

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

PAULA LIBARDI GARBIN

**AVALIAÇÃO DO USO DE ADITIVOS ANTICHAMA HALOGENADOS E NÃO
HALOGENADOS NA FLAMABILIDADE E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER/FIBRA DE VIDRO**

**CAXIAS DO SUL
2020**

PAULA LIBARDI GARBIN

AVALIAÇÃO DO USO DE ADITIVOS ANTICHAMA HALOGENADOS E NÃO HALOGENADOS NA FLAMABILIDADE E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER/FIBRA DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Poletto

**CAXIAS DO SUL
2020**

PAULA LIBARDI GARBIN

AVALIAÇÃO DO USO DE ADITIVOS ANTICHAMA HALOGENADOS E NÃO HALOGENADOS NA FLAMABILIDADE E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER/FIBRA DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Poletto

Banca Examinadora

Prof. Dr. Matheus Poletto

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. M.Sc. Tomás Polidoro

Universidade de Caxias do Sul – UCS

M.Sc. Roberta Motta Neves

Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meus pais Rita e Eduardo pelo incentivo e ajuda, pois sem eles eu não teria chegado até aqui e também a minha irmã Bruna, que mesmo longe por muitos anos sempre se fez presente.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Matheus Poletto, por toda ajuda, empenho, dedicação e paciência comigo, com certeza foi um professor que fez diferença na minha graduação.

A empresa Marcopolo Plásticos pelo espaço cedido para a realização dos testes. A minha supervisora Marina, por conceder meu tempo de trabalho para a realização dos ensaios.

Por fim, mas não menos importante, toda a minha admiração aos meus professores e colegas que estiveram junto a mim nesses 7 anos de graduação, com certeza cada aula, relatório, slides, conversas e risadas não serão esquecidos.

RESUMO

Ao longo dos anos a indústria automobilística se viu na obrigatoriedade de fabricar automóveis feitos a partir de peças poliméricas, com o intuito de diminuir o peso dos mesmos. Porém, as peças feitas de compósitos que possuem em sua composição resina polimérica reforçada com fibras são inflamáveis, ocasionando risco aos usuários. Assim avaliou-se o uso de aditivos halogenados (Tris (2,3–dicloroisopropil) fosfato (D) e Tris (1,3–dicloroisopropil) fosfato (F)) comercialmente conhecidos como Datifire FR-2 e Fyrol FR-2 respectivamente nos teores de 30 % e 50 % em massa e não halogenado (alumina) nos teores de 30 % e 50 % em massa para retardar ou extinguir a queima desses materiais. Os compósitos feitos a partir de *gel coat*, resina poliéster insaturada e fibra de vidro foram obtidos pelo processo de RTM (moldagem por transferência de resina). Para avaliação da viabilidade técnica do uso desses compósitos avaliou-se a viscosidade e o tempo de cura da resina, propriedades mecânicas como, tração, flexão e impacto e também queima vertical. Apesar do aumento da viscosidade ao incorporar os aditivos, não houve dificuldade de injeção do compósito. Em relação ao tempo de cura, constatou-se que com o aditivo não halogenado a resina tem um tempo de cura inferior a aquele observado para os aditivos halogenados. Verificou-se também que o aumento no teor de incorporação de aditivos halogenados a resina aumentou o tempo de cura. Para ambos aditivos houve perdas de resistência mecânicas, porém observa-se que quanto maior o teor de aditivos adicionado, maior é a redução das propriedades mecânicas. Com relação a flamabilidade, os compósitos incorporados com alumina sofrem ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação de chama ao corpo de prova, o que impede que o material possua classificação conforme UL 94. Para os compósitos contendo 30 D e 30 F na primeira aplicação de chama por 10 s, cada corpo de prova sustenta a chama de 10 a 11 s e se apaga, no entanto, na segunda aplicação da chama ocorre a autossustentação da chama o que impede que o mesmo seja classificado na norma UL 94. Já os compósitos contendo 50 D e 50 F obtiveram melhor desempenho, sendo classificados como V1 conforme a norma UL 94. Assim os compósitos com 50 D e 50 F mostraram melhor desempenho em relação a flamabilidade, porém o alto teor utilizado, faz com que as peças utilizadas na área automobilística tenham suas propriedades mecânicas reduzidas. Contudo, o compósito com o aditivo 50 D obteve melhores propriedades mecânicas que o compósito com 50 F. Em suma, melhora-se a o efeito retardante de chama do compósito, o que reflete em segurança para os usuários de veículos coletivos, porém reduz-se a resistência mecânica do material.

Palavras-chave: Polímeros. Compósitos. Flamabilidade. UL 94. Aditivos.

ABSTRACT

Over the years, the automobile industry has found itself in the obligation to manufacture automobiles made from polymeric parts, in order to reduce their weight. However, the parts made of composites that have fiber-reinforced polymeric resin in their composition are flammable, causing risk to users. Thus, the use of halogenated additives (Tris (2,3 – dichlorisopropyl) phosphate (D) and Tris (1,3 – dichlorisopropyl) phosphate (F)), commercially known as Datifire FR-2 and Fyrol FR-2, respectively, was evaluated contents of 30 % and 50 % by mass and non-halogenated (alumina) in the contents of 30% and 50 % by mass to delay or extinguish the burning of these materials. Composites made from gel coat, unsaturated polyester resin and fiberglass were obtained by the RTM process (resin transfer molding). To assess the technical feasibility of using these composites, the viscosity and curing time of the resin were evaluated, mechanical properties such as tension, bending and impact and also vertical burning. Despite the increase in viscosity when incorporating the additives, there was no difficulty in injecting the composite. Regarding the curing time, it was found that with the non-halogenated additive, the resin has a curing time shorter than that observed for halogenated additives. It was also found that the increase in the content of incorporation of halogenated additives to the resin increased the curing time. For both additives there were losses of mechanical strength, however it is observed that the higher the content of additives added, the greater the reduction in mechanical properties. Regarding flammability, composites incorporated with alumina undergo ignition followed by a self-sustained burning in the first flame application to the specimen, which prevents the material from being classified according to UL 94. For composites containing 30 D and 30 F in the first application of flame for 10 s, each specimen supports the flame from 10 to 11 if it goes out, however, in the second application of the flame there is self-sustaining of the flame, which prevents it from being classified in the UL 94 standard. Composites containing 50 D and 50 F obtained better performance, being classified as V1 according to UL 94. Thus, composites with 50 D and 50 F showed better performance in relation to flammability, however the high content used, makes the parts used in the automotive area, their mechanical properties are reduced. However, the composite with the 50 D additive obtained better mechanical properties than the composite with 50 F. In short, it improves the flame retardant effect of the composite, which reflects in safety for users of collective vehicles, however it is reduced the mechanical strength of the material.

Keywords: Polymers. Composites. Flammability. UL 94. Additives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peças frente (a), para choque (a), traseira (b) e teto (b).....	14
Figura 2 - Configuração da orientação das fibras.....	16
Figura 3 - Camadas da manta de fibra de vidro.....	16
Figura 4 - Mecanismo de cura da resina poliéster.....	18
Figura 5 - Fórmula da resina poliéster insaturada ortoftálica.....	19
Figura 6 - Fórmula da resina poliéster insaturada isoftálica.....	19
Figura 7 - Classificação dos compósitos na fase dispersa.....	21
Figura 8 - Características que influenciam nas propriedades dos compósitos: a) concentração; b) tamanho; c) forma; d) distribuição; e) orientação.	22
Figura 9 - Representação do fluxo de resina através de um tecido de fibra vidro.....	23
Figura 10 - Esquema do processamento por RTM.....	23
Figura 11 - Processo de queima.....	25
Figura 12 - Classificação dos materiais em função da LOI.....	28
Figura 13 - Esquema para realização do ensaio de queima vertical.....	28
Figura 14- Esquema para realização de ensaio da queima horizontal.....	30
Figura 15 - Trisbromoneopentílico utilizado como retardante de chama reativo.....	33
Figura 16 - Resistência ao impacto dos compósitos estudados.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos diferentes tipos de resina	18
Quadro 2 - Materiais, fornecedores e características.....	36
Quadro 3 - Aditivos antichama.....	36
Quadro 4 - Tempo de gel, tempo de pico exotérmico e temperatura de pico exotérmico para a resina e para as misturas com os aditivos estudados	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso de polímeros pela indústria automobilística em relação a outros materiais.	13
Tabela 2 - Espessura adequada do laminado em função do tipo da manta	17
Tabela 3 - Classificação para o teste de queima vertical pela norma UL-94	29
Tabela 4 - Viscosidade da resina e das misturas realizadas	40
Tabela 5 - Viscosidade da resina, aditivos halogenados e suas misturas	40
Tabela 6 - Deformação, resistência a flexão e módulo de flexão para as amostras	44
Tabela 7 - Alongamento, resistência a tração e módulo de tração para as amostras.....	45
Tabela 8 - Parâmetros obtidos no ensaio de flamabilidade dos compósitos	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	ÔNIBUS	13
2.2	POLÍMEROS	14
2.3	FIBRAS	15
2.3.1	Mantas	16
2.4	RESINA POLIÉSTER INSATURADA.....	17
2.5	<i>GEL COAT</i>	20
2.7	COMPÓSITOS.....	20
2.8	MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM).....	22
2.9	FLAMABILIDADE	24
2.9.1	Aquecimento	25
2.9.2	Pirólise	25
2.9.3	Ignição	26
2.9.4	Combustão e propagação.....	26
2.9.5	Extinção.....	26
2.10	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA FLAMABILIDADE EM POLÍMEROS	26
2.10.1	Flamabilidade em resinas poliméricas.....	27
2.10.2	Índice limite de oxigênio	27
2.10.3	Ensaio queima vertical	28
2.10.4	Ensaio queima horizontal	29
2.11	ADITIVOS RETARDANTE DE CHAMAS	30
2.11.1	Retardante de chama inorgânico	31
2.11.2	Retardante de chama orgânico não reativo	32
2.11.3	Retardante de chama orgânicos reativos.....	33
2.12	ESTADO DA ARTE	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	MATERIAIS	36
3.2	OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS	36
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA RESINA	38

3.3.1	Viscosidade	38
3.3.2	Tempo de cura	38
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	39
3.4.1	Ensaio mecânicos	39
3.4.2	Ensaio de queima vertical	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	VISCOSIDADE	40
4.2	TEMPO DE CURA	41
4.3	RESISTÊNCIA AO IMPACTO	42
4.4	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	44
4.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	45
4.6	FLAMABILIDADE	47
5	CONCLUSÃO	50
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de vários anos por razões econômicas e tecnológicas a indústria automobilística se viu na obrigatoriedade de trocar materiais tradicionais (aço, alumínio, vidro, etc.), por materiais poliméricos. Devido a crises mundiais do petróleo em 1973 e 1979, onde ocorreram problemas de escassez de combustível e uso incontrolado de fontes não renováveis, preocupações globais acabaram surgindo e impulsionando o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho (HEMAIS, 2003).

De modo geral, os compósitos que possuem em sua composição resina polimérica insaturada reforçada com fibras são inflamáveis, e quando equiparados com materiais tradicionais acima mencionados, tem uma queima mais elevada, e muitas vezes com liberação de fumaça tóxica como dióxido de carbono e monóxido de carbono. Para que o compósito impeça a atuação do calor e a formação da chama, na ocorrência de queima, depende-se muito da característica das fibras, da resina e também da combinação de ambas (RIBEIRO *et al.*, 2013). Para limitar essa queima ou ao menos retardá-la, tem-se dado ênfase ao desenvolvimento de aditivos retardantes de chama que devem ser incorporados junto ao material polimérico. Já existem no mercado cerca de 175 produtos classificados como retardantes de chama. No mundo, em 2011 foram produzidas cerca 1,9 milhões de toneladas de retardantes de chama (CAVANI, 2008; PIERONI *et al.*, 2016).

Muitos países possuem leis específicas que limitam ou proíbem o uso de materiais poliméricos inflamáveis, sejam eles utilizados em aplicações industriais, construções civis ou ainda em meios de transporte. Assim, minimizar a combustibilidade e a flamabilidade de materiais poliméricos e desenvolver materiais à prova de fogo é um problema que deve ser analisado, buscando inovação nas soluções para a segurança de quem usa esse tipo de material (CAVANI, 2008).

Assim esse trabalho tem o intuito de testar aditivos antichama halogenados e não halogenados em peças confeccionadas a partir de compósitos de resina poliéster insaturada ortoftálica/fibra de vidro utilizadas em diferentes modelos de ônibus, para que em caso de incêndio, o aditivo possa retardar a chama, garantindo maior segurança ao usuário desse transporte.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da incorporação de aditivos antichama na flamabilidade e nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster/fibra de vidro utilizados em peças automotivas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o comportamento de retardantes de chama halogenados Tris (2,3–dicloroisopropil fosfato e Tris (1,3–dicloroisopropil) fosfato e não halogenados (alumina) na flamabilidade dos compósitos por meio de testes de queima vertical.

Analisar o efeito da adição dos retardantes de chama nas propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto) dos compósitos desenvolvidos.

Verificar o efeito da incorporação de 30 % e 50 % em massa de retardantes de chama na resina, avaliando efeitos da viscosidade e do tempo de cura da mesma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÔNIBUS

A indústria automotiva tem optado por usar materiais poliméricos devido a sua alta tecnologia e diminuição do peso dos carros, por ser um material mais leve que os tradicionais. Estima-se que cada 10 % de redução em massa de um veículo resulta na economia de 6 a 8 % de combustível. Assim, além de proporcionar mais economia ao consumidor final também poluirá menos o meio ambiente. Outro benefício da diminuição da massa nos ônibus, é que faz com que seja possível ter menor potência nos veículos, o que acarreta em uma redução nos motores, e nas baterias, reduzindo assim, o gasto energético (GUTIÉRREZ *et al.*, 2014).

O estudo realizado pela APME (*Association of Plastic Manufacturers in Europe*) revela que, para 100 quilos de peças poliméricas utilizadas em um veículo, 200 a 300 quilos de outros materiais deixam de ser consumidos. A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens identificadas na utilização de polímeros em ônibus (MATTOS NETO *et al.*, 2015).

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso de polímeros pela indústria automobilística em relação a outros materiais

Vantagens	Desvantagens
Redução do peso	Deterioração por ação térmica e ambiental
Redução da emissão de CO ₂	Flamabilidade
Redução de custos	Baixa resistência ao impacto
Aumento da resistência à corrosão	Deformação permanente elevada
Possibilidade de designs mais modernos	Facilidade de manchas permanentes
Aumento de segurança	Baixa estabilidade dimensional

Fonte: Mattos Neto *et al.* (2015).

Segundo dados da FABUS – Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus só em Janeiro de 2020 foram produzidos no Brasil 1477 ônibus. Sabe-se que todos os ônibus produzidos possuem peças fabricadas a partir de compósitos de poliéster/fibra de vidro. Essas peças representam cerca de 2 % no número total de componentes do ônibus e cerca de 20 % no valor total. As peças vistas na Figura 1(a) e (b) são utilizadas tanto na parte externa (frentes, traseiras e tetos), como na parte interna (escadas e sanitários) (MARCOPOLO, 2020).

Figura 1 - Peças frente (a), para choque (a), traseira (b) e teto (b)



(a)



(b)

Fonte: Marcopolo (2020).

2.2 POLÍMEROS

Os materiais poliméricos vem sendo utilizados desde a antiguidade, porém, apenas polímeros naturais eram usados nessa época. Os processos de polimerização foram desenvolvidos e incorporados somente no início do século XX (ABMACO, 2009).

Nogueira *et al.* (2000) explicam que pode-se obter polímeros de dois modos distintos: polimerização de adição ou polimerização de condensação. Na polimerização por adição é adicionado uma molécula a outra, por meio de ligações insaturadas. A formação da cadeia inicia com um radical livre sendo introduzido, e quando unido a uma molécula de monômero insaturado, cria uma espécie ativa, que por sucessivas reações com outras moléculas, darão origem a uma cadeia polimérica, que atua com uma velocidade muito alta de formação. Por fim, o crescimento da cadeia é interrompido. Essa interrupção, também é chamada de terminação da polimerização e pode acontecer por diversas formas, como: os átomos de hidrogênio são transferidos de uma cadeia em crescimento para outra ou por transferência de cadeia, através da transferência de átomos de hidrogênio ou outro elemento, proveniente do solvente, monômero, iniciador, polímero acabado.

A polimerização por condensação acontece pela formação de ligação entre dois monômeros, cada um contendo dois grupos, fazendo com que a reação ocorra simultaneamente produzindo uma macromolécula. Nessa formação não há diferença de reatividade entre os monômeros dos grupos terminais da cadeia, tendo assim uma evolução uniforme de crescimento, sem as etapas distintas que caracterizam as poliadições (NOGUEIRA *et al.*, 2000).

Os polímeros são classificados em termoplásticos e termorrígidos. Os polímeros termoplásticos são aqueles permitem deformação quando aplicado temperatura, ou seja, podem ser fundidos. Isso acontece devido suas fracas ligações químicas (van der Waals) entre as cadeias. Desse modo, quando o material sofre aquecimento, essas interações são enfraquecidas, promovendo a movimentação das cadeias poliméricas umas em relação às outras. Assim, essa característica faz com que esse polímero possa ser reciclado (ABMACO, 2009).

Já os polímeros termorrígidos são materiais que não amolecem com o aumento da temperatura, ou seja, quando produzidos não podem ser reprocessados. Esses polímeros contêm cadeias conectadas entre si por ligações cruzadas, as quais só serão quebradas com uma quantidade de energia elevada, normalmente ocasionando a degradação ou a queima do polímero. Desse modo, esse material não pode ser reprocessado apenas com temperatura e pressão (ABMACO, 2009).

2.3 FIBRAS

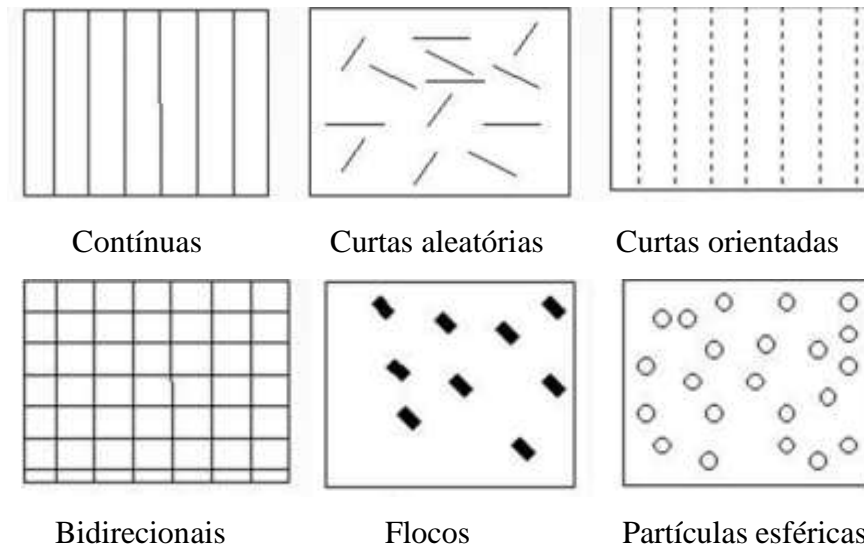
Conforme Callister Jr. e Rethwisch (2020) os compósitos com maior importância no ramo tecnológico, são aqueles onde a fase dispersa está na forma de fibra. Os compósitos reforçados com fibras têm como objetivo o aumento da resistência e/ou rigidez do material.

As fibras de reforços mais utilizadas em compósitos são as de carbono e as de vidro. As fibras de vidro são constituídas por vidro do tipo “E” – um vidro que contém óxidos de silício, boro, alumínio, cálcio e característica alcalina menor que 1% e não absorve água, não sofre dilatação, não alonga e não sofre desintegração na presença de ambientes úmidos. Os modelos de fibras de vidro mais utilizados são: manta, *roving*, *woven roving*, tecidos e manta moldável (BAGGIO, 2005).

Para Dias (2009) a fibra de vidro é um material de reforço com características muito atrativas, tais como: elevada razão resistência/peso, estabilidade dimensional, resistência ao calor, além de apresentar resistência a corrosão e a umidade apresentando também propriedades de isolamento elétrico. Como a fibra pode ser utilizada com praticamente qualquer resina polimérica, a mesma revela-se como sendo um material indicado para conferir as propriedades mecânicas necessárias para reforçar uma matriz polimérica.

Existem diversas configurações em relação à orientação das fibras (Figura 2): podem ser alinhadas em uma só direção, ou ter alinhamento totalmente aleatório, podem ter diversos tamanhos ou formatos. Enquanto as fibras contínuas são alinhadas, as fibras descontínuas geralmente são desalinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas (VENTURA, 2009).

Figura 2 - Configuração da orientação das fibras



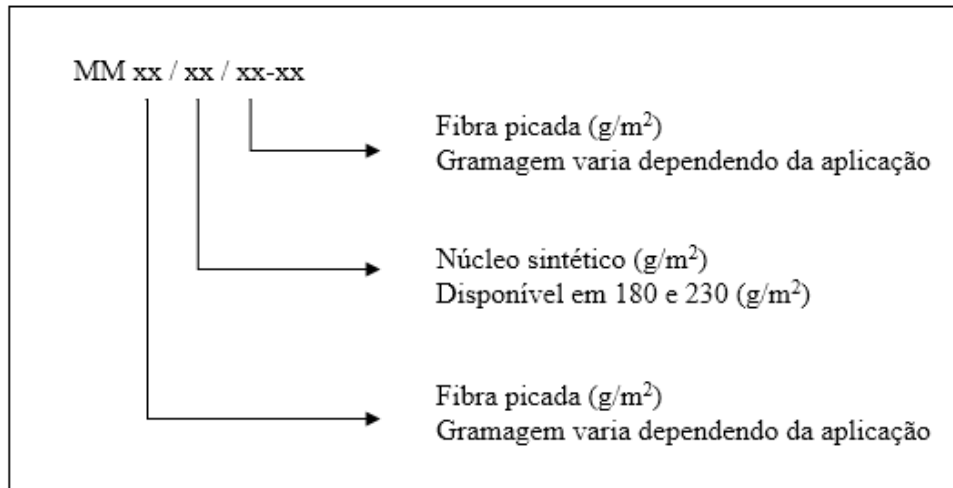
Fonte: Soares (2017).

2.3.1 Mantas

As mantas de fibra de vidro são produzidas a partir de filamentos contínuos, não tecidos, aglutinados com um ligante específico e compatível com resinas poliéster, vinil éster e poliuretano. Elas são normalmente usadas nos processos de moldes fechados como RTM ou injeção. As mais indicadas para o processo de RTM são as mantas 300 g/m², 450 g/m² e 600 g/m² (OWENS CORNING, 2020).

A manta pode ser formada por um núcleo de tecido sintético costurado entre duas camadas de fibra de vidro picada. As camadas de fibra são responsáveis por conferir propriedades mecânicas ao laminado, enquanto o núcleo sintético é responsável por melhorar o fluxo da resina. Por ser moldável e possuir alta fluidez da resina e rápida molhagem em processos como o RTM, ela permite a produção de peças com rapidez de tempo de processamento e excelente qualidade, fazendo-se assim com que se tenha uma alta produtividade (OWENS CORNING, 2020). A Figura 3 ilustra como são compostas as camadas de manta.

Figura 3 - Camadas da manta de fibra de vidro



Fonte: Baggio (2005).

A espessura do laminado varia conforme necessidade de cada material. Na Tabela 2 pode-se observar a configuração de cada manta conforme especificações da Figura 3, seguida da adequada espessura a ser utilizada (OWENS CORNING, 2020).

Tabela 2 - Espessura adequada do laminado em função do tipo da manta

Configuração	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm
MM 200/180/200	■	■				
MM 300/180/300		■	■			
MM 350/230/350		■	■	■		
MM 450/180/450			■	■	■	
MM 450/230/450				■	■	■
MM 600/180/600					■	■
MM 600/230/600						■

Fonte: Owens Corning (2020).

2.4 RESINA POLIÉSTER INSATURADA

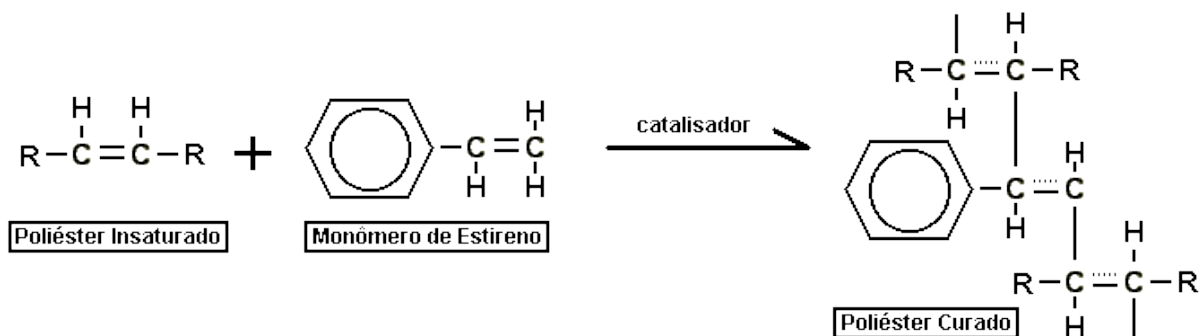
A resina poliéster insaturada também conhecida como UPR (*Unsaturated Polyester Resin*) foi uma das primeiras resinas a ser criada dentre todas as resinas sintéticas, que são hoje a base da indústria de polímeros. Os poliésteres insaturados são formados pela reação de um diálcool (glicol) e um anidrido ou ácido dibásico (diácido), com a liberação de uma molécula de água. Por ser sólida a temperatura ambiente usa-se monômeros para que ocorra o processo de polimerização da mesma (TARGA, *et al.*, 2009).

As resinas poliéster insaturadas são um dos termorrígidos mais amplamente utilizados em aplicações industriais, devido ao seu baixo custo, processabilidade e suas elevadas propriedades mecânicas, principalmente quando reforçadas com fibra de vidro. São utilizadas especialmente em aplicações navais, aviação e na indústria automotiva (REIS, 2016).

A resina pode ser fabricada com rejeitos do poli (etileno tereftalato), PET, normalmente encontradas em garrafas de bebidas que são coletadas, depolimerizadas utilizando etileno glicol, propileno glicol ou neopentilglicol. O produto glicolizado resulta em monômeros que são colocados para reagir com ácidos dibásicos insaturados a fim de formar a resina poliéster insaturada (GORNINSKI, 2002).

O estireno também participa na composição da resina, pois é um diluente insaturado que tem a função de interligar os polímeros e permite que eles sejam processados no estado líquido. As resinas comerciais têm cerca de 30 a 40 % em massa de estireno. As insaturações presentes nos átomos de carbono, do polímero e do estireno, são muito reativas e são facilmente rompidas pela presença de radicais livres. Como observa-se na Figura 4 a ruptura através de adição de um catalisador dá início à reação na cadeia que interliga as moléculas para transformar a resina líquida em uma massa sólida, ou seja, está havendo a cura da resina. O processo da cura de resinas de poliéster insaturado é de fundamental importância para as propriedades do produto final (CAVANI, 2008; SANCHEZ, 1996).

Figura 4 - Mecanismo de cura da resina poliéster



Fonte: Abmaco (2009).

Existem no mercado inúmeros tipos de resinas poliéster insaturada com diferentes características e especificações. O Quadro 1 mostra os distintos tipos de resina e suas principais características, porém as mais utilizadas são a resina ortoftálica e a resina isoftálica (TARGA, *et al.*, 2009).

Quadro 1 - Características dos diferentes tipos de resina

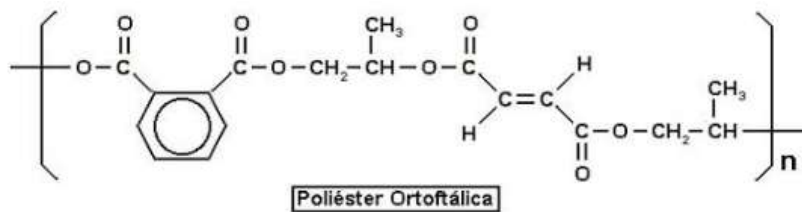
Tipos	Características
Ortoftálica	Resina com menor custo por ser mais comum.
Tereftálica	Possuem resistência física superior a ortoftálica, porém baixa resistência a UV.

Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Bisfenólicas	Melhores características químicas e térmicas.

Fonte: Neves (2006).

A resina poliéster insaturada ortoftálica é amplamente utilizada devido ao seu baixo custo em relação às demais resinas. Na sua composição há ácidos modificadores, o ftálico ou seu anidrido. Devido à dificuldade de conseguir a formação de polímeros de alto peso molecular, suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais resinas. O anidrido ftálico tem tendência de se regenerar por meios dos ésteres do ácido ftálico, o que impulsiona a presença de espécies de baixo peso molecular (NEVES, 2006). A Figura 5 apresenta a estrutura química da resina ortoftálica.

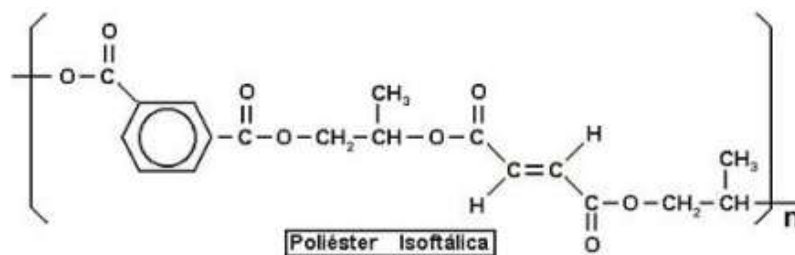
Figura 5 - Fórmula da resina poliéster insaturada ortoftálica.



Fonte: Neves (2006).

Apesar de ter um custo mais elevado a resina isoftálica também é bastante utilizada, pois possui cadeias que dão ao compósito maior resistência mecânica, devido ao fato de absorver melhor os impactos. Isso ocorre pois o ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, não sofrendo desvantagens de regeneração, assim pode-se obter poliéster de elevada massa molar, com cadeias mais longas (NEVES, 2006). A Figura 6 apresenta a estrutura química da resina isoftálica.

Figura 6 - Fórmula da resina poliéster insaturada isoftálica



Fonte: Neves (2006).

2.5 GEL COAT

O *gel coat* é um material polimérico produzido basicamente com resinas de poliéster, tendo como sua principal finalidade dar melhor acabamento em peças de fibra de vidro e criar uma barreira química, melhorando assim a conservação da peça e proporcionando a mesma uma superfície lisa e brilhante (ZIGLIOLI *et al.*, 2016).

Segundo Abmaco (2008) o *gel coat* possui baixos índices de condutividade térmica e elétrica, aliado a sua alta dureza (Barcol). Também tem excelentes características de resistência química e possui alto desempenho frente aos processos de corrosão e intemperismo.

O *gel coat* é formado basicamente por: pigmentos, aditivos e cargas minerais dispersados em resinas éster-vinílicas ou resinas poliéster, variando conforme a necessidade de aplicação do cliente. As etapas de produção seguem a seguinte ordem: dispersão de pigmentos e cargas minerais na resina, aditivação e cor (ZIGLIOLI, *et al.*, 2016).

O *gel coat* não necessita de reforço com fibra de vidro, pois é utilizado apenas como revestimento superficial para partes de compósitos produzidos com resina poliéster. Esse produto não necessita de alta tecnologia de utilização nem apresenta modernos processos de fabricação. Assim, o que garante um produto avançado e de qualidade é a evolução no que diz respeito à formulação, sobretudo na aditivação e pigmentação do produto (ZIGLIOLI, *et al.*, 2016).

A aplicação de *gel coat* demanda alguns cuidados, pois algumas variáveis são difíceis de serem controladas, como a espessura que deve se manter entre 0,6 e 0,8 mm. Se a aplicação do *gel coat* resultar em um espessura muito fina, poderá apresentar defeitos de enrugamento e também prejudicará a estética da peça, pois a fibra de vidro ficará exposta na superfície. O contrário também é prejudicial. Se a espessura da camada de *gel coat* estiver muito grossa, poderá acarretar em trincas e rachaduras, principalmente em locais de maior tensão do laminado (ABMACO, 2008).

2.7 COMPÓSITOS

Segundo *American Society for Testing and Materials* (ASTM D3878-16), compósito é caracterizado como um material constituído de dois ou mais materiais, que devem ser insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil, com o objetivo de obter propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente. Os materiais compósitos são formados por duas fases: matriz e dispersa. Esse material tem o objetivo de proporcionar maior força e rigidez e também aumentar a resistência ao calor, corrosão e condutividade. A fase matriz pode ser um metal, polímero ou cerâmica, os quais conferem

estrutura ao material preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço. A fase dispersa é classificada em três categorias: compósitos particulados, compósitos fibrosos e compósitos estruturais, onde cada um possui suas subdivisões conforme Figura 7 (VENTURA, 2009).

Figura 7 - Classificação dos compósitos na fase dispersa



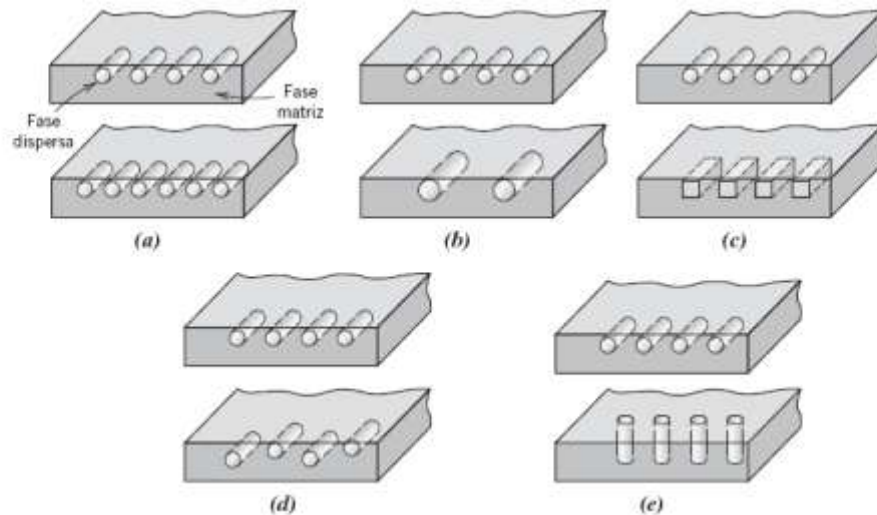
Fonte: Soares (2017).

Os materiais compósitos apresentam propriedades que dependem tanto da fase dispersa quanto da fase matriz. Porém, cada propriedade é influenciada de uma maneira distinta. Enquanto a absorção de energia em um impacto depende da fase matriz, a resistência a tração é dependente da fase dispersa. O compósito, entretanto, é caracterizado pela junção das duas partes, um exemplo, é quando algumas fibras (fase dispersa) se rompem, a deformação elástica da matriz produz forças de cisalhamento que gradualmente fazem os fragmentos de fibra exercerem resistência novamente. Assim, nota-se que, na ausência da matriz, as fibras ao redor teriam de suportar um aumento maior de tensão o que tornaria o material mais frágil (GUTIÉRREZ, 2014).

A melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida em geral, quando a sua distribuição é uniforme e quando usam-se fibras longas, pois assim sua orientação pode ser controlada de forma que o compósito pode ser projetado para antecipar as cargas de ele irá enfrentar. Porém, como observa-se na Figura 8, as propriedades dos compósitos também terão dependência com outras características, como: a geometria da fase

dispersa das partícula, tamanho, distribuição e a orientação das partículas (GUTIÉRREZ, 2014; VENTURA, 2009).

Figura 8 - Características que influenciam nas propriedades dos compósitos: a) concentração; b) tamanho; c) forma; d) distribuição; e) orientação



Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2020).

2.8 MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM)

Devido a elevadas propriedades mecânicas dos materiais compósitos, o RTM vem em uma crescente demanda de seu uso. Por proporcionar uma grande produção a um custo mais baixo, acabou se tornando indispensável na indústria. O RTM é um processo promissor para fabricação de materiais compósitos (AMORIM JR *et al.*, 2006).

O processo de injeção de resina permite a moldagem de peças com formato complexo e grandes áreas de superfície com ótimo acabamento em ambos os lados. É utilizado principalmente na fabricação de peças de pequeno e médio porte (BAGGIO, 2005).

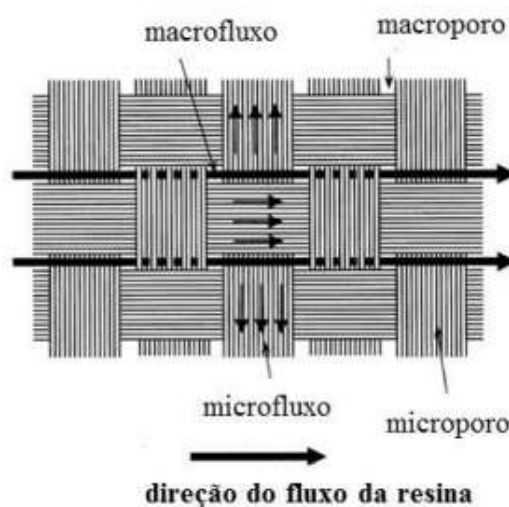
De acordo com Lee *et al.* (2002) há muitos anos essa área tem pesquisas em andamento. Recentemente, o RTM tem ganhado espaço no processo de fabricação de componentes estruturais automotivos. No processo de RTM, a resina líquida é injetada em uma pré-forma de fibra seca em um molde. A injeção de resina pode ser influenciada por vários fatores como propriedades da resina líquida, orientação da manta de fibra, temperatura do molde, temperatura ambiente pressão de injeção de resina e características da superfície entre as fibras e resina.

A resina que deve ser utilizada no processo de RTM forma a matriz composta após a solidificação, como resultado da polimerização. Para o funcionamento do processo de RTM, a cinética de cura da resina é um fator importante e está representado por meio de características

como viscosidade e processo de cura. Para o processo de moldagem por RTM, a resina deve apresentar baixa viscosidade (até 500 cP) durante todo o tempo de injeção. Uma viscosidade elevada da resina fará com que a impregnação da peça ocorra de forma muito lenta fazendo com que a resina cure antes que o reforço seja totalmente impregnado pela mesma (JARAMILLO-ZAPATA; PATIÑO-ARCILA, 2002).

Outro fator que deve ser analisado é o fluxo da resina líquida. Através de uma manta de fibra de vidro, conforme a Figura 9, os macroporos são os espaços entre os fios da fibra, onde, por eles ocorre o macrofluxo, região por onde a resina deve fluir. Já o microporo é a região dentro dos filamentos do fio e o fluxo de resina nessa região recebe o nome de microfluxo. No processo de RTM, por exemplo, o fluxo da resina líquida pelo macroporo acontece pela diferença de pressão, e através do microporo ocorre por ação da capilaridade (REIS, 2016).

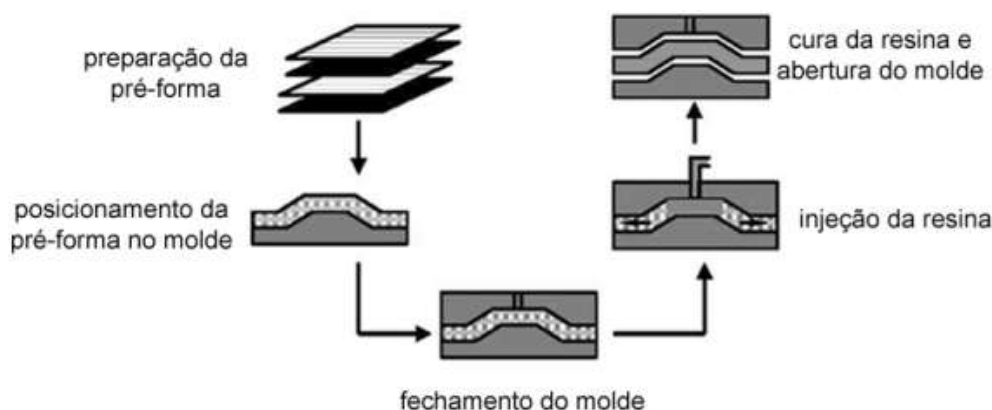
Figura 9 - Representação do fluxo de resina através de um tecido de fibra vidro



Fonte: Reis (2016).

O processo no RTM ocorre em cinco principais etapas, conforme esquematizado na Figura 10. Primeiramente, a pré-forma é preparada com aplicação de *gel coat* e corta-se a manta de fibra de vidro, após a mesma é posicionada no molde. O molde é fechado e o vácuo é acionado para a retirada de ar de dentro do molde. Em seguida, a resina é injetada no molde e irá fluir sobre toda a superfície da manta. Finalmente, depois da cura completa da resina, o molde é aberto e a peça desmoldada. Para o bom funcionamento do molde no processo de RTM, ele deve possuir uma entrada para injeção da resina e uma saída de ar. Em peças grandes, é comum a presença de várias entradas e saídas (ALVES, 2006).

Figura 10 - Esquema do processamento por RTM



Fonte: Alves (2006).

O processo de injeção oferece vantagens, pois pode-se usar simultaneamente vários moldes com diferentes dimensões e formas com a mesma máquina de injeção. Outra vantagem é a condição de higiene do trabalho, uma vez que a resina não está em contato direto com os operadores, a resina não fica exposta ao ambiente em nenhuma das fases dos processos, assim torna-se uma solução do problema de emissão de estireno na atmosfera, visto que todo o processo ocorre em molde fechado. (BAGGIO, 2005).

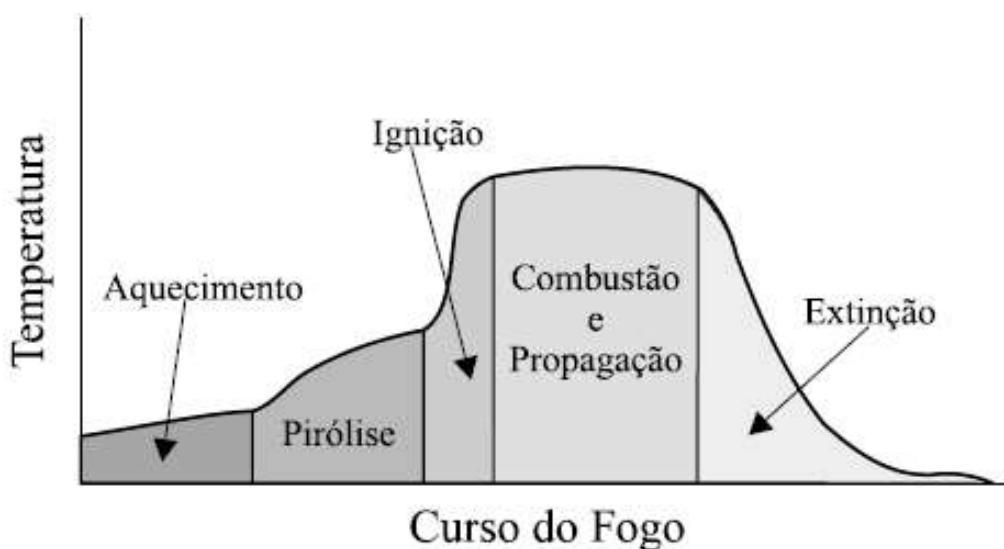
Segundo Alves (2006) a principal desvantagem do processo de RTM é a dificuldade de projetar e fazer os moldes, pois a determinação adequada do posicionamento das entradas da resina e das saídas de ar é condição fundamental para prevenção de falhas de preenchimento da resina com a manta. Outra desvantagem é a possibilidade de deslocamento da manta de fibra durante a injeção da resina, ou ainda a injeção insuficiente de resina, ocasionando pontos de manta seca.

2.9 FLAMABILIDADE

Os polímeros, assim como a maioria dos compostos orgânicos, são inflamáveis, podendo ser em maior ou menor grau, dependendo de sua composição. Isso quer dizer que podem sofrer um processo de combustão a qualquer momento durante sua utilização. A combustão é uma reação química exotérmica e acelerada e acontece entre uma substância também chamada de combustível e um gás que é chamado comburente, sendo normalmente o oxigênio. Desse modo, para que ocorra combustão são necessários três componentes essenciais: fonte de calor, combustível e oxigênio (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

Cinco principais etapas descrevem o processo de queima: aquecimento, pirólise, ignição, combustão e propagação e extinção, conforme pode se ver na Figura 11 (GALLO, 1999).

Figura 11 - Processo de queima



Fonte: Gallo (1999).

2.9.1 Aquecimento

O material tem sua temperatura elevada progressivamente devido a uma fonte de calor externa. A transferência desse calor pode ocorrer por contato direto com chama, por contato com gases quentes ou por condução por meio de um corpo sólido (GALLO, 1999). A velocidade de aquecimento é dependente do tipo de polímero e o aumento de temperatura desse material varia conforme o calor específico, a condutividade térmica, o calor latente e também pelo calor de vaporização (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

2.9.2 Pirólise

Nessa etapa com o polímero aquecido, pode-se atingir o ponto de fulgor (menor ponto em que um combustível libera gases em concentração suficiente para gerar uma mistura inflamável através da fonte externa de calor), onde começa acontecer a decomposição térmica com a liberação de moléculas de baixa massa molar e radicais livres (DE PAOLI; RABELLO, 2013). Nessa etapa inicia-se a liberação de diversas substâncias como gases não combustíveis (dióxido de carbono e vapor d'água), gases combustíveis (alcanos, alcenos e monóxido de carbono), gases corrosivos (cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio), partículas sólidas (fuligem, fibra de vidros e cargas minerais) e radicais livres (GALLO, 1999).

Como observa-se nas Equações 1 a 4, a pirólise ocorre pelo mecanismo de radicais livres, que são iniciados por oxigênio que foi incorporado pelo polímero durante seu processamento. No processo ocorrerá a formação de hidroperóxidos, (ROOH), onde sua decomposição produz espécies altamente reativas de H. e HO. Na presença de alta concentração

de oxigênio um ciclo fechado é formado nas reações 2 e 3, onde mais radicais reagem com o oxigênio, assim ocorrerá a aceleração do processo. Como resultado final, tem-se a produção de hidrocarbonetos e radicais livres altamente reativos H. e HO (DE PAOLI; RABELLO, 2013).



Fonte: De Paoli e Rabello (2013).

2.9.3 Ignição

O principal fator que influencia a ignição é o índice de oxigênio, pois ele indica a concentração mínima para sustentar a combustão. Se a proporção for suficiente ocorrerá a ignição, onde a chama se propagará por todo o material na temperatura chamada de ponto de combustão (mínima temperatura em que o combustível desprende vapores ou gases que aliados ao oxigênio do ar e em contato com uma chama externa, se inflamam). É importante ressaltar que a temperatura de ignição varia com o tipo de polímero (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

2.9.4 Combustão e propagação

Nessa etapa a chama se alastra por toda superfície do material, tornando o processo de queima irreversível. Isso acontece devido aos radicais livres formados na pirólise, gerando reações de combustão altamente exotérmicas, onde o calor liberado inicia o processo denominado retroalimentação térmica. Esse sistema mantém os processos de pirólise e ignição até que haja material combustível disponível para queima (GALLO, 1999).

2.9.5 Extinção

Nessa última etapa, o principal fator é o índice de oxigênio do material, pois conforme o fogo se alastra por todas as regiões do material no decorrer do tempo, tem-se a diminuição das quantidades de material combustível e de oxigênio, assim o calor gerado pela reação não é suficiente para sustentar o mecanismo de retroalimentação térmica. Desse modo, o processo de queima entra em estágio de extinção (GALLO, 1999).

2.10 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA FLAMABILIDADE EM POLÍMEROS

Os testes para avaliar a flamabilidade dos materiais poliméricos podem ser realizados em larga escala, onde se faz testes em situações reais de incêndio, ou em escala laboratorial. Mesmo não apresentando a situação real de incêndio, consegue-se ter um bom resultado a respeito do desempenho dos materiais (GALLO, 1999).

Para Gallo (1999) existem ensaios padronizados para avaliação da flamabilidade de polímeros. Cada ensaio busca avaliar características de cada etapa de queima, tais como a que mede a facilidade de ignição dos polímeros, velocidade de queima de superfície no sentido horizontal e vertical liberação de calor e extinção do fogo.

2.10.1 Flamabilidade em resinas poliméricas

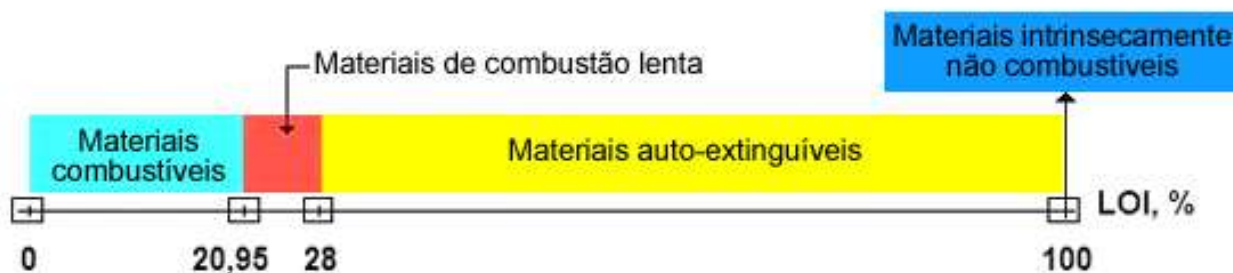
Como a maioria dos compostos orgânicos que contém carbono e hidrogênio na composição, a resina poliéster queima com facilidade, liberando grande quantidade de gases tóxicos. Sua temperatura de ignição é próxima de 400 °C. A resina poliéster é considerada auto-extinguível quando apresenta baixa velocidade de espalhamento de chama quando submetida a fontes de calor e rápida suspensão das chamas quando uma fonte de calor é aplicada (GORNINSKI, 2002).

2.10.2 Índice limite de oxigênio

A medida de maior ou menor flamabilidade recebe o nome de índice limite de oxigênio (LOI). Esse índice indica a agilidade em que os materiais poliméricos sofrem ignição. Assim pode se dizer que o índice de oxigênio é uma medida parcial da flamabilidade dos polímeros (GALLO, 1999). Este ensaio é padronizado pela *American Society for Testing and Materials* através do procedimento padrão ASTM D2863.

O índice limite de oxigênio pode apresentar valores entre 0 e 100, onde 0 representa uma atmosfera sem oxigênio ($[O_2] = 0$). O ar contém aproximadamente 20,95 % de oxigênio, então todos os materiais que obtiverem LOI igual ou menor a essa porcentagem, são considerados inflamáveis. Seguindo a Figura 13 é possível observar que LOI superior a 20,95 % e inferior a 28 %, são consideradas combustão lenta. Os materiais com LOI superior a 28 % e inferior a 100 % são considerados auto-extinguíveis. Já os materiais com LOI 100 % são chamados de intrinsecamente não combustíveis (CAETANO, 2020).

Figura 12 - Classificação dos materiais em função da LOI



Fonte: Caetano (2020).

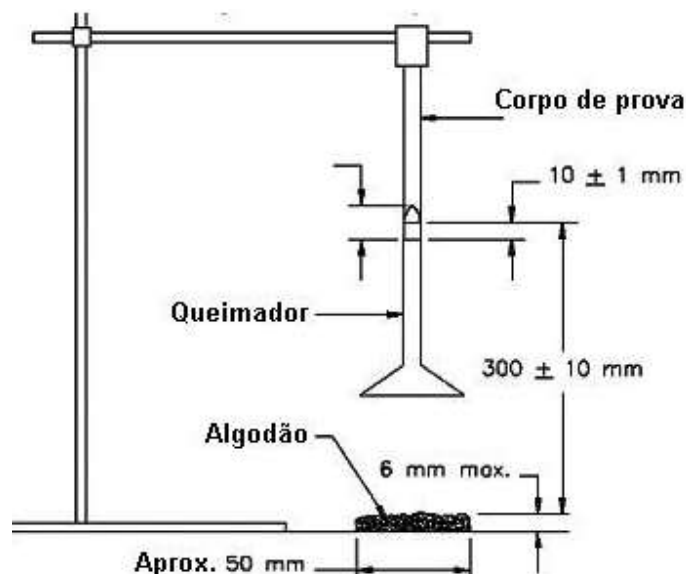
2.10.3 Ensaio queima vertical

O ensaio de queima vertical proporciona quantificar o tempo de duração da chama, ou seja, estabelecer o tempo em que a degradação do material libera combustíveis fósseis devido ao aumento da temperatura da chama (CAVANI, 2008).

Os quesitos necessários para o ensaio estão normalizadas na UL 94, da *Underwriters Laboratories*, onde uma das normas utilizadas para o ensaio de queima vertical é a ASTM D 3801, cuja aplicação é destinada a materiais plásticos sólidos (GALLO, 1999).

O ensaio de queima vertical da UL 94 classifica o material em V0, V1 ou V2 de acordo com o resultado obtido conforme pode ser visto na Tabela 3. Nesse ensaio o corpo de prova é preso verticalmente, e a chama é aplicada por dois tempos de 10 s. Durante a realização do teste são coletados os tempos de duração de chama na primeira aplicação (t_1), e a duração da chama após a segunda aplicação (t_2) e também a duração da chama mais incandescência após a segunda aplicação. Também é necessário avaliar se o corpo de prova queimou até o fixador de amostra e se houve queima do algodão por gotejamento do material. Na Figura 14 é mostrado o esquema necessário para realização do ensaio de queima vertical UL-94-VB.

Figura 13 - Esquema para realização do ensaio de queima vertical



Fonte: UL- 94 (2020).

Tabela 3 - Classificação para o teste de queima vertical pela norma UL-94

Critérios	V0	V1	V2
Valores individuais de t1 e t2	< 10 s	< 30 s	< 30 s
Soma t1+t2	< 50 s	< 250 s	< 250 s
Valores t3	< 30 s	< 60 s	< 60 s
Queima até o fixador	Não	Não	Não
Queima do algodão	Não	Não	

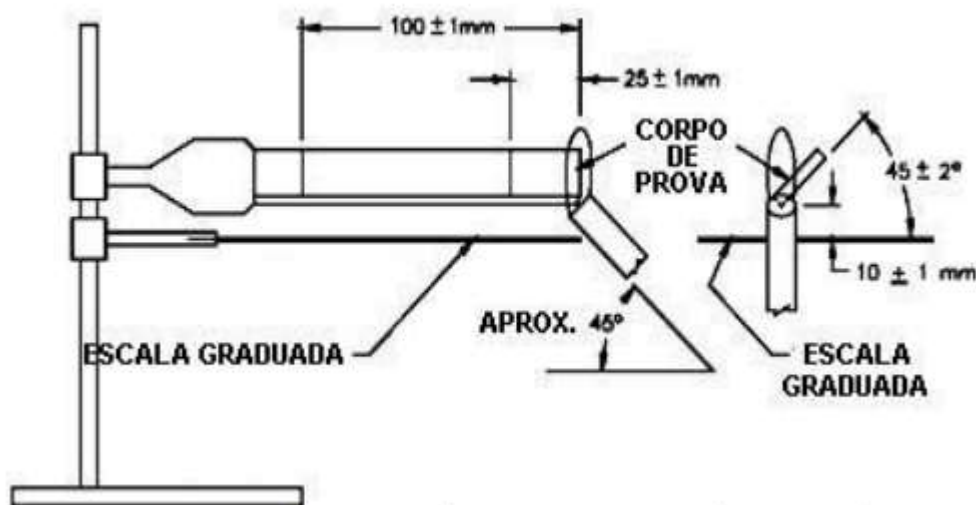
Fonte: UL- 94 (2020).

2.10.4 Ensaio queima horizontal

O ensaio de queima horizontal é definido através da velocidade de propagação de chama, ou seja, à taxa de decomposição do material está relacionada à reatividade do material (CAVANI, 2008).

O ensaio de queima horizontal estabelecido pela UL 94 é descrito pela norma ASTM D 635 – 98. A amostra deve ser exposta à chama por 30 s. Passado esse tempo, a extensão da queima é medida. Deve-se medir se a chama ultrapassou a marca de 25 mm, ou se a frente da chama ultrapassou a marca de 25 mm, mas parou antes da marca de 100 mm, a dado comprimento (L) e tempo decorrido (t) ou ainda se a frente da chama passou da marca de 100 mm, a dado tempo decorrido (t) entre os 25 mm e 100 mm. Ao final do teste, a taxa de queima é calculada e classificam-se como materiais inflamáveis aqueles que permitem a manutenção de chama, e ainda possibilitam maior velocidade de propagação da mesma. Na Figura 15 é mostrado o esquema necessário para realização do ensaio de queima horizontal.

Figura 14 - Esquema para realização de ensaio da queima horizontal



Fonte: UL- 94 (2020).

2.11 ADITIVOS RETARDANTE DE CHAMAS

Os retardantes de chama tiveram suas primeiras aplicações em 450 A.C. pelos egípcios, com o intuito de diminuir a inflamabilidade da madeira, após, em 200 A.C, os romanos passaram a usar uma mistura de vinagre e alume para o mesmo fim. Porém, foi em 1970 com o crescimento da utilização de materiais poliméricos onde viu-se a necessidade de criar novos retardantes de chamas adequados a cada tipo de polímeros (PIERONI *et al.*, 2016).

Para a redução de flamabilidade, não existe um método que se aplique a todos os polímeros, cada sistema polimérico poderá ter soluções diferentes, dependendo dos requisitos de cada material. Pode-se reduzir a flamabilidade com o uso de retardantes de chamas reativos, uso de retardantes de chama aditivos, aplicação de revestimentos antichama ou ainda a combinação de vários métodos (GALLO, 1999).

O crescimento anual do uso de aditivos retardadores de chamas, considerando escala mundial, é de 8 a 10 %, devido às grandes exigências impostas pelos órgãos reguladores em determinadas aplicações. No Brasil o uso ainda é baixo, devido à falta de normas mais severas que exijam a utilização do mesmo. Como exemplo, tem-se a indústria automobilística. Enquanto a velocidade máxima de propagação do fogo é de 80 mm/min nos USA, Europa e Japão, no Brasil a exigência é de 250 mm/min, segundo a resolução 675/86 do Contran (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

Os retardadores de chama tem por finalidade inibir a ignição, retardar a propagação da chama e proteger a infraestrutura do material durante um incêndio. Eles também podem reduzir a quantidade de fumaça tóxica que pode ocasionar morte. Em torno de 60 % das formulações

de polímeros ainda tem como base de aditivos retardadores de chamas halogenados. Sabe-se que esses materiais têm efeitos colaterais graves e indesejáveis, por isso empresas e pesquisadores estão sempre na busca de alternativas (LENS *et al.* 2019).

Quando utilizados em polímeros, os aditivos retardantes de chama devem atender a alguns requisitos básicos, como ser de fácil incorporação, não ter efeito corrosivo, ter boa durabilidade com pequenas quantidades adicionadas, não reagir com o polímero durante o processamento, não alterar a estabilidade do polímero e não apresentar toxicidade (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

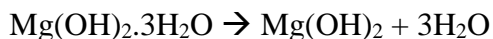
Os aditivos podem atuar por meio de ação física, química ou sinérgica. A ação física pode ocorrer por resfriamento (o retardante de chama resfria o substrato a uma temperatura abaixo da necessária para que ocorra a pirólise), por formação de camada protetora (essa camada reduz a transferência de gases combustíveis para a região de queima gasosa, inibindo as reações de combustão) ou ainda por diluição (o aditivo libera gases inertes que irão diluir os combustíveis, assim o ponto de fulgor do material é mais elevado). A ação química pode ocorrer por reações da fase gasosa (a ação dos radicais livres no processo da combustão é interrompida pelo retardante de chama, diminuindo assim a evolução dos gases inflamáveis) ou por reações de fase sólida (o retardante acelera a fragmentação do polímero, que por falta de combustível terá a propagação da chama extinta). A ação sinérgica é a união de vários retardantes com diferentes modos de ação, visando uma melhor eficiência (GALLO, 1999).

2.11.1 Retardante de chama inorgânico

Os retardantes de chama inorgânicos são classificados como os de ação física e representam cerca de 50 % do consumo. Os retardantes de chamas mais utilizados são o trióxido de antimônio, o hidróxido de magnésio e a alumina trihidratada (THA) (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

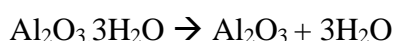
O trióxido de antimônio Sb_2O_3 é o único composto de antimônio utilizado como retardante de chama, porém sozinho não apresenta nenhuma eficiência. Mas, quando usado em conjunto com retardantes de chama halogenados, observa-se boa eficiência no retardo da chama (GALLO, 1999).

O hidróxido de magnésio hidratado, atua de forma muito semelhante a à alumina, porém possui uma temperatura de decomposição mais elevada (em torno de 350 °C), sendo indicado para polímeros com temperaturas de processamento mais altas (DE PAOLI; RABELLO, 2013). Durante a queima o hidróxido de magnésio desidrata em um processo endotérmico, conforme reação:



A alumina (Al_2O_3) pode ser obtida pelo processo de calcinação do hidróxido de alumínio, apresentando boa inércia química. Por ter elevada capacidade de resistir a altas temperaturas sem perder a sua natureza química, é considerada um óxido refratário. A alumina é muito versátil, no meio industrial e pode ser aplicada em cerâmicas (como elemento abrasivo para polimentos) e também em peças automotivas (como retardante de chamas). A alumina trihidratada utilizada em resinas poliméricas, atua não só como retardante de chama, mas também apresenta maior proteção e resistência a fraturas. A adição do hidróxido de alumínio em resinas poliméricas, inibe a sua ignição e a formação de gases combustíveis, os quais ajudam para a propagação da chama. (GORNINSKI; TONET, 2016).

Para De Paoli e Rabello (2013) a alumina é utilizada em processos onde a temperatura fica abaixo de 250 °C. Durante a queima a alumina desidrata em um processo endotérmico, conforme reação:



O vapor de água liberado dilui os gases combustíveis da chama. Essa desidratação também auxilia a diminuição da temperatura do material. A formação de Al_2O_3 atua como uma camada protetora na superfície, reduzindo a difusão do oxigênio e dificultando a troca de calor. Uma desvantagem da alumina é que precisa-se usar uma grande quantidade para obter boa eficiência, e como ela possui cargas, vai fazer com que o material diminua propriedades mecânicas (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

2.11.2 Retardante de chama orgânico não reativo

Os retardantes de chama orgânicos são incorporados a resina durante o processamento na forma pura ou em concentrados e são compostos que não se ligam quimicamente à cadeia do polímero, podem ser compostos contendo fósforo ou halogenados: clorados e bromados (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

As formas mais comuns de uso são o fosfato de tricloroetila e o polifosfato de amônio. Na etapa de aquecimento dos compostos, o fosfato atinge uma temperatura na qual sofrerá decomposição, gerando ácido fosfórico. Isso fará com que desidrate o polímero formando uma camada protetora. A desidratação também libera água e gases não combustíveis, o que acarretará na diminuição ao retardo da chama (GALLO, 1999).

Aditivos halogenados geralmente são representados pela fórmula RX, sendo R um radical orgânico e X um halogênio. No processo de queima dos polímeros, estes aditivos

neutralizam os radicais livres de alta energia (HO. e H.) que dão origem ao processo de combustão (GALLO, 1999). A velocidade de combustão varia com o tipo de vapor combustível e diminui segundo a sequência: $\text{CH}_4 > \text{CH}_3\text{Cl} > \text{CH}_2\text{Cl}_2 > \text{CHCl}_3 > \text{CCl}_4$ (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

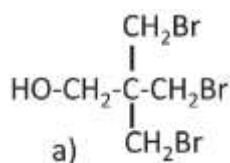
A eficiência do retardante de chama varia conforme o elemento halogênio e segue a seguinte ordem: $\text{I} > \text{Br} > \text{Cl} > \text{F}$. Porém, na prática apenas os compostos clorados e os bromados têm significativo efeito ao retardo da chama, pois as ligações R-F e R-I são muito fortes, não se dissociando para formarem radicais livres (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

Os compostos clorados são mais baratos do que os bromados, porém são aplicáveis somente em processos de até 200 °C. Os compostos bromados apresentam maior eficiência do que os clorados, entretanto, têm sido indicado como responsáveis por vários problemas de toxicidade (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

2.11.3 Retardante de chama orgânicos reativos

Os retardantes de chama orgânicos reativos são os mesmos tipos de compostos halogenados dos não reativos, com a única diferença de que podem se ligar quimicamente à cadeia polimérica. Como, por exemplo, a utilização álcool trisbromoneopentílico, Figura 16 onde o grupo –OH reage com o isocianato durante o processamento de poliuretanas pelo processo de moldagem por injeção (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

Figura 15 - Trisbromoneopentílico utilizado como retardante de chama reativo



Fonte: De Paoli e Rabello (2013).

A grande vantagem do retardante de chama reativo é que não apresenta qualquer problema de migração, assim as propriedades mecânicas não são afetadas (DE PAOLI; RABELLO, 2013).

2.12 ESTADO DA ARTE

Ribeiro *et al.* (2013) avaliou compósito de poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi. O trabalho buscou avaliar a flamabilidade e retardância de chama. O agente retardante de chama utilizado foi a alumina trihidratada. O compósito foi submetido a ensaios de queima vertical e horizontal conforme norma da UL94. No ensaio de queima vertical os

compósitos com 20 % e 40 % de alumina em massa, não atenderam a norma, sofrendo ignição seguida de queima auto sustentada na primeira aplicação da chama. Mas, nos compósitos com 60 % de alumina em massa, na primeira aplicação, o corpo de prova sustenta a chama por 40 segundos e em seguida se apaga, porém na segunda aplicação da chama ocorre a auto sustentação da chama no corpo de prova, o que impossibilita a classificação deste material conforme a norma. No ensaio horizontal também foi testado concentração de 20 %, 40 % e 60 % de alumina. Neste ensaio notou-se que o tempo médio de queima aumentou à medida que se subiu a concentração de alumina, mostrando que a alumina fez efeito. Assim, a taxa de queima do material apresentou um resultado menor do que as taxas máximas exigidas no Brasil que é de 250 mm/min para a indústria automobilística.

Já Martins *et al.* (2011) avaliaram as propriedades retardantes de chama de hidróxidos de magnésio e alumínio com fibra de vidro em polipropileno. Foi utilizada a proporção de: 75 % de PP, 20 % de hidróxido e 5 % de fibra de vidro em massa. Após o material foi submetido ao ensaio de queima vertical conforme norma UL 94. Os resultados mostram que os materiais não atingem a classificação V0, o que também impede a classificação deste material segundo a norma, porém o hidróxido de magnésio e alumínio podem ser utilizados como retardantes de chama juntamente com fibra de vidro.

Wang *et al.* (2015) avaliaram a flamabilidade, estabilidade térmica, calor resistência e propriedades mecânicas da resina poliéster insaturada usando AlPi (dialquilfosfinato de alumínio) como retardador de chamas. Para esse teste utilizou-se o dietilfosfinato de alumínio com concentrações de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 % em relação à massa total de resina. O teste da LOI foi realizado segundo normas da UL94. Com 5 % e 10 % não atingiu-se classificação mínima do teste. Com 15 % e 20 % atingiu-se a classificação V2 e 25 % é capaz de passar na classificação V0. Quanto aos ensaios de tração e flexão, observou-se que há redução contínua da resistência à flexão e tração à medida que a quantidade de retardante de chama aumenta. No entanto, o módulo de flexão aumenta conforme aumenta a quantidade de retardante de chamas.

Siregar *et al.* (2018) avaliou as propriedades de retardadores de chama utilizando fibra de vidro e resina poliéster insaturada reforçada. Foram utilizados dois tipos de resinas cada uma contendo um aditivo retardador de chama diferente (157 BQTN-FR e 157 BQTN –EX). Fez se as peças com a fibra e a resina, onde deixou a cura ocorrer de 1 a 2 horas. Após as peças foram submetidas ao teste de queima horizontal conforme norma UL 94. A resina 157 BQTN-FR tem menor taxa de queima (40 mm partindo do ponto inicial da queima) do que a resina 157 BQTN-

EX (100 mm partindo do ponto inicial da queima) e quanto menor a taxa de queima, melhor a resistência do composto ao fogo. Porém, os resultados do material não atenderam a norma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados para a confecção dos corpos de prova, seus respectivos fornecedores e principais características estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 - Materiais, fornecedores e características

Material	Fornecedor	Característica
Resina poliéster insaturada ortoftálica	Ashland	Viscosidade entre 70 e 100 cP
<i>Gel coat</i>	Morquímica	Viscosidade entre 2500 e 3000 cP
Catalisador AAP	Polinox	Percentual de uso 1,5 % em volume
Catalisador MEK P	Polinox	Percentual de uso 1,5 % em volume
Manta de fibra de vidro	Owens Corning	Gramatura de 450 g/m ²
Aditivo halogenado - DATIFIRE FR-2	Datiquim	Viscosidade entre 1200 e 1800 cP
Aditivo halogenado - Fyrol FR-2	Chemtra	Viscosidade 1520 cP
Aditivo não halogenado - Alumina	ALCOA	Massa específica 2,42 g/cm ³

Fonte: O Autor (2020).

3.2 OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

No Quadro 3 estão dispostos os 3 aditivos antichama que foram incorporados à resina, dois halogenados e um não halogenado, com suas devidas formulações químicas e percentuais de testes. O percentual de aditivo escolhido para os testes foram definidos conforme resultados preliminares já conhecidos.

Quadro 3 - Aditivos antichama

Aditivo	Fórmula química	Percentual em massa testado	Notação
Não halogenado (Alumina)	Al ₂ O ₃ .3H ₂ O	30 % e 50 %.	30 A e 50 A
Halogenado (Datifire FR-2)	C ₉ H ₁₅ O ₄ Cl ₂ P	30 % e 50 %.	30 D e 50 D
Halogenado (Fyrol FR-2)	C ₉ H ₁₅ O ₄ Cl ₆ P	30 % e 50 %.	30 F e 50 F

Fonte: O Autor (2020).

No fluxograma abaixo será descrito o processo de produção do compósito.



Fonte: O Autor (2020).

Para a produção dos compósitos utilizou-se *gel coat* auto extingüível para que o gel não interferisse no processo de queima do compósito. Optou-se pela utilização da configuração

MM450/180/450 de manta de fibra de vidro, conforme configuração da Tabela 2. A proporção utilizada para resina e manta foi respectivamente 70/30 em massa. Assim com esse padrão de materiais obteve-se placas com espessuras entre 3 e 4 mm.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA

3.3.1 Viscosidade

Esse ensaio foi adaptado seguindo a norma NBR 9277/08. O ambiente deve ter temperatura controlada de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. A amostra foi agitada, colocada em um Becker de 500 mL e estabilizada em um banho termostático com temperatura controlada de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, por no mínimo 15 minutos. O equipamento utilizado foi o viscosímetro Brookfield, modelo RVDV. Para o teste deve-se escolher o elemento rotacional, nesse caso o usado foi o spindle 2 e velocidade de 20 rpm. Segurou-se o elemento rotacional em ângulo de aproximadamente 45° em relação a superfície livre da amostra e mergulhou o elemento rotacional no centro da amostra, até que a mesma atingisse a marca de nível, observando para que não ocorresse formação de bolhas. Acionou-se o viscosímetro e o cronômetro ao mesmo tempo. Cronometrou-se 45 segundos e anotou-se o valor da viscosidade ao final desse tempo.

3.3.2 Tempo de cura

O ensaio foi adaptado com base na norma ASTM D 2471 que busca analisar o tempo de gel e o pico de temperatura exotérmica da reação de resinas termorrígidas. O ambiente deve ter temperatura controlada de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. A amostra foi agitada e, após estabilizada em um banho termostático com temperatura controlada de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, por no mínimo 4 horas. Em um copo de polipropileno de 300 mL, pesou-se 100 g de resina e estabilizou a $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, controlando a temperatura com um termômetro. Em seguida, adicionou-se 1,5 % em volume de catalisador AAP, acionou-se o cronometro e agitou-se a amostra por 1 minuto. Para evitar a transferência de calor, não deve-se segurar o copo manualmente durante a operação de mistura. Registrou-se o início da mistura como o "horário de início". Inseriu-se o termômetro no centro da amostra. A área do termômetro que estiver em contato com a resina foi envolta por papel alumínio. Registrou-se as alterações de temperatura com o passar do tempo. Quando iniciou-se o aumento da temperatura, inseriu-se um bastão perpendicularmente ao termômetro a cada 15 segundos. Quando a resina não aderiu mais ao bastão registrou-se o "tempo de gel". Continuou-se registrando o tempo e a temperatura até que a temperatura comece a cair. Gravou-se a temperatura mais alta atingida e registrou-se como "pico de temperatura

exotérmica". Gravou-se o "tempo de pico exotérmico" com o tempo decorrido desde o início do mistura, até atingir a temperatura mais alta.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

3.4.1 Ensaios mecânicos

O ensaio de tração foi baseado na norma ASTM D 638/14. Para o teste foram preparados 5 corpos de prova entre 3 e 4 mm de espessura. Os mesmos não podem apresentar bolhas, trincas, fissuras ou porosidade. Eles foram acondicionados a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e umidade relativa $60 \pm 10\%$ por no mínimo 40 horas.

O ensaio de flexão foi baseado na norma ASTM D790/17. Para esse ensaio foram preparados 5 corpos de prova com largura de $12,7 \pm 0,3\text{ mm}$ e comprimento de 16 vezes a espessura do corpo de prova + 50 mm e a espessura deverá ser inferior a 12,7 mm. Eles foram acondicionados a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e umidade relativa $60 \pm 10\%$ por no mínimo 40 horas. Para o ensaio foi utilizado uma máquina universal de ensaios e a velocidade do ensaio foi de 1,5 mm/min.

O ensaio de impacto com entalhe foi baseado na norma ASTM D256/10. Para esse ensaio foram preparados 5 corpos de prova com $12,7 \pm 0,2\text{ mm}$ largura e $63,5 \pm 0,2\text{ mm}$ de comprimento com entalhe. Eles foram acondicionados a $23 \pm 2\text{ °C}$ e umidade relativa $60 \pm 10\%$ por no mínimo 40 horas. O martelo utilizado foi o de 2,75 J.

3.4.2 Ensaio de queima vertical

O ensaio de queima vertical foi baseado na norma UL94. Foram preparados 5 corpos de prova com dimensões de $13\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ de largura e $125\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ de comprimento. As amostras foram acondicionadas em um ambiente com temperatura controlada de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e umidade relativa de $50 \pm 5\%$ por no mínimo 48 horas antes do ensaio. As mesmas condições foram ser mantidas no momento do ensaio. Os equipamentos necessários foram mostrados anteriormente na Figura 14. O conjunto foi posicionado dentro de uma capela. Após colocou-se papel alumínio e algodão na direção vertical ao suporte, caso haja gotejamento durante o ensaio. A amostra foi montada no suporte e o acendeu-se o bico de Bunsen por 2 minutos antes do início do ensaio, para a estabilização da chama. Em seguida levou-se o bico de Bunsen manualmente até o contato da chama com a ponta inferior da amostra, deixando-a por um período de 10 segundos. Para a medição desse tempo utilizou-se um cronômetro. Transcorrido esse tempo retirou-se o bico de Bunsen das proximidades do porta amostra. Fez-se o mesmo processo novamente por mais 10 segundos, caso a chama presente no corpo de prova se apague.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VISCOSIDADE

Na Tabela 4 constam os valores encontrados para as amostras contendo resina poliéster insaturada (R1), juntamente com o aditivo não halogenado (alumina), nos teores de 30 % em massa de alumina (30 A) e 50 % em massa de alumina (50 A). Foi realizado somente uma medição de viscosidade para cada material.

Tabela 4 - Viscosidade da resina e das misturas realizadas

Material	Viscosidade (cP)
R1	96
30 A	170
50 A	246

Fonte: O Autor (2020).

R1: Lote 1 de resina poliéster insaturada ortoftálica.

Os resultados demonstram que a adição 30 % em massa de alumina na resina ocasionou um aumento de 77 % na viscosidade, enquanto que a incorporação de 50 % em massa de alumina gerou um aumento superior a 150 %. As partículas de alumina atuam restringindo a mobilidade das cadeias poliméricas e desta forma contribuem para aumentar a viscosidade da mistura.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de viscosidade obtidos para as amostras contendo resina poliéster insaturada (R2), juntamente com os aditivos halogenados, $C_9H_{15}O_4Cl_2P$ (D) e $C_9H_{15}O_4Cl_6P$ (F), nos teores de 30 % em massa (30 D e 30 F) e 50 % em massa (50 D e 50 F).

Tabela 5 - Viscosidade da resina, aditivos halogenados e suas misturas

Material	Viscosidade (cP)
R2	72
F	1520
D	1378
30 F	116
50 F	134
30 D	108
50 D	118

Fonte: O Autor (2020).

R2: Lote 2 de resina poliéster insaturada ortoftálica.

Os aditivos halogenados F e D são líquidos e possuem viscosidade mais elevada que a resina poliéster. Desta forma, a mistura da resina poliéster com o aditivo halogenado acarreta em um aumento na viscosidade final da resina. Também nota-se que quanto maior a quantidade de aditivo adicionada, maior é a viscosidade do material.

Como pode-se observar, quanto maior a quantidade de aditivo halogenado e não halogenado adicionado à resina, maior será a viscosidade do sistema. O aumento na viscosidade inicial da mistura já era esperado, pois conforme Borges (2016), a mobilidade das cadeias poliméricas da resina poliéster com os demais componentes da mistura irá diminuir com a adição de cargas, devido à restrição do movimento das cadeias causado pela carga. Conforme Jaramillo-Zapata e Patiño-Arcila (2002) para o processo de injeção a viscosidade da resina precisa estar abaixo de 500 cP. Dessa forma, na fabricação do compósito, ao misturar resina e o aditivo não foram verificadas dificuldades no momento de injeção das peças, mesmo com o aumento na viscosidade causado pela adição dos retardantes de chama.

4.2 TEMPO DE CURA

No Quadro 4 estão apresentados os resultados obtidos para tempo de gel, tempo de pico exotérmico, e temperatura de pico exotérmico.

Quadro 4 - Tempo de gel, tempo de pico exotérmico e temperatura de pico exotérmico para a resina e para as misturas com os aditivos estudados

Material	Tempo de gel (min)	Tempo de pico exotérmico (min)	Temperatura de pico exotérmico (°C)
R	08:50	04:25	197
30 A	07:46	06:24	149
50 A	07:40	07:20	140
30 F	17:45	14:15	143
50 F	27:00	08:30	127
30 D	14:00	10:10	154
50 D	23:00	06:30	121

Fonte: O Autor (2020)

R: Resina poliéster insaturada ortoftálica.

Como pode-se observar no Quadro 4, com a adição da alumina houve a diminuição do tempo de gel em relação a resina pura, porém observa-se que mesmo variando o percentual de alumina adicionada, o tempo de gel permanece estável.

A condutividade térmica de um material diz respeito à capacidade deste em transportar e transferir calor de uma região para outra. Os polímeros não são bons condutores de calor, e as resinas apresentam condutividade térmica entre 0,17 e 0,21 W/m.K, já a alumina apresenta condutividade térmica de 39 W/m.K. Assim, a adição de cargas causa aumento na condutividade térmica da resina, com isso, tende-se a reduzir o tempo de gel, uma vez que o sistema atinge a temperatura de iniciação mais rapidamente (RUDD *et al.*, 1997; SCHÄFER, 2020).

Para o intervalo de reação observa-se que quando maior a quantidade de alumina adicionada, maior será o tempo, e menor será a temperatura de pico exotérmico. Isso acontece, pois segundo Rudd *et al.* (1997), com a adição de cargas tem-se uma redução no número de ligações duplas reativas por unidade de volume, possibilitando que a alumina atue como uma barreira para dissipação de calor liberado durante a reação de cura, proporcionando dessa forma redução no pico máximo de temperatura exotérmica, devido a redução do calor de reação.

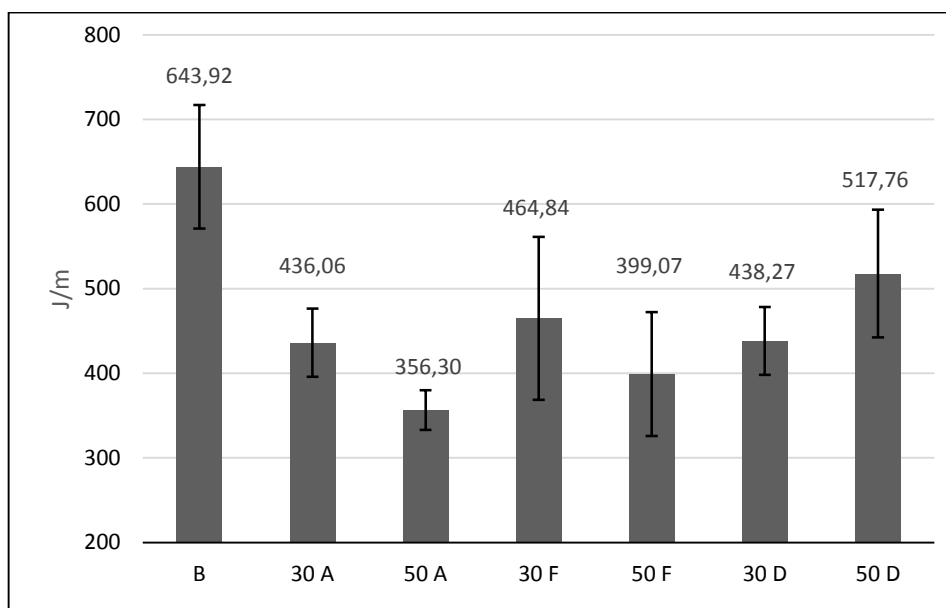
Para ambos os aditivos halogenados nota-se um comportamento semelhante, pois quanto maior a quantidade adicionada, mais alongado se torna o tempo de gel em relação à resina pura. Isso se deve ao fato de que houve um aumento na quantidade de solução líquida, enquanto a resina pura continha 100 mL, a amostra 30 F e a amostra 30 D continham 130 mL na sua mistura, enquanto a amostra 50 D e a amostra 50 F continham 150 mL na sua mistura, porém a quantidade de catalisador foi a mesma (1,5 % em relação à quantidade de massa de resina), assim tinha-se uma quantidade maior de solução líquida para reagir com a mesma quantidade de catalisador, fazendo com que haja um tempo de reação maior.

Para ambos os aditivos líquidos também observou-se que, quanto maior a quantidade adicionada, menor é o tempo de pico exotérmico e menor é a temperatura de pico exotérmico. Isso pode ter acontecido, pois assim como a alumina os aditivos halogenados atuam como uma barreira para dissipação de calor liberado durante a reação de cura assim haverá redução do pico máximo de temperatura exotérmica.

4.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A resistência ao impacto por um pêndulo indica a energia necessária para romper o compósito. Os resultados obtidos para a resistência ao impacto dos compósitos podem ser vistos na Figura 17.

Figura 16 - Resistência ao impacto dos compósitos estudados



Fonte: O Autor (2020).

Com relação à resistência ao impacto, pode-se verificar que com o aumento do teor de aditivo não halogenado, ocorre a diminuição da resistência. Isso pode estar relacionado com a má dispersão das partículas de alumina podendo-se ter aglomerados de alumina no compósito e os mesmos atuaram como concentradores de tensão. Alves *et al.* (2018) também observaram comportamento semelhante, pois quando adicionaram diferentes teores de alumina ao PP, observaram redução na resistência ao impacto do compósito.

Para o aditivo halogenado F, também constatou-se que o aumento do teor de aditivo também causa redução na resistência ao impacto. Redwan *et al.* (2019) avaliaram o efeito de Tris (1,3-Dicloroisopropil) fosfato em compósitos de poliuretano (PU), e constataram que quanto maior o teor de aditivo adicionado, menor foi a resistência ao impacto. Segundo os autores, o aditivo causou descontinuidade da matriz, gerado por aglomerados de partículas de aditivo, formando um ponto de tensão que levou a microfissura. Isso pode ter acontecido no compósito também, uma má dispersão do aditivo na resina, pode ter fragilizado o compósito. Assim, nota-se que quanto maior o teor de aditivo halogenado F adicionado, menor será a resistência ao impacto.

Para o compósito contendo aditivo halogenado D têm-se também redução na resistência ao impacto do compósito, porém nota-se um efeito divergente em relação aos outros aditivos, pois a resistência ao impacto é muito menor na amostra 30 D que na amostra 50 D. Isso pode ter ocorrido, pois no compósito contendo 50 D houve uma melhor dispersão do aditivo.

4.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de flexão dos compósitos desenvolvidos.

Tabela 6 - Deformação, resistência a flexão e módulo de flexão para as amostras estudadas

	Deformação (%)	Resistência a Flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)
B	5,27 ± 0,32	148,08 ± 12,26	3398,03 ± 143,95
30 A	2,81 ± 0,04	196,05 ± 19,40	8356,20 ± 650,23
50 A	2,92 ± 0,42	134,40 ± 22,36	5932,37 ± 688,31
30 F	4,36 ± 0,79	63,67 ± 22,19	2080,67 ± 1068,57
50 F	3,06 ± 0,04	55,92 ± 5,56	2349,17 ± 149,43
30 D	3,39 ± 0,26	123,58 ± 16,84	4345,87 ± 788,45
50 D	3,04 ± 0,14	71,12 ± 9,52	2777,40 ± 346,51

Fonte: O Autor (2020).

Os compósitos 30 A e 50 A obtiveram menor deformação em relação a todos os aditivos, e isso era um resultado esperado, visto que quando incorpora-se o aditivo não halogenado (alumina), o compósito se torna mais rígido, e conseqüentemente, menor será sua deformação.

Já os compósitos desenvolvidos com os aditivos halogenados 30 F, 50 F, 30 D e 50 D, obtiveram menores variações de deformação, porém os valores encontrados foram inferiores ao da amostra sem aditivos. Como a maioria dos compósitos aditivados com retardante de chama halogenado apresentaram menor módulo de flexão em relação ao compósito sem aditivos, os mesmos também apresentaram menor deformação.

Em relação aos aditivos não halogenados, nota-se que há uma resistência a flexão maior no compósito com 30 A, do que no compósito sem aditivo. Rocha (2018) relatou em seu trabalho à diminuição da resistência a flexão quando adicionado o aditivo não halogenado (alumina) ao compósito. O compósito 30 A apresentou um aumento da resistência a flexão quando comparado ao compósito sem aditivo. Esse aumento pode ter sido ocasionado pelo efeito de reforço causado pela adição de alumina. Contudo, verifica-se que quando o teor de alumina aumenta para 50 % em massa a resistência a flexão diminui, possivelmente devido a aglomeração das partículas na alumina na matriz.

Com relação à resistência a flexão em compósitos com aditivos halogenados, nota-se a diminuição da propriedade conforme aumenta-se o teor de aditivos. Isso justifica-se pelo fato de que quanto maior a quantidade de retardante de chama adicionado ao compósito, menor é a quantidade de resina no mesmo, influenciando assim na interação da fibra com a resina, consequentemente diminuindo cada vez mais o valor da resistência a flexão no compósito. Isso se confirma em Redwan *et al.* (2019) que também constatou em seu trabalho a redução de resistência à flexão quando adicionado o retardante de chama halogenado ao PU.

Quando se observa o módulo de flexão, nota-se que quando adicionado aditivo não halogenado ao compósito, se tem maior módulo de flexão do que o compósito puro. Isso se deve ao fato de que o aditivo aumenta a rigidez do compósito. No entanto, nota-se um aumento mais elevado no módulo de flexão do compósito contendo 30 % em massa de alumina que naquele contendo 50 % em massa de alumina. Esse aumento também foi observado na resistência a flexão, conforme discutido anteriormente. A princípio teores de carga de 50 % em massa de alumina podem gerar aglomerados de partículas e diminuir a possível interação entre carga e matriz, o que pode contribuir para a redução do módulo de flexão.

Para os compósitos 30 F, 50 F e 50 D, observa-se a diminuição do módulo de flexão em relação ao compósito puro. Segundo Redwan *et al.* (2019), quanto maior a quantidade de aditivo halogenado, menor são as propriedades umectantes da matriz, ou seja, fica mais difícil para resina impregnar a manta de fibra de vidro, diminuindo assim o grau de encapsulamento da matriz em torno de retardante de chama, ocasionando menor módulo de flexão a esses compósitos.

4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Na Tabela 7 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração.

Tabela 7 - Alongamento, resistência à tração e módulo de tração para as amostras estudadas

	Alongamento (%)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de tração (MPa)
B	7,17 ± 0,84	74,54 ± 10,39	1495,31 ± 224,81
30 A	5,86 ± 0,77	60,38 ± 8,08	1654,93 ± 192,27
50 A	5,85 ± 0,43	59,36 ± 3,92	1733,71 ± 61,09
30 F	6,51 ± 0,74	54,58 ± 3,69	1337,13 ± 91,20

50 F	7,72 ± 0,18	43,62 ± 3,38	879,45 ± 37,71
30 D	8,35 ± 0,47	71,71 ± 6,63	1322,25 ± 91,42
50 D	6,61 ± 0,94	42,05 ± 4,98	954,22 ± 48,76

Fonte: O Autor (2020).

Conforme analisa-se na Tabela 7 o compósito contendo retardante de chama não halogenado tem um alongamento menor que o compósito sem aditivos, porém destaca-se que o alongamento foi o mesmo para 30 A e 50 A, isso justifica-se devido ao fato desse compósito se tornar mais rígido e também pelo fato do aditivo diminuir a mobilidade molecular da interface fibra/matriz, diminuindo assim seu alongamento.

Já os compósitos com aditivos halogenados possuem percentual de alongamento próximo ou superior ao compósito sem aditivo, mostrando que para os compósitos 30 F, 50 F, 30 D, e 50 D não houve redução no alongamento. Pode-se inferir que o aditivo não interferiu na mobilidade das cadeias da matriz.

A resistência a tração é a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado ou puxado antes de falhar. Assim, observa-se que todos os aditivos retardantes de chama adicionados, afetaram negativamente o desempenho mecânico do compósito. Também nota-se que quanto maior a quantidade de aditivos adicionada, menor é a resistência a tração, ou seja, mais frágil se torna o compósito.

Rocha (2015) avaliou a influência da alumina nas propriedades mecânicas e na flamabilidade em compósitos de epóxi/fibra de curauá. O autor comenta que com o aumento na adição de retardante de chama, acarreta no aumento da carga de enchimento e assim contribui para diminuir a carga de reforço no compósito. Em seu estudo o compósito onde não havia retardante de chama, apresentou resistência a tração de 79 MPa, já o compósito contendo 30 % em massa de alumina apresentou resistência a tração de 66 MPa, assim nota-se valores muito próximo com os encontrados neste trabalho.

O melhor desempenho dos compósitos estudados para a resistência a tração foi encontrado no compósito 30 D. Esse compósito apresentou resistência a tração muito semelhante ao compósito sem aditivos, mostrando que o mesmo não interferiu na interação da fibra com a resina. Para os demais compósitos 30 F, 50 F e 50 D, a redução de resistência a tração pode ser justificada pelo fato de que quanto maior a quantidade de retardante de chama adicionado ao compósito, menor é a quantidade de resina no mesmo, influenciando assim na

interação da fibra com a resina, conseqüentemente diminuindo cada vez mais o valor da resistência a tração no compósito.

O módulo de tração é a propriedade mecânica que mede a rigidez de um material. Conforme observado na Tabela 7 quanto maior o teor de aditivo não halogenado adicionado, maior é o módulo de tração. Alves *et al.* (2018) avaliou a interferência da alumina em compósitos com matriz de polipropileno. O mesmo constatou que quanto mais alumina é adicionada, maior é o aumento na rigidez. Isso pode ser explicado devido à maior rigidez da alumina frente aos outros componentes da mistura.

Também analisa-se que todos os teores de aditivos halogenados interferiram negativamente no módulo de tração do compósito e quanto maior a quantidade de aditivo adicionada, mais frágil se tornou o compósito. Conforme Rocha (2015), um fator que pode ter influenciado é a adesão da fibra na matriz, pois quanto maior a quantidade de retardante de chama, mais frágil se tornou o material, pois o aditivo prejudicou a adesão da fibra na matriz.

4.6 FLAMABILIDADE

Os resultados do ensaio de flamabilidade encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos no ensaio de flamabilidade dos compósitos

Crítérios	B	30 A	50 A	30 F	50 F	30 D	50 D
Valores t1 (s)	100	170	150	23	10	11	11
Valores t2 (s)	-	-	-	115	21	136	21
Soma t1+t2 (s)	-	-	-	690	155	735	160
Valores t3 (s)	100	170	150	115	21	136	21
Queima até o fixador	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Queima do algodão	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

Fonte: O autor (2020).

Valor t1 e t2: Média aritmética em relação aos 5 corpos de prova.

Soma t1 + t2: Somatório t1 e t2 dos 5 corpos de prova.

Valores t3: Tempo de pós luminescência depois da segunda chama.

No ensaio de queima vertical conforme UL 94, observou-se que o compósito sem retardante de chamas sofre ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação de chama ao corpo de prova, o que impede que o material possua qualquer tipo de classificação conforme a UL 94.

Os compósitos contendo retardante de chama 30 A e 50 A, também sofrem ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação da chama ao corpo de prova, o que também impede que o material possua classificação conforme UL 94. Ribeiro *et al.* (2013), avaliaram a flamabilidade de compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibra de folha de abacaxizeiro. Ao incorporar 20 % em massa e 40 % em massa de alumina o compósito sofre ignição, seguida de queima autossustentada. No compósito contendo 60 % em massa de retardante, na primeira aplicação de chama por 10 s, o corpo de prova sustenta a chama por 40 s e se apaga. Na segunda aplicação da chama ocorre a autossustentação da chama, o que impediu qualquer classificação do compósito, conforme a norma UL 94.

Assim, comprova-se que a alumina atua como retardante de chama, porém, apesar de aumentar o tempo médio de queima, devido a mesma desidratar e liberar vapor de água durante o processo de queima, necessita-se incorporar grande quantidade na resina para que o efeito de retardante de chama seja percebido.

Para os compósitos contendo 30 F, na primeira aplicação de chama por 10 s, cada corpo de prova sustenta a chama por 23 s e se apaga, no entanto, na segunda aplicação da chama (conforme orienta a norma), ocorre a autossustentação da chama o que impede que o mesmo seja classificado na norma. Já para o compósito 50 F, na primeira aplicação de chama por 10 s, a mesma se apaga após a retirada do fogo, na segunda aplicação cada corpo de prova queima por 21 s e após a chama se apaga, Conforme a Tabela 8 não houve queima até o fixador e nem queima do algodão, assim esse material recebe a classificação V1.

Redwan *et al.* (2019) avaliaram o efeito do tris (1,3-dicloroisopropil) fosfato como retardante de chama em compósitos de PU. Foram adicionados 3 %, 6 % e 9 % em massa do retardante de chama. Apesar da taxa de queima ter sido menor para o PU aditivado com retardante de chamas, o mesmo sofreu ignição seguida de uma queima autossustentada.

Para os compósitos contendo 30 D, na primeira aplicação de chama por 10 s, cada corpo de prova sustenta a chama pôr em torno de 11 s e se apaga, porém, ao aplicar a segunda chama (conforme orienta a norma), tem-se a autossustentação da chama o que impede que o mesmo seja classificado na norma. Para o compósito contendo 50 D, na primeira aplicação de chama por 10 s, a mesma se apaga após a retirada do fogo, na segunda aplicação cada corpo de prova queima por 21 s e após a chama se apaga, conforme Tabela 8, não houve queima até o fixador e nem queima do algodão, assim esse material recebe a classificação V1.

Jianzong e Shiyuan (1990) avaliaram o mecanismo de ação retardadora de chama de tris (2, 3-dicloroisopropil) fosfato em resina epóxi. Foram adicionados 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 30 % e 50 % em massa de retardante. Após o teste de LOI, constatou-se que concentrações a

cima de 10 % já atingiram LOI superior a 28 %, o qual considera-se o material auto extingüível. Devido ao fato de Jianzong e Shiyuan avaliarem apenas a queima apenas da resina, e não o compósito (resina e fibra de vidro), pode ter contribuído para que se tenha um material auto extingüível com um menor teor de aditivos adicionados.

Desse modo vê-se que os teores de aditivos não halogenados não foram suficientes para atender a norma estabelecida. Para os aditivos halogenados 30 D e 30 F, apesar de mostrar melhor desempenho em relação aos aditivos não halogenados, também não atenderam a norma estabelecida. Já os aditivos halogenados 50 D e 50 F apresentaram bom desempenho, recebendo a classificação V1 conforme a norma UL 94. Apesar de esperar um melhor resultado do aditivo F do que do D por possuir mais cloro em sua composição, observou-se resultados semelhante ao final dos testes.

5 CONCLUSÃO

Conforme visto, apesar da resina sofrer um aumento de viscosidade ao ser incorporada com os aditivos retardadores de chama, todas as formulações avaliadas apresentaram boa fluidez da resina sobre a fibra de vidro no momento da injeção do compósito.

Em relação ao tempo de cura, constatou-se que com o aditivo não halogenado a resina tem um tempo de cura inferior aquele observado para os aditivos halogenados. Verificou-se também que o aumento no teor de incorporação de aditivos halogenados a resina aumentou o tempo de cura.

Em todos os compósitos ocorreu redução das propriedades mecânicas avaliadas ao adicionar diferentes teores de retardante de chama. Notou-se que a alumina torna o material mais rígido e menos flexível.

Com relação a flamabilidade, os compósitos com 30 A e 50 A sofrem ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação de chama ao corpo de prova, o que impede que o material possua classificação conforme UL 94. Para os compósitos contendo 30 D e 30 F na primeira aplicação de chama por 10 s, cada corpo de prova sustenta a chama de 10 a 11 s e se apaga, no entanto, na segunda aplicação da chama, ocorre a autossustentação da chama o que impede que o mesmo seja classificado na norma UL 94. Já os compósitos contendo 50 D e 50 F obtiveram melhor desempenho, sendo classificados como V1 conforme a norma UL 94.

Assim os compósitos com 50 D e 50 F mostraram melhor desempenho em relação a flamabilidade, porém o alto teor utilizado, faz com que as peças utilizadas na área automobilística tenham suas propriedades mecânicas reduzidas. Contudo, o compósito com o aditivo 50 D obteve melhores propriedades mecânicas que o compósito com 50 F. Em suma, melhora-se a o efeito retardante de chama do compósito, o que reflete em segurança para os usuários de veículos coletivos, porém reduz-se a resistência mecânica do material. Desse modo deve-se analisar a viabilidade do uso de aditivos retardante de chamas de forma mais aprofundada, para que não prejudique o desempenho dos automóveis.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Buscar aditivos não halogenados líquidos;
- Realizar teste de queima horizontal;
- Avaliar a composição química dos gases liberados durante a queima;
- Realizar teste de DSC (calorimetria exploratória diferencial) na cura da resina;
- Testar diferentes teores de aditivos halogenados;
- Avaliar o tempo de cura do compósito com diferentes percentuais de catalisador.

REFERÊNCIAS

ABMACO (Brasil) (Ed.). **Compósitos 1**: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências. São Paulo: Associação Brasileira de Materiais Compósitos - Abmaco, 2008.

ABMACO (Brasil) (Ed.). **Compósitos 2**: Tecnologia e Processos. São Paulo: Associação Brasileira de Materiais Compósitos - Abmaco, 2009.

ALVES, A. L. dos S. **Processamento de placas compósitas pela técnica de moldagem por infusão de resina de seemann (scrimp)**. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

ALVES, A.M; ARAÚJO, A. P. M; AGRAWAL, P; CAVALCANTI S. N; ARIMATÉIA, R. R; FREITAS, N. F. de; MÉLO, T.J. Influência da alumina sintetizada por reação de combustão nas propriedades de compósitos com matriz de polipropileno. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n.04, e-12230, dez. 2018. DOI: 10.1590/S1517-707620180004.0564.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3878-16**: Standard terminology for composite materials. United States, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 2471-99**: Standard test method for gel time and peak exothermic temperature of reacting thermosetting resins. United States, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 638-14**: Standard test method for tensile properties of plastics. United States, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 790-17**: standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. United States, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D256-10**: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. United States, 2010.

AMORIM JÚNIOR, W. F. de.; CHAVES, G. Q.; CALADO, V. M. A.; BASTIAN, F.L. Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina. **Matéria**, Rio de Janeiro, v 11, n 3, p. 316-323, jun/set. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9277/08**: Determinação da viscosidade - Método do viscosímetro Brookfield. Rio de Janeiro, 2014.

BAGGIO, A. **Aproveitamento dos resíduos de compósitos à base de resina poliéster e fibra de vidro**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp. Botucatu, 2005.

BORGES, S.G. **Influência das variáveis de processo nas propriedades de barras sólidas pultrudadas**. 2016. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

CAETANO, M.J.L. **CTM- ciência e tecnologia da borracha**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-termicas/flammabilidade/indice-limite-de-oxigenio-loi/>. Acesso em: 14 abr. 2020.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CAVANI, C.S. **Estudo das características de inflamabilidade de polímeros utilizados na construção civil e indústria de transportes**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

DE PAOLI, M.A.; RABELLO, M. **Aditivação de termoplásticos**. 1. ed. São Paulo: Artliber 2013.

DIAS, D. **Comportamento ao impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2009.

FABUS - **Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus**. Disponível em: <https://www.fabus.com.br/pdfs/2020-03.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.

GALLO, J.B.; AGNELLI, J.A.M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 8, n.1, p. 23-38, jan/mar. 1998.

GORNINSKI, J. P. **Estudo da influência das resinas poliéster Isoftálica e Ortoftálica e do teor de cinza volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto de polímero**. 2002. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

GORNINSKI, J. P.; TONET, K. G. Avaliação das propriedades mecânicas e da flammabilidade de concretos poliméricos produzidos com resina PET e retardante de chamas reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 69-88, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000200080>.

GUTIÉRREZ, J. C. H.; RUBIO, J. C. C.; FARIA, P. E. de; DAVIM, J. P. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711-719, nov/dez. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1582>.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 107-114, abr./jun. 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282003000200008>.

JARAMILLO-ZAPATA, L. Y; PATINO-ARCILA, I. D. Selection of unsaturated polyester resins for closed resin transfer moulding processes. **TecnoLógicas**, Medellín, n. 28, p. 109-127, jan./jun. 2012.

JIANZONG, L.; SHIYUAN, C. Mechanism of flame-retardant action of tris (2,3-dichloropropyl) phosphate on epoxy resin. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.l.], v. 40, n. 3-4, p. 417-426, Aug.1990.

LEE, G.-W; LEE, N.-J; JANG, J; LEE, K.-J; NAM, J.-D. Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (RTM) of glass-fibre/unsaturated-polyester composites. **Composites Science and Technology**, [S.I.], v. 62, n. 1, p. 9-16, Jan. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538\(01\)00091-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00091-4).

LENS, J.; SUN, X.; KAGUMBA, L. Polymeric flameretardants for reinforced thermoplastic and thermoset resins. **Reinforced Plastics**, [S.I.], v. 63, n. 1, p. 36-39, Jan. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.repl.2017.11.016>

MARCOPOLO. Disponível em: <https://www.marcopolo.com.br/marcopolo>. Acesso em 20 abr. 2020.

MARTINS, J.C.; MARTINELLO, K; POLLA, M. B.; FERNANDES, M. P.; DOMINGUINI, L.; FIORI, M. A. Avaliação das propriedades retardantes de chama de hidróxidos de magnésio e alumínio com fibra de vidro em polipropileno. *In*: SEMINÁRIO DE PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO DO IF-SC, - SEPEI, 1. 2011. Criciúma. **Anais [...]**. Criciúma, 2011. Disponível em: <http://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/viewFile/319/243> . Acesso em 23 abr. 2020.

MATTOS NETO, C.; MELO, J.C.S.; ROCHA, P.M.; BARREIROS, A. de M. L. S.; VERNECK, L.A. A utilização dos polímeros na indústria automobilística. *In*: CONGRESSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL. 9. 2015. Campo Mourão. **Anais [...]**. Campo Mourão, 2015. Disponível em: http://www.fecilcam.br/anais/ix_eepa/data/uploads/10-educacao-em-engenharia-de-producao/10-01.pdf. Acesso em 08 mai. 2020.

NEVES, J.H. **Análise da integridade do quartzito itacolomi colado com diferentes resinas**. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT. Ouro Preto, 2006.

NOGUEIRA, J. de S.; SILVA, A. L. B B.; DA SILVA, E. O. Introdução a polímero. *In*: SEMANA DE QUÍMICA – ETFMT, 2. 2000. Mato Grosso. **Anais [...]**. Mato Grosso, 2000. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000223.pdf>. Acesso em 21 abr. 2020.

OWENS CORNING – **Mantas de fibra contínua**. Disponível em: <https://www.owenscorning.com.br/pt-br/compositos-produtos-produto?id=74> .Acesso em 27/03/2020.

PIERONI, M. C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. Retardantes de chama bromados: uma revisão. **Química Nova**, São Paulo, v.40, n.3, p. 317-326, 29 set. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20160176>.

REDWAN, A. M; BADRI, K. H; BAHARUM, A. Effect of tris(1,3-dichloroisopropyl) phosphate as flame retardant on mechanical properties and fire resistivity of PU composites. **Al-Nahrain Journal of Science**, [S.I.], v. 22, n. 1, p. 33-39, Mar. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22401/anjs.22.1.05>

REIS, L. R. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.

RIBEIRO, L.M.; LADCHUMANANANDASIVAM, A.O.; BELARMINO, D.D. Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf). **Holos**, Natal, v.1, ano 29, p. 115 – 126, fev. 2013.

ROCHA, I.G. **Influência do retardante de chamas nas propriedades mecânicas e na flamabilidade em compósitos poliméricos de epóxi/fibra de carauá**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

RUDD, C.D; LONG A.C; KENDALL, K. N; MANGIN, C. G. E. **Liquid moulding technologies**: resin transfer molding, structural reactions injection moulding and related processing techniques. 1. ed. Cambridge: Woodhead publishing limited, 1997.

SANCHEZ, E. M. S. **Resina de poliéster insaturado: relação estruturas e propriedades. Influência de adição de copolímero poli(Estireno-b-isopreno-Estireno) nas propriedades mecânicas das resinas**. 1996. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1996.

SCHÄNFER, L. **Estudo de cargas cerâmicas que aumentam a condutividade térmica da resina epoxi, mas que mantêm elevadas a resistividade elétrica e a rigidez dielétrica**. 2020. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2020.

SIREGAR, A. H.; SETYAWAN, B.A.; MARASABESSY, A. Flame retardant properties of composite fiberglass reinforced unsaturated polyester resin. **American Institute of Physics**, [S.I.], v.1, n. 50007, p.1-5, Jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5046280>.

SOARES, M. R. F. Materiais compósitos, aspectos gerais e aplicações. Universidade de Caxias do Sul. 2017. Disponível em: <https://www.ucsminhaescolha.com.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

TARGA, G. N.; PIRES, E. N.; AL-QURESHI, H. A. BARRA, G. M. O. Produção e caracterização de um compósito de fibra de juta e resina de poliéster insaturado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10, 2009. Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2009. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/1287.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2020.

UL94-HB. UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL94-HB**: Test for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances, horizontal method, 2001.

UL94-HV. UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL94-HV**: Test for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances, vertical method, 2001.

UL-94. UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL 94**: Standard for safety of flammability of plastic materials for parts in devices and appliances testing, 2006.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 28 mar. 2020.

WANG, Y.; ZHANG, L.; YANG, Y.; CAI, X. The investigation of flammability, thermal stability, heat resistance and mechanical properties of unsaturated polyester resin using AlPi as flame retardant. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 122, n. 3, p. 1331-1339, July 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-015-4875-7>.

ZIGLIOLI, E.; CONTO D. de; POLIDORO T. A. Avaliação do custo e desempenho de um *gel coat*, baseada na avaliação de suas cargas minerais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 5. 2016. Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, 2016. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=569&ano=_quinto. Acesso em: 21 abr. 2020.