



LETHÍCIA MARTINS DE MORAIS SILVA

**POTENCIAL DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS COMO
RETARDANTE DE CHAMAS**

**LAVRAS – MG
2023**

LETHÍCIA MARTINS DE MORAIS SILVA

**POTENCIAL DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS COMO RETARDANTE DE
CHAMAS**

Concepção básica apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Raphael Nogueira Rezende
Orientador

Prof.(a) Dr.(a) Luana Elis De Ramos e Paula
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Lethícia Martins de Morais.

Potencial da Lignina como Retardante de Chamas / Lethícia
Martins de Morais Silva. - 2023.

32 p.

Orientador(a): Raphael Nogueira Rezende.

Coorientador(a): Luana Elis de Ramos e Paula.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,
2023.

Bibliografia.

1. Incêndios. 2. Lignina. 3. Resistência à fogo. I. Rezende,
Raphael Nogueira. II. Paula, Luana Elis de Ramos e. III. Título.

LETHÍCIA MARTINS DE MORAIS SILVA

**POTENCIAL DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS COMO RETARDANTE DE
CHAMAS
POTENTIAL OF LIGNOCELLULOSIC MATERIALS AS FLAME RETARDANT**

Concepção básica apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADA em 08 de dezembro de 2023.
Dr.(a) Luana Elis De Ramos e Paula UFLA
Dr. Paulo Roberto Borges

Prof. Dr. Raphael Nogueira Rezende UFLA
Orientador (a)

Prof.(a) Dr.(a) Luana Elis De Ramos e Paula
Coorientador (a)

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por me proporcionar força e coragem para enfrentar e vencer em todos os dias de cabeça erguida, mesmo que a caminhada seja longa e desafiadora.

Agradeço à minha mãe, que nunca me deixou sozinha e sempre me mostrou que independente das circunstâncias que a vida me der, o mundo pode ser meu também.

Agradeço à minha irmã, meus sobrinhos e ao meu cunhado por me proporcionarem risadas e por tirarem o estresse do dia-a-dia simplesmente por estarem ao meu lado me apoiando.

Agradeço também aos professores da Universidade Federal de Lavras, em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Raphael Nogueira Rezende e à Prof.(a) Dr.Luana Elis de Ramos e Paula, pela atenção, orientação e disposição a ajudar quando necessário durante a escrita deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas que, muitas vezes, foram inspiração e fôlego para que eu chegasse nesse momento de imensurável importância pessoal e profissional.

Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho, que sempre são complacentes, amigos e alegram meus dias em horário comercial.

RESUMO

Incêndios causam todos os anos perdas diversas e significativas em relação à vida humana, aos bens materiais e ao meio ambiente. Em média, no país, ocorrem 270 mil incêndios por ano, sendo a maioria destes não investigados e cobertos pela mídia, e muitos outros ainda subnotificados. Assim, a segurança contra incêndio e pânico de um ambiente deve ser considerada e concebida para qualquer condição de uso e ocupação, apesar de ainda ser pouco contemplada no Brasil. Desta forma, estudos que abordam alternativas de prevenção, como a retardação de chamas em situações de emergência tornam-se necessários e relevantes, sob a ótica do controle e maior grau de segurança e de resistência a fogo. Neste contexto, materiais lignocelulósicos podem ser inseridos e pesquisados, dado o alto potencial de resistência à degradação térmica e à combustão, além de serem encontrados em abundância na natureza. O presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento sistemático acerca do potencial da lignina como retardante de chamas. Para isso, uma pesquisa de dados qualitativa, em bases nacionais e internacionais foi desenvolvida, buscando-se informações como os principais materiais utilizados e os resultados e evidências científicas obtidas. De forma descritiva, os dados foram tabulados, destacando-se também possíveis fragilidades associadas às pesquisas. Como critérios de seleção e inclusão das fontes, foram adotadas palavras-chave relacionadas à incêndio, resistência e propagação de chamas, e referências originais e inéditas a partir do ano 2000.. Aspectos básicos de legislação de segurança contra incêndio e pânico também foram adotados, como às disposições das Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros, no que tange a tempos requeridos de resistência a fogo. Os resultados indicaram que a adição de lignina em compostos tradicionalmente retardantes de chamas permite melhorar o desempenho em testes de flamabilidade, capacidade de ignição, taxa de liberação de calor e perda de massa.

Palavra-chave: Incêndios. Lignina. Resistência a fogo. Flamabilidade.

ABSTRACT

Fires cause diverse and significant losses to human life, material assets and the environment every year. On average, in the country, there are 270 thousand fires per year, most of which are not investigated and covered by the media, and many others are still underreported. Therefore, fire and panic safety in an environment must be considered and designed for any condition of use and occupancy, although it is still little considered in Brazil. Therefore, studies that address prevention alternatives, such as flame retardancy in emergency situations, become necessary and relevant, from the perspective of control and a greater degree of safety and fire resistance. In this context, lignocellulosic materials can be inserted and researched, given their high potential for resistance to thermal degradation and combustion, in addition to being found in abundance in nature. The present work aimed to carry out a systematic survey of the potential of lignin as a flame retardant. To this end, qualitative data research, on national and international bases, was developed, seeking information such as the main materials used and the results and scientific evidence obtained. In a descriptive way, the data were tabulated, also highlighting possible weaknesses associated with the research. As criteria for selection and inclusion of sources, keywords related to fire, resistance and spread of flames, and original and unpublished references from the year 2000 were adopted. Basic aspects of fire and panic safety legislation were also adopted, as well as the provisions of the Fire Department's Technical Instructions, regarding required fire resistance times. The results indicated that the addition of lignin to traditionally flame retardant compounds allows improving performance in flammability, ignition capacity, heat release rate and mass loss tests.

Keyword: Fires. Lignin. Fire resistance. Flammability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Triângulo e quadrado do fogo	14
Figura 2 - Curva de evolução do incêndio	15
Figura 3 – Tipos de retardantes à base de lignina.....	19

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alcalina
APP	Polifosfato de amônio
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CBMMG	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
COSCIP	Código Contra Incêndio e Pânico
DDM	4,4-diaminodifenilmetano
DL	Lignina kraft
DMF	Dimetilformamida
DOPO	9,10-dihidro-9-oxa-10-fosfafenantreno-10-óxido
EP	Resina epóxi
FR	Retardante de chama
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional de Padronização
IT	Instruções Técnicas
LL	Lignina industrial lignosulfonato
LOI	Índice Limite de Oxigênio
LS	Lignossulfonato de sódio
MDPI	Instituto Multidisciplinar de Publicação Digital
MEL	Melamina
N	Nitrogênio
P	Fósforo
PA	Ácido fítico
PA11	Poliamida 11
PHRR	Taxa de liberação de calor
PLA	Polilactídeos
PPE	Polipropileno etileno
PU	Espuma de poliuretano
PVC	Poli cloreto de vinila
SA	Aerogéis alginato de sódio
SBR	Borracha de estireno butadieno
SENASP	Secretaria Nacional de Segurança Pública

THR	Taxa de liberação total de calor
TP	Monômero contendo fósforo
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UL	Underwriters Laboratories

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial retardante de chamas da lignina.....	21
Tabela 2 – Propriedades de polipropileno-etileno.....	22
Tabela 3 – Propriedades de poliuretano.....	23
Tabela 4 – Propriedades da poliamida 11.....	24
Tabela 5 – Propriedades de resina epóxi.....	24
Tabela 6 – Propriedades de resina epóxi.....	25
Tabela 7 – Propriedades de polilactídeos	26
Tabela 8 – Propriedades da borracha de estireno butadieno.....	26
Tabela 9 – Propriedades de aerogéis	27
Tabela 10 – Propriedades da resina epóxi.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1. Fogo e incêndio.....	14
2.2 Legislação e medidas de segurança contra incêndio e pânico.....	16
2.3 Resistência a fogo.....	17
2.4 Retardantes de	17
chama.....	
2.5 Materiais lignocelulósicos.....	18
3 METODOLOGIA.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
5 CONCLUSÃO.....	29
6 REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

Na história da humanidade o fogo esteve presente há milhares de anos, seja inicialmente com a ocorrência de incêndios naturais, provenientes de descargas atmosféricas ou erupções vulcânicas, ou com o uso oportuno para o homem primitivo, ainda sem controle.

O uso controlado do fogo teve início na Era Paleolítica, pelos ancestrais do ser humano (*Homo Erectus*) e assim tornou-se importante em diversas aplicações como cocção de alimentos, proteção de territórios e contra animais, produção de ferramentas e cerâmicas, entre outros (GOWLETT, 2016).

Dessa forma, evidencia-se que este fogo influenciou positivamente na evolução da humanidade. Porém, a perda de controle da reação de queima ainda é um grande problema, por, muitas vezes, causar eventos de grandes proporções em curto intervalo de tempo, com danos irreparáveis à vida, ao patrimônio, à fauna, à flora, e outros.

O Brasil é um país com muitas ocorrências de incêndios, estimando-se que a cada ano ocorrem mais de 270 mil eventos segundo dados oficiais da Secretaria Nacional de Segurança Pública (SENASP, 2020) e foi com as grandes tragédias que a atenção à necessidade da criação de leis e normas específicas para combate a incêndio surgiu e evoluiu.

Incêndios históricos podem ser citados, como Cine Oberdan, Clube Elite, Gran Circo Norte Americano e vários outros.

O maior incêndio com vítimas fatais no Brasil ocorreu em Niterói, em 1961, quando um ex-funcionário do Gran Circo Norte Americano ateou fogo na lona, feita de material altamente inflamável, causando um incêndio que culminou na morte de 503 pessoas e 800 feridos, sendo a maioria delas crianças e idosos (BERNARDO, 2023).

Outros incêndios ocorreram, como no Edifício Andraus, em São Paulo, no ano de 1972, com 16 vítimas fatais, e o Edifício Joelma, em 1974, também em São Paulo, acarretando a morte de 180 pessoas e mais de 300 feridos (COSTA, 2022).

Após os fatos ocorridos, por volta do ano de 1975, surgiu a primeira regulamentação sobre combate ao incêndio, e em 1976, o Rio de Janeiro criou o Código Contra Incêndio e Pânico (COSCIPI).

A partir disso a legislação foi sendo incrementada, aperfeiçoando pontos até então não abordados, a fim de evitar e/ou controlar a ocorrência de sinistros.

Entretanto, grandes incêndios ainda fazem parte e são frequentes nas estatísticas de tragédias no país.

Em 2013, em Santa Maria/Rio Grande do Sul, houve a mais recente tragédia brasileira: incêndio na Boate Kiss, com a morte de 242 pessoas, resultante de uma série de inconsistências e falhas para um local de reunião de público. Mesmo que a legislação já tivesse sofrido considerável avanço no decorrer dos anos, foi constatado uma série de erros negligenciados neste evento (BRUM, 2023).

Por conseguinte, no ano de 2017, foi criada a Lei Kiss (Lei 13.425/2017) a fim de definir regras de incêndio e pânico para locais de reunião de público, porém ainda permanecem as regras estaduais e municipais, delegando-se as competências e as responsabilidades pertinentes a cada entidade sobre a segurança contra incêndio e pânico.

O Brasil ainda não possui uma lei federal de segurança, cada estado tem suas legislações, portarias, decretos e Instruções Técnicas (IT), com a finalidade de prever possíveis sinistros e evitar tragédias.

Entretanto, não somente a legislação tem passado por atualizações e mudanças, mas estudos, tecnologias e a aplicação de materiais de engenharia têm sido desenvolvidos para uma maior proteção e segurança.

Como exemplo têm-se os retardantes de chama à base de fósforo, nitrogênio, silício e halogenados, porém, questionáveis quanto ao risco ao meio ambiente e à saúde, principalmente pela toxicidade destes últimos (PIERONI, 2017).

Retardantes de chamas contém substâncias químicas que dificultam a ignição e a propagação do fogo, minimizando a emissão de fumaça.

Neste contexto, pesquisas com materiais alternativos vêm crescendo nos últimos anos. Fontes renováveis e naturais, como a lignina, têm ganhado destaque em estudos, como aditivo aos materiais já tradicionalmente empregados, dada a abundância na natureza, caráter renovável, resistência à degradação térmica e baixo custo.

Assim, tornam-se necessários estudos sobre o potencial retardante de chamas da lignina a fim de favorecer o desenvolvimento de novos materiais, dificultando e/ou impedindo a propagação de chamas em um material durante a reação de queima.

O presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento sistemático acerca da lignina como retardante de chamas, a partir de uma pesquisa de dados qualitativa, com os principais materiais utilizados e os resultados e evidências científicas obtidas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fogo e incêndio

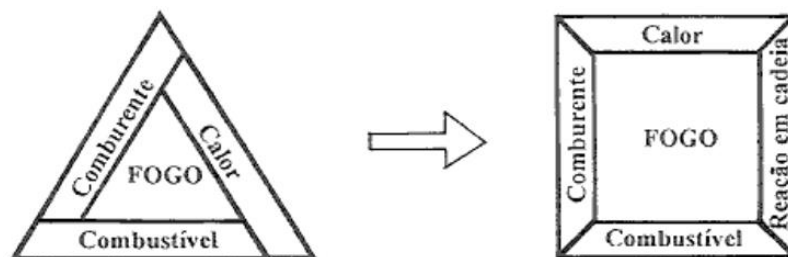
Segundo Dreher (2004) “fogo é a consequência de uma reação química denominada combustão que libera luz e calor”.

Brentano (2007) explica sobre a teoria do triângulo do fogo, que hoje prevê e inclui um quarto elemento, sendo ele, a reação em cadeia.

Para que haja a **ocorrência** do fogo deve haver a presença simultânea de três elementos essenciais: material combustível, comburente (oxigênio) e uma fonte de calor, formando o triângulo do fogo.

Para que haja **propagação** do fogo, deve haver a transferência de calor de molécula para molécula do material combustível, ainda intactas, que entram em combustão sucessivamente, gerando, então, a *reação química em cadeia*. (BRENTANO, 2007, p. 39)

Figura 1 - Triângulo e quadrado do fogo



Fonte: BRENTANO, 2007, p. 39

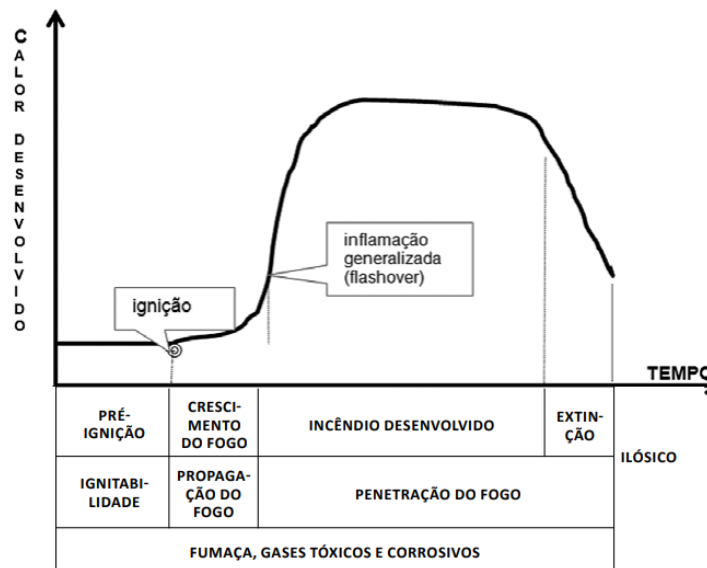
Segundo a NBR 13860 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), “O incêndio é o fogo fora de controle”. Ainda, Gouveia (2006) diz que incêndio é a propagação rápida e violenta do fogo sem controle humano e que gera muitas vezes, perdas humanas, materiais e danos ambientais.

O incêndio produz calor, fumaça e chama e suas fases podem ser explicadas por três etapas distintas, como mostra a Figura 2 (SEITO, 2008).

A curva possui três fases distintas: a primeira fase é o incêndio incipiente tendo-se um crescimento lento, em geral de duração entre cinco a vinte minutos até a ignição, em que inicia a segunda fase caracterizada pelas chamas que começam a crescer aquecendo o ambiente. O sistema de detecção deve operar na primeira fase e o combate a incêndio e consequente extinção tem grande probabilidade de sucesso. Quando a temperatura do ambiente atinge em torno de 600 °C, todo o ambiente é tomado por gases e vapores

combustíveis desenvolvidos na pirólise dos combustíveis sólidos. Havendo líquidos combustíveis, eles irão contribuir com seus vapores, ocorrerá a inflamação generalizada (flashover) e o ambiente será tomado por grandes labaredas. Caso o incêndio seja combatido antes dessa fase (por exemplo, por chuveiros automáticos) haverá grande probabilidade de sucesso na sua extinção. A terceira fase é caracterizada pela diminuição gradual da temperatura do ambiente e das chamas, isso ocorre por exaurir o material combustível. (SEITO, 2008, p.66)

Figura 2 - Curva de evolução do incêndio



Fonte: SEITO, 2008, p. 66

O incêndio pode se propagar por condução pelo próprio contato da chama em outros materiais combustíveis. Através de convecção, quando o ar quente sobe e leva fumaça e gases que aquecem regiões acima do incêndio, sendo assim a tendência do incêndio é subir. Por fim, pode ocorrer a propagação por radiação, ou seja, transmissão de calor através de ondas, através do ar e pode promover a ignição de objetos afastados das chamas.

Para evitar a ocorrência de incêndios, segundo Brentano (2007), é preciso ter controle sobre esses 3 elementos, ainda que o comportamento do fogo seja complexo e sua propagação seja imprevisível.

Para a prevenção de incêndios quando se trata de um uma habitação, tem-se a proteção passiva, que são medidas incorporadas à própria edificação como paredes de compartimentação. O objetivo é evitar a propagação do fogo e permitir a evacuação das pessoas em caso de incêndio. (Rodrigues, 2023)

Há também a proteção ativa, que atua com o incêndio já iniciado. São empregados dispositivos como hidrantes, extintores de incêndio, alarmes, chuveiros automáticos e outros a fim de apagar o foco do incêndio. (Rodrigues, 2023)

2.2 Legislação e medidas de segurança contra incêndio e pânico

O Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) é responsável por fiscalizar o cumprimento das normas de segurança contra incêndio e pânico em edificações e espaços de uso coletivo. Para tanto, dispõe de portarias, decretos e Instruções Técnicas (IT) que devem ser seguidas para a prevenção de sinistros.

As IT - 05 e IT - 06 possuem um importante parâmetro aplicado à elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações que é o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF). Dessa maneira, tem por finalidade estabelecer condições a serem atendidas em situações de incêndio para que não haja colapso estrutural pelo tempo exigido pelo regulamento.

Segundo Hipólito (2013) a utilização de materiais poliméricos são cada vez mais solicitados na construção civil. Como espuma de poliuretano (PU) e poli cloreto de vinila (PVC), o aumento do risco de incêndio na presença desses materiais, torna necessário a incorporação de uma substância capaz de gerar resistência ao fogo.

No entanto, as leis brasileiras que dispõem de requisitos necessários para aprovação de uma substância anti-chama, quando comparada às leis e normas internacionais, se encontram em fase inicial.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) são órgãos brasileiros relacionados à publicação de normas referentes à inflamabilidade de polímeros.

Países da Europa, o Japão e os Estados Unidos possuem normativas importantes que são seguidas por vários países. Estas descrevem instruções e metodologias de testes que têm a finalidade de padronizar níveis de inflamabilidade dos materiais plásticos, obtendo valores como o tempo de combustão, tempo de extinção da combustão são descritas abaixo.

A ASTM D635 (ASTM D635, 2022) - Método de teste padrão para taxa de queima e/ou extensão e tempo de queima de plásticos em posição horizontal, descreve a metodologia do teste que permite obter informações como a taxa de queima de um material polimérico.

Também há a certificação UL 94, desenvolvida pelo Underwriters Laboratories que tem finalidade de padronizar os níveis de inflamabilidade dos materiais plásticos. A ISO 5660-1

(ISO 5660-1, 2015) é uma importante norma que especifica métodos para o ensaio do cone calorímetro que determinam a taxa de liberação de calor, taxa dinâmica de produção de fumaça e taxa de perda de massa.

2.3 Resistência a fogo

Segundo Gouveia (2006), “diz-se que um elemento construtivo tem resistência ao fogo quando este possui estanqueidade, isolamento e estabilidade de forma e posição, o que em geral, depende de sua composição e resistência mecânica”

A estanqueidade é a propriedade que o elemento construtivo deve ter de não liberar gases quentes e chamas para fora do compartimento. O isolamento é a capacidade do elemento construtivo resistir ao calor e impedir a transmitância para os cômodos vizinhos. E a estabilidade de forma e posição é quando um elemento construtivo deve se manter sem deformações excessivas em uma situação de incêndio (GOUVEIA, 2006).

Em relação aos polímeros, Kashiwaghi et al. (2005) diz que esses materiais são combustíveis em determinadas condições.

[...] a grande maioria dos polímeros pode facilmente pegar fogo, e, além disso, manter a propagação de chamas com liberação de gases tóxicos e também fumaça. Para contornar tal característica, tem-se dado ênfase ao desenvolvimento de polímeros com retardantes de chama. (CAVANI, 2008)

Para reduzir a inflamabilidade de polímeros, Gallo e Agnelli (1998) explicam que pode-se utilizar agentes retardantes de chama reativos, que é a modificação química do material, agentes retardantes aditivos que consiste na incorporação física de determinadas substâncias durante a etapa de processamento dos polímeros. Há também a aplicação de revestimentos antichama aplicação como na produção de materiais como tintas e correias e a combinação de vários métodos destes métodos.

2.4 Retardantes de chama

Segundo Gallo e Agnelli (1998) “um retardante de chama deve inibir ou suprimir o processo de combustão.” Ou seja, retardante de chama tem a finalidade de limitar, ou até mesmo extinguir o processo de combustão, diminuindo a velocidade de queima e a liberação de fumaça.

Os retardantes de chama são substâncias químicas que possuem a ação de retardar a ignição, diminuir a velocidade de queima e minimizar a emissão de

fumaça dos materiais aos quais são incorporados. Eles são aplicados para reduzir a inflamabilidade intrínseca dos polímeros, aumentando sua resistência à combustão. Ou seja, o uso do retardante de chama torna a propagação do fogo mais lenta, proporcionando um dos maiores benefícios do uso desse tipo de produto: salvar vidas. (ABICHAMA, 2023)

Os retardantes de chamas podem atuar tanto fisicamente, quanto quimicamente e em ambas as situações nas fases sólida, líquida e gasosa. A ação física se dá por resfriamento, abaixando as temperaturas requeridas para a pirólise, por formação de camada protetora, que isola a fase condensada do substrato combustível da fase gasosa e por diluição, onde gases inertes diluem os combustíveis e aumentam o ponto de fulgor do material (GALLO, AGNELLI, 1998).

Segundo Nichetti (2010), o ponto de fulgor é definido como a menor temperatura na qual o produto gera uma grande quantidade de vapores que se inflamam quando se dá a aplicação de uma chama, em condições controladas. Ou seja, quanto menor o ponto de fulgor, maiores os riscos de incêndio.

Seguindo para a ação química, ela acontece por reações de fase gasosa, quando o retardante de chamas interrompe a ação dos radicais livres no processo de combustão do material, causando resfriamento total do sistema. Ainda pode ocorrer reações de fase sólida de duas formas, a primeira é quando o retardante acelera o processo de fragmentação do polímero e por falta de combustível a chama é reduzida, ou extinta, a segunda maneira é quando o retardante de chamas forma uma camada de carbono na superfície atuando como protetor (GALLO, AGNELLI, 1998).

2.5 Materiais lignocelulósicos

A lignina é um dos três principais constituintes de um vegetal. É o segundo material natural renovável mais abundante na Terra, ficando atrás apenas da celulose, sendo que as indústrias de celulose geram uma grande quantidade de resíduos contendo lignina todos os anos (LIANG, 2021).

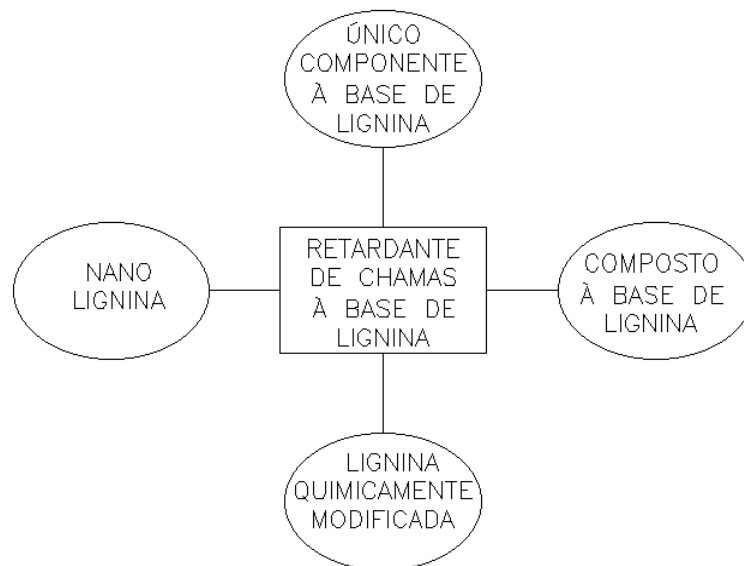
[...] a natureza altamente aromática das estruturas da lignina permite altos níveis de formação de carvão após a combustão. Por esta razão, o uso de lignina como FR (retardante de chama) de base biológica e aditivo antioxidante para polímeros sintéticos tem sido investigado desde o início dos anos 2000. Além da formação de carvão, sua atividade antioxidante pode ser atribuída à sua alta reatividade aos radicais livres. (HOBBS, 2019)

Antioxidantes são substâncias que possuem a capacidade de inibir ou atrasar a oxidação. E dessa forma, segundo o SINDBOMBEIROS/DF (Sindicato dos Bombeiros do Distrito Federal) diz-se que combustão é um processo de oxidação rápida.

Segundo Xiao et al. (2020), os retardantes de chamas que têm a lignina em sua principal composição podem ser utilizados de quatro diferentes formas, como mostra a Figura 2. A lignina pode ser empregada sozinha como um retardante de chamas, mas sua eficiência é reduzida quando se comparada a outros materiais, uma vez que funciona apenas como concentração de carbono.

Seguindo essa lógica, a estrutura da lignina pode ser modificada para obter características com alta eficiência. Em geral, são utilizados elementos como nitrogênio, fósforo e elementos metálicos (HUANG, 2019).

Figura 3 - Tipos de retardantes à base de lignina



Fonte: Da autora (2023).

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, uma pesquisa de dados qualitativa foi realizada. A partir de bases nacionais e internacionais, foram feitas revisões acerca do potencial da lignina como retardante de chamas, buscando-se informações como os principais materiais utilizados e os resultados e evidências científicas obtidas.

As pesquisas de artigos, relatórios técnicos, teses, dissertações, monografias e outros trabalhos científicos se deram em bases de dados como o Google Scholar, MDPI, ScienceDirect, e Researchgate, com publicações revisadas e de alto impacto.

Os critérios de seleção e inclusão de fontes partiram de pesquisas e investigações recentes sobre o tema, com palavras-chave relacionadas a incêndio, resistência a fogo e propagação de chamas, e trabalhos originais e inéditos a partir do ano de 2000, preferencialmente em inglês.

Aspectos básicos de legislação de segurança contra incêndio e pânico também foram adotados, como às disposições das Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros, no que tange a tempos requeridos de resistência a fogo.

De forma descritiva, os dados foram tabulados, destacando-se possíveis fragilidades associadas às pesquisas. Foi realizada uma síntese explicativa, para fácil visualização e entendimento, em ordem cronológica de publicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com base na investigação de trabalhos sobre o uso de lignina como retardante de chamas (materiais e efeitos) estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Potencial retardante de chamas da lignina.

Materiais utilizados	Efeitos/Resultados	Referência
PPE - 30% Lig modificada com N e P	PHRR - 70% (redução) THR - 70% (redução)	Song (2012)
PU - 30% de Lig tratada com cloreto de fosforilo e etilenoglicol	PHRR - 70% (redução) LOI - 20% (aumento)	Hu et al. (2013)
PA11 - PA ₈₀ -LL ₁₀ AIP ₁₀ Lig industrial lignosulfonato + retardadores de chamas fosfinato	PHRR - 74% (redução)	Mandlekar et al. (2019)
Lig-F/EP-lig modificada por grupos funcionais contendo N e P	PHRR - 45% (redução) Resíduos - 41% (aumento) LOI - 50% (aumento)	Dai et al. (2020)
F-lig@APP20/EP - polifosfato de amônio (APP), 4,4-diaminodifenilmetano (DDM), melamina (MEL), dimetilformamida (DMF) e éter dietílico e etanol, contendo P e N	Resíduos - 41% (aumento) LOI - 36% (aumento)	Liang et al. (2020)
PLA/10TL2 - monômero contendo fósforo	PHRR - 25% (redução) LOI - 10% (aumento)	Yang et al. (2021)
10%DOPO+KH550 - lignina tripla de silício, fósforo e nitrogênio	PHRR - 25% (redução) LOI - 5% (aumento)	Li et al. (2023)
S3L3PA0.5 - alginato de sódio (SA), lignossulfonato de sódio (LS) e ácido fítico (PA)	PHRR - 25% (redução) Resíduos - 25% (aumento) LOI - 30% (aumento)	Cen et al. (2023)
EP/Al-lignina - lignina alcalina	T_i - 70% (redução) Resíduos - 95% (aumento)	Yao et al. (2023)

Fonte: Da autora (2023).

Ao analisar os dados da Tabela 1, vale ressaltar os estudos feitos por Yao et al. (2023),

Hu et al. (2013) e Song (2012), uma vez que mostram eficiência excelente nas propriedades de inflamabilidade dos polímeros com a adição de retardante de chama à base de lignina. A adição de lignina alcalina em resina epóxi aumentou em quase 100% os resíduos de carbono em relação à resina epóxi pura.

Em relação à taxa de liberação de calor, Song (2012), Hu et al. (2013) e Mandlekar et al. (2019) alcançaram resultados com redução de 70% em polipropileno etileno, poliuretano e poliamida 11 respectivamente. Observando o Índice Limite de Oxigênio (LOI), os melhores resultados foram obtidos por Dai et al. (2020) e Liang et al. (2020), com 50% e 36% de aumento respectivamente.

Um estudo realizado por Song (2012), utilizou a lignina modificada com substâncias que continham nitrogênio e fósforo, a fim de obter resultados de melhoria em propriedades intumescentes de polipropileno-etileno.

Na Tabela 2, é possível analisar os resultados obtidos com a incorporação de diferentes porcentagens mássicas de lignina modificada.

Houve um aumento na temperatura inicial e temperatura máxima de decomposição, que são relacionados a uma maior formação de carvão. O tempo de ignição, por sua vez, teve uma redução de aproximadamente 10 segundos na incorporação de 20 e 30% da espuma de lignina.

Por fim, observamos a queda de cerca de 70% na taxa de liberação de calor (PHRR), que mede a potência da combustão, ou seja, a quantidade de calor liberado em uma unidade de tempo. E 70% a menos na taxa de liberação total de calor (THR), que representa a soma total de calor liberado na queima.

Tabela 2 – Propriedades de polipropileno-etileno

PROPRIEDADES DE POLIPROPILENO-ETILENO (PPE) COM LIGNINA MODIFICADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS						
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)	t_{ign}(s)	PHRR (kW/m^2)	THR (MJ)
PPE puro	324	418	0	49	1350	87,3
20%	325	479	12	38	380	74,2
30%	361	483	12	39	360	69,7

Fonte: Da autora (2023).

Outro estudo realizado por Hu et al. (2013), incorporou lignina tratada com cloreto de fosforila e etilenoglicol em espuma de poliuretano (PU) para comparar suas propriedades quando são adicionados diferentes porcentagens da lignina modificada à sua composição.

Como exposto na Tabela 3, a temperatura de decomposição inicial e a porcentagem de carvão tiveram considerável aumento à medida que também aumentava a adição de lignina. A taxa de liberação de calor teve redução drástica devido a formação de carvão protetor.

Finalizando, o índice de limite de oxigênio que representa a facilidade com a qual os materiais poliméricos entram em ignição teve aumento com o aumento da incorporação de lignina, ou seja, quanto maior o LOI, maior a resistência à ignição do polímero.

Tabela 3 – Propriedades de poliuretano

PROPRIEDADES DE POLIURETANO (PU) COM ESPUMA DE LIGNINA MODIFICADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS				
Materiais utilizados	T_i (°C)	Resíduos (%)	PHRR (kW/m^2)	LOI (%)
PU Puro	250	0	401	20
10%	278	28,1	229	23
20%	285	29,2	193	23,5
30%	289	42,7	165	24,5

Fonte: Da autora (2023).

Testes de retardantes de chamas à base de lignina industrializada foram feitos por Mandlekar et al. (2019) em poliamida 11. Uma das características da poliamida 11 (PA11) é o alto ponto de fusão menor permeabilidade de combustível e gás.

Utilizou-se a lignina industrial lignosulfonato (LL) e lignina kraft (DL) combinadas em diferentes porcentagens com retardadores de chamas fosfinato (ZnP e AIP) em PA11. A preparação foi através de extrusão por fusão e a análise de dados feita por termogravimetria, propagação vertical de chamas UL 94 e calorimetria de cone.

Constatou-se, na Tabela 4, que a adição da lignina industrializada aumentou a estabilidade térmica de PA11 e também produziu um resíduo de carvão estável. Houve excelente redução de PHRR em PA₈₀-LL₁₀AIP₁₀, teve queda de 74% em relação à PA11.

Tabela 4 – Propriedades da poliamida 11

PROPRIEDADES DA POLIAMIDA 11 (PA11) COM LIGNINA INDUSTRIALIZADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS					
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)	PHRR (kW/m^2)	Redução (%)
PA11	396	423	-	884	-
PA ₈₀ -LL ₁₀ Zn ₁₀	326	465	8,6	315	64
PA ₈₀ -LL ₁₀ AIP ₁₀	330	445	8,3	230	74
PA ₈₀ -DL ₁₀ ZnP ₁₀	339	453	6,3	500	43
PA ₈₀ -DL ₁₀ AIP ₁₀	313	457	6,6	320	64

Fonte: Da autora (2023).

Dai et al. (2020), desenvolveram retardantes de chamas à base de lignina com propriedades excelentes em supressão de fumaça e resíduos de carvão. Com os testes das ligninas modificadas por grupos funcionais contendo N e P, concluiu-se que a Lig - F foi a melhor em comparação às ligninas Lig - M e Lig - P.

Como observa-se na Tabela 5, a Lig - F se mostrou mais estável termicamente, embora a Lig - M apresentou maior capacidade de carbonização com aumento de 41,6% de resíduos de carbono. Houve considerável redução na taxa de liberação de calor em relação à resina epóxi pura, cerca de 45% de queda na Lig - F e cerca de 30% nas Lig - P e Lig - M.

Tabela 5 – Propriedades de resina epóxi

PROPRIEDADES DA RESINA EPÓXI (EP) COM LIGNINA MODIFICADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS					
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)	PHRR (kW/m^2)	LOI (%)
EP puro	384	389	14,8	1336,7	23,3
Lig-P/EP	383	392	16,5	996,6	24,7
Lig-M/EP	372	382	18,2	963,4	31,6
Lig-F/EP	354	359	20,6	714,4	34,3

Fonte: Da autora (2023).

Com o intuito de melhorar as propriedades térmicas da resina epóxi (EP), Liang et al. (2020) testaram a lignina alcalina (Al-lignina) e amostras de lignina modificadas por polifosfato de amônio (APP), 4,4-diaminodifenilmetano (DDM), melamina (MEL), dimetilformamida (DMF) e éter dietílico e etanol, contendo P e N.

Os valores representados na Tabela 6, demonstram que a taxa de resíduos de carvão da F-lig@APP20/EP aumentou em quase 50% quando se comparado à resina epóxi pura. Outro valor impactante é o Índice Limite de Oxigênio que teve aumento de cerca de 36% também em relação ao EP puro. Ou seja, maior quantidade de resíduos e menor temperatura de decomposição significam maior estabilidade térmica.

Tabela 6 – Propriedades de resina epóxi

PROPRIEDADES DA RESINA EPÓXI (EP) COM LIGNINA MODIFICADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS				
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)	LOI (%)
EP puro	333	405	17,2	26,7
Al-lignina20/EP	340	401	21,5	-
F-lig@APP20/EP	325	382	32,5	36,1

Fonte: Da autora (2023).

Yang et al. (2021) obteve um bom resultado em pesquisas sobre a utilização da lignina modificada por um monômero contendo fósforo (TP) como retardante de chamas em polilactídeos (PLA), como mostra a Tabela 7.

As diferenças ao incorporar o retardante de chamas são mais perceptíveis na taxa de liberação de calor com a incorporação de 10% de lignina pura ao PLA, que foi reduzida em cerca de 25% quando se comparado ao PLA puro.

Seguindo essa lógica, um PHRR menor está ligado à decomposição inicial precoce da lignina, o que propicia uma melhora também na taxa de liberação de calor. O LOI teve aumento à medida que a incorporação de TP-g-lignina aumentava em proporção, já a lignina pura adicionada não influenciou na resistência à combustão.

Tabela 7 – Propriedades de polilactídeos

PROPRIEDADES DE POLILACTÍDEOS UTILIZANDO LIGNINA COMO RETARDANTE DE CHAMAS				
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	PHRR (kW/m²)	LOI (%)
PLA	339	372	417	20,1
PLA/10lig	322	365	304	20,2
PLA/10TL2	263	372	438	22,5
PLA/10TL4	242	367	547	22,5
PLA/10TL8	263	372	522	26,6

Fonte: Da autora (2023)

Li et al. (2023) fizeram estudos utilizando a lignina tripla de silício, fósforo e nitrogênio como base de um retardante de chamas em borracha de estireno butadieno (SBR), que por sua vez é altamente inflamável e é usada em correias transportadoras na indústria de mineração de carvão e em materiais decorativos.

Na análise da Tabela 8, nota-se diminuição no PHRR, que mede a potência da combustão, cerca de 25% de queda na composição de 10%DOPO+KH550. Enquanto 20%LKD apresentou o maior valor de LOI.

Tabela 8 – Propriedades da borracha de estireno butadieno

PROPRIEDADES BORRACHA DE ESTIRENO BUTADIENO (SBR) COM LIGNINA MODIFICADA COMO RETARDANTE DE CHAMAS			
Materiais utilizados	PHRR (kW/m²)	THR (MJ)	LOI (%)
SBR puro	1760,2	95	27
20% Lignina	1889,5	93	27,5
10%DOPO+KH550	1299,1	96	28
20%LKD	1423,5	91	30,5

Fonte: Da autora (2023).

Comprovando ainda o potencial da lignina como retardante de chamas, Cen et al. (2023), incluiu lignina na fabricação de aerogéis e concluiu-se que houve drástica supressão de fumaça, produção de resíduos de carvão e aumento considerável na resistência ao fogo.

Utilizou-se na composição dos aerogéis alginato de sódio (SA), lignossulfonato de sódio (LS) e ácido fítico (PA). A Tabela 9, mostra que as taxas de LOI tiveram maiores valores em amostras com composição de ácido fítico (PA), assim como em resíduos de carvão. Houve diminuição na taxa máxima de liberação de calor, tendo como o melhor resultado a amostra S3L3PA0.5.

Tabela 9 – Propriedades de aerogéis

PROPRIEDADES DE AEROGÉIS UTILIZANDO LIGNINA COMO RETARDANTE DE CHAMAS					
Materiais utilizados	T_i (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)	PHRR (kW/m^2)	LOI (%)
S3	87	242	37,2	100,4	30
S3L3	101,8	246,8	44,2	78,2	34,2
S3PA0.5	72	229,4	42	96,4	32,4
S3L3PA0.5	111,4	283,6	46,7	76,4	38,8

Fonte: Da autora (2023).

Estudos mais recentes feitos por Yao et al. (2023), descreve a preparação de um retardador de chamas expansível tendo como base a lignina enxertada com melamina e 9,10-dihidro-9-oxa-10-fosfafenantreno-10-óxido (DOPO), através da reação de Mannich que consiste na preparação de compostos aminocarbonilados.

Dessa forma, através do crescimento de uma estrutura metal-orgânica, elementos como o fósforo (P) e nitrogênio (N), combinada com a resina epóxi, obteve-se o composto com F-lignina@HKUST-1, sendo ele o retardador criado.

Pela análise termogravimétrica, Tabela 10, que acompanha a variação da massa da amostra em função da temperatura, mostra que houve diminuição na temperatura inicial de decomposição, principalmente na amostra modificada com lignina alcalina. Quanto aos resíduos de carvão, fica claro que a adição do retardante de chamas à base de lignina propicia a produção de carbono nos polímeros de resina epóxi.

Tabela 10 – Propriedades da resina epóxi

PROPRIEDADES DA RESINA EPÓXI (EP) COM RETARDANTE DE CHAMAS À BASE DE LIGNINA			
Materiais utilizados	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Resíduos (%)
EP Puro	333,7	405,3	16,21
Al-lignina	105,5	333,3	41,57
15%F-lignina@HKUST-1	334,1	360,7	20,14

Fonte: Da autora (2023).

5 CONCLUSÃO

Com base nos levantamentos e resultados coletados, dados evidenciam o potencial de utilização da lignina como retardante de chama.

É evidente que a adição de lignina como retardante aumenta os resíduos de carvão gerados ao fim da combustão, além de diminuir a taxa de liberação de calor e aumentar o índice limite de oxigênio.

Os dados de supressão de fumaça se mostraram muito promissores nos estudos realizados, visto que muitos incêndios liberam fumaça e gases tóxicos. Por exemplo, Song (2012), Hu et al. (2013) e Mandlekar et al. (2019) alcançaram resultados com redução de 70% na taxa de liberação de calor dos polímeros.

Os resíduos de carvão gerados após a combustão indicaram um aumento de 95% nos estudos de Yao et al. (2023) e 46% de resíduos totais nos estudos de Hu et al. (2013).

Para próximos trabalhos, uma sugestão é aprofundar sobre novas tecnologias que possibilitem melhores resultados para o retardamento de chamas.

Vale ressaltar que a modificação da lignina com compostos químicos aumenta ainda mais o retardamento de chamas do material.

Dessa forma, o estudo e incorporação de substâncias lignocelulósicas modificadas podem resultar em descobertas pioneiras no campo das Engenharias, o que evita catástrofes e abre um leque para novas indústrias alternativas às de compostos já existentes.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13860**: glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BERGHAUS, R. O.; SARKER, P. K. **Lignin-Based Carbon Materials for Energy Storage Applications**. Green Chemistry, 2021.

BERNARDO, André. **Inferno no circo: o dia em que o Brasil assistiu ao pior incêndio de sua história**, 04 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/c89y43gvdl4o>>. Acesso em: 21 set. 2023.

BRENTANO, T. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. 3.ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

BRUM, Gabriel. **Boate Kiss: dez anos depois da tragédia, ninguém foi responsabilizado. Familiares e vítimas da tragédia ainda aguardam desfecho judicial**, 26 jan. 2023. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-01/boate-kiss-dez-anos-depois-da-tragedia-ninguem-foi-responsabilizado>>. Acesso em: 21 set. 2023.

CEN, Q. et al. **Full bio-based aerogel incorporating lignin for excellent flame retardancy, mechanical resistance, and thermal insulation**. ACS sustainable chemistry & engineering, v. 11, n. 11, p. 4473–4484, 2023.

CONTRAN nº 498 de 29 de julho de 2014- Determinação das características de queima de materiais para revestimentos internos dos veículos automotores.

COSTA, Anna Gabriela. **Relembre grandes incêndios que já ocorreram no centro de São Paulo**, 13 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/relembre-grandes-incendios-que-ja-ocorreram-no-centro-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 21 set. 2023.

DAI, P. et al. **Highly efficient, environmentally friendly lignin-based flame retardant used in epoxy resin**. ACS omega, v. 5, n. 49, p. 32084–32093, 2020.

DA, I.HIPÓLITO, S.; DA, R. **POLÍMEROS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/5518429.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

DREHER, Mary A. **Higiene e Segurança do Trabalho**. Tubarão, 2004.

GALLO, J.; AGNELLI, J. - "**Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio**". Polímeros: Ciência e Tecnologia. 1998.

GOUVEIA, A. M. C. **Análise de Risco de Incêndio em Sítios Históricos**. IPHAN / Programa Monumenta. Brasília, 2006.

GOWLETT, J. A. J. **The discovery of fire by humans: a long and convoluted process**. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, v. 371, n. 1696, p. 20150164, 2016.

HOBBS, C.E. **Recent Advances in Bio-Based Flame Retardant Additives for Synthetic Polymeric Materials**. *Polymers* 2019, 11, 224. <https://doi.org/10.3390/polym11020224>.

HUANG C, He J, Liang C, Tang S, Yong Q (2019) *J Engenheiro Florestal* 4(1):17–26.

ISO 5660-1. **Reaction-to-fire tests—heat release, smoke production and mass loss rate—part 1: heat release rate (cone calorimeter method)**, 2015.

KASHIWAGI, T. et al., **Flammability Properties of Polymer Nanocomposites with Single Walled Carbon Nanotubes: Effects of Nanotube Dispersion and Concentration**. *Polymer* 46, pp. 471-481, 2005.

LEI Nº 13.425, DE 30 DE MARÇO DE 2017. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113425.htm>. Acesso em: 14 dez. 2023.

LIANG, Dingxiang et al. **Preparation of a novel lignin-based flame retardant for epoxy resin**. *Materials Chemistry and Physics*, [S. l.], v. 259, p. 124101, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124101>.

LIANG, X. et al. **Thermal kinetics of a lignin-based flame retardant**. *Polymers*, v. 12, n. 9, p. 2123, 2020.

LI, J. et al. **Triple silicon, phosphorous, and nitrogen-grafted lignin-based flame retardant and its vulcanization promotion for styrene butadiene rubber**. *ACS omega*, v. 8, n. 24, p. 21549–21558, 2023.

MAÇÃIRA, F, Elaine. et al. **POLÍMEROS EM INCÊNDIOS: EMISSÕES E TRATAMENTO EMPÍRICO DA INTOXICAÇÃO POR CIANETO**. Disponível em: https://www.abho.org.br/wp-content/uploads/2014/02/artigo_polimerosem incendios.pdf. Acesso em: 25 out. 2023.

MANDLEKAR, N. et al. **Valorization of industrial lignin as biobased carbon source in fire retardant system for polyamide 11 blends**. *Polymers*, v. 11, n. 1, p. 180, 2019.

MINAS GERAIS (Estado). Corpo de Bombeiros Militar. IT 05 - **Separação entre Edificações**. 1.ed. Belo Horizonte: Diretoria de Atividades Técnicas, 2022. Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/storage/files/shares/intrucoestecnicas/IT_05_1a_Ed_portaria_69_emenda%20_6.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2023.

MINAS GERAIS (Estado). Corpo de Bombeiros Militar. IT 06 - **Segurança Estrutural das Edificações**. 1.ed. Belo Horizonte: Diretoria de Atividades Técnicas, 2022. Disponível em: <<https://www.bombeiros.mg>

NICHETTI, T. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29717/000777635.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

NIST - US National Institute of Standards and Technology, **Performance of Home Smoke Alarms, Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings**, Disponível em:

<http://www.nist.gov/el/fire_protection/buildings/upload/NIST_TN_1455-1_Feb2008>. Acesso em: 18 nov. 2023.

PIERONI, M. C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. **Retardantes de chama bromados: uma revisão**. Química nova, 2016.

RABELLO, Marcelo. **Aditivção de polímeros** [Livro]. - São Paulo - Brasil : Artliber, 2000. - pp. 117 - 142.

RODRIGUES, C et al. **ABNT NBR 15575 Edificações Habitacionais -Desempenho**. Disponível em: <https://cottaeng.com.br/download/palestras/14_NORMA_DESEMPENHO_15575_COTTA_MESTRADO_IPT.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2023.

SEITO, Alexandre Ltiu et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/portalcbb/_publicacoes/books/a_seguranca_contra_incendio_no_brasil.pdf. Acesso em: 11 nov. 2023.

CAPÍTULO 1 -TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO. Disponível em: <<https://www.sindbombeirosdf.org/portal/pdf/1%20-%20Termodin%C3%A2mica%20da%20Combust%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

XING, W. et al. **Functionalized lignin for halogen-free flame retardant rigid polyurethane foam: preparation, thermal stability, fire performance and mechanical properties**. Journal of polymer research, v. 20, n. 9, 2013.

Xiao M, Zhou X, Zhang J, Ren Y (2020) J Texto Res 41: 182–18

YANG, H. et al. **Molecularly engineered lignin-derived additives enable fire-retardant, UV-shielding, and mechanically strong polylactide biocomposites**. Biomacromolecules, v. 22, n. 4, p. 1432–1444, 2021.

YAO T, Yang R, Sun C, Lin Y, Liu R, Yang H, Chen J, Gu X. **Pyrolysis Kinetics of Lignin-Based Flame Retardants Containing MOFs Structure for Epoxy Resins**. Molecules. 2023 Mar 16;28(6):2699. doi: 10.3390/molecules28062699.

ZHU, H. et al. **Preparação e Caracterização de Espumas de Poliuretano Retardantes de Chama Contendo Lignina Funcionalizada com Fósforo-Nitrogênio**. RSC Av, v. 4, p. 55271–55279, 2014.