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 4 set. 2023.

SILVA, A. L. B. B. E; SILVA, E. O. Da. CONHECENDO MATERIAIS POLIMÉRICOS. 2003. p. 84. ALONGI, J. (Org.). Update on flame retardant textiles: state of the art, environmental issues and innovative solutions. Shawbury: Smithers Rapra, 2013. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000223.pdf>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

SONG, G.; WANG, F. Firefighters' Clothing and Equipment - Performance, Protection and Comfort. [S.l.]: [s.n.], 2019. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=blqADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=82YGudjAL1&sig=E1miw-T1Tagr90\\_B8C4P814LQPI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=blqADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=82YGudjAL1&sig=E1miw-T1Tagr90_B8C4P814LQPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true)>. Acesso em: 30 set. 2023.

TROMBETTA, F. USO DE FIBRAS DE ARAMIDAS PARA A MELHORIA DE PROPRIEDADES DE COMPOSTOS DE BORRACHAS NITRILICAS. 2012. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/79815/000899943.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 set. 2023.

VECTRA. ROUPA ANTI CHAMA PARA PROTEÇÃO CONTRA FOGO REPENTINO. 2023. Disponível em: <<https://www.vectrawork.com.br/roupa-antichamas#:~:text=As%20vestimentas%20de%20prote%C3%A7%C3%A3o%20contra,exposi%C3%A7%C3%A3o%20ao%20calor%20excessivo%20ou>>. Acesso em: 1o maio 2023.

WAKELYN, P. J. Environmentally friendly flame resistant textiles. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845692629500091?via%3Dihub>>. Acesso em: 5 ago. 2023.

WESTEX. ALÉM DO CUMPRIMENTO DAS NORMAS: ESPECIFICANDO VESTIMENTAS ANTICHAMA CONFIÁVEIS. 2021. Disponível em: <<https://br.westex.com/blog/alem-do-cumprimento-das-normas-especificando-vestimentas-antichama-confiaveis/>>. Acesso em: 1o maio 2023.

WINGS. Pontos de Combustão. 2020. Disponível em: <<https://wingsescola.com.br/pontos-de-combustao-x-formas/>>. Acesso em: 1o maio 2023.

WOLAŃSK, R.; RABAJCZYK, A. Selected Aspects of Transformation of Textile Elements of Firemen's Personal Protection - Wybrane aspekty transformacji tekstylnych elementów ochron osobistych strażaków. 2023. Disponível em:

<<https://panel.sft.cnbop.pl/storage/e75499e7-fca1-4376-927c-b634bbbaaa8a>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

YOUNG, R. Understanding Turnout Gear - As the fire alarm sounds, firefighters are acutely aware of the vital protection provided by the turnout gear they put on before heading out on the call. 2010. Disponível em: <<https://www.fireapparatusmagazine.com/ems/understanding-turnout-gear/#gref>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ZHANG, S. et al. The effects of particle size and content on the thermal conductivity and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/high density polyethylene (HDPE) composites. 2010. Disponível em: <[https://EPL-0002172\\_article.pdf](https://EPL-0002172_article.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ZHU, R.; YOUNG, RH Tecido retardante de fogo com maior resistência a rasgos, cortes e abrasão, 3 jun. 2002. Disponível em:

<<https://patents.google.com/patent/US6840288B2/en?q=yarn&q=component&q=yarn+component&q=ripstop&q=fabric&before=priority:20020606&scholar>>. Acesso em: 29 junho. 2023

ZIMMERMANN, M. V. G. et al. Sorbent system based on organosilane-coated polyurethane foam for oil spill clean up. Polymer Bulletin, mar. 2021. v. 78, n. 3, p. 1423–1440. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00289-020-03169-5>> . Acesso em: 25 ago. 2023.