

ASPECTOS DO COMPORTAMENTO DE ISOLANTES TÉRMICOS E ACÚSTICOS DE PULIURETANO EM INCÊNDIO

BEHAVIOR ASPECTS OF THERMAL INSULATION AND SOUNDPROOFING OF POLYURETHANE IN FIRE SITUATIONS

Lisiane Ilha Librelotto¹

Luciano da Silva²

Rachel Faverzani Magnago³

Victor Leibnitz Hipolito⁴

Resumo: O artigo trata do uso do pó de vidro como retardante de chama em Poliuretano para o uso como isolante térmico/acústico em edificações. Esta pesquisa analisa o comportamento PU, PU_vidro e compara com retardantes de chama comerciais em situações de incêndio, através do teste de flamabilidade de materiais plásticos (UL 94). Para tanto, faz-se uma revisão bibliográfica acerca do relacionamento da especificação do material, como a necessidade de sustentabilidade das edificações, o conceito de isolamento e suas potencialidades de aplicações em sistemas de cobertura, pisos, vedações verticais e esquadrias, propriedades dos materiais e influências no tratamento térmico e acústico de edificações, normas técnicas pertinentes, tipos de soluções tecnológicas possíveis para situações de incêndio e as consequências do emprego do poliuretano. Por fim, conclui-se que o emprego do poliuretano deve ser acompanhado da adição de retardantes de chamas mais eficientes e atóxicos, sendo uma possibilidade o uso do resíduo do pó de vidro para que os materiais isolantes em situação de incêndios apresentem-se menos nocivos à saúde humana.

Palavras-chave: Inflamabilidade de polímeros, retardantes de chama, poliuretano.

Abstract: The paper deals with the glass powder used as a flame retardant in polyurethane for use as thermal insulation and sound proofing in buildings. This study examines the PU, PU_glass behavior, and compares with commercial flame retardants in fire situations through the flammability test of plastic materials (UL 94). Thereunto, a literature review was necessary on the material specification, such as the need for sustainability of buildings, the concept of isolation and its potential applications in roofing systems, flooring, vertical seals and frames, materials properties and influences on thermal and acoustic treatment of buildings, relevant technical standards, types of possible technological solutions for fire situations and polyurethane employment consequences. Finally, we concluded that polyurethane employment must be accompanied by addition of more efficient and non-toxic flame retarders, with the possibility to use the glass powder residue, in order to present insulating materials for fire situation less harmful to human health.

Keywords: Polymers flammability, Flame retardants, Polyurethane.

1. INTRODUÇÃO

O crescente uso de materiais poliméricos em estruturas, equipamentos e acessórios em edificações, aliado as necessidades de isolamento acústico e térmico destes e somando-se às diversas tragédias que se sucederam envolvendo incêndios em ambientes domésticos ou coletivos, têm-se estabelecido orientação, fiscalização e controle quanto ao uso de polímeros

1 Dr., Universidade Federal de Santa Catarina

2 Dr. Pesquisador de Produtividade em pesquisas do CNPq

3 Dr. Universidade do Sul de Santa Catarina

4 Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina

principalmente em materiais de construção. No ano de 2013, uma tragédia de grandes proporções repercutiu nos mais diversos meios de comunicação nacionais e internacionais: o incêndio em uma boate em Santa Maria (RS) (Mendonça, 2014). Diversas falhas de segurança foram determinantes para o ocorrido, no entanto devem-se ressaltar a característica de alta inflamabilidade das espumas de poliuretano, as quais compunham o isolamento acústico do ambiente em questão.

Existem diferentes maneiras de se reduzir a inflamabilidade dos polímeros, podem ser agrupadas de modo geral nas seguintes categorias: Uso de agentes retardantes de chama reativos (modificação química dos polímeros); Uso de agentes retardantes de chama aditivos (incorporação física); Aplicação de revestimentos antichama; Combinação de vários métodos. A introdução física de substâncias retardante de chama é o mais usual e ocorre, geralmente, no decorrer do processamento de extrusão ou injeção do polímero, e também apresenta vantagens com relação aos custos de matéria-prima e de incorporação.

A presença de um retardante de chama em polímeros é fundamental quando este for utilizado como isolante térmico e acústico em edificações. Estes compostos desempenham um papel vital no salvamento de vidas em sinistros de incêndio reduzindo ou inibindo o processo de queima nos materiais inflamáveis após o início da combustão, com a inibição ou retardamento do tempo de queima possibilita a evacuação do ambiente confinado. Então, os pesquisadores assumem a tarefa de desenvolver materiais eficientes para esta finalidade.

1.1 ISOLAMENTO TÉRMICO/ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES E A SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade traz consigo a necessidade de que as edificações tenham um comportamento que minimize as trocas térmicas e acústicas com o meio ambiente. Carvalho (2009) coloca a necessidade de que o edifício, para ser considerado sustentável, possua um bom desempenho nas questões econômicas, sociais e ambientais. Assim, passam a ser considerados fatores como: Uso do solo; Consumo de água; Consumo de energia; Consumo de materiais; Resíduos (R); Saúde, higiene e qualidade de vida; Conforto eletromagnético; Conforto tátil e antropodinâmico; Ventilação; Conforto Acústico; Conforto lumínico; Conforto higro-térmico; Durabilidade / Manutenibilidade; Segurança (estrutural, fogo, uso e operação); Estanqueidade; Habitabilidade, funcionalidade e flexibilidade; Construtibilidade Infraestrutura; Conforto e Saúde; Qualidade da Habitação; Relacionamento com a Comunidade Local; Participação; Herança Cultural; Políticas Públicas; Educação Ambiental;

Características de contratação da Empresa Construtora; Projetistas; Fornecedores para a Empresa de Projetos; Usuários; Segurança; Fortalecimento da Economia Local; Viabilidade Econômica (VE); Custo de Construção / Operação / Manutenção e os Critérios Econômicos para Empresa de Projeto (CEP).

Desta grande quantidade de fatores resultam duas constatações: de que o projeto para o edifício sustentável deve considerar uma complexa associação de fatores que exige conhecimento interdisciplinar dos profissionais projetistas e que o edifício isolado não pode ser sustentável por si, sem que a ele se apliquem as condições sistêmicas.

A sustentabilidade é uma inovação no setor de construções, e segundo Mahfuz (1995), é muito difícil inovar um projeto no todo. As inovações são pontuais. Fazendo uma analogia com o projeto, onde o detalhe construtivo é mais passível de inovações. Pode-se iniciar uma mudança inovando em sistemas de reutilização de resíduos, por exemplo, ao invés de modificar uma indústria inteira. Esse é o Método Inovativo, inovativo no sentido de modificar, pensamentos e práticas (MAHFUZ, 1995).

Assim neste artigo interessam particularmente as questões relativas aos detalhes construtivos que asseguram o bom desempenho térmico e acústico dos componentes da edificação, em geral assegurado pelas propriedades dos seus materiais constituintes.

Os materiais devem possuir características de resistência aos esforços e deformabilidade, estabilidade dimensional e necessidade de inserção de juntas de dilatação/movimentação, exclusão de água e vapor, resistência ao fogo, durabilidade e propriedades térmicas e acústicas.

As propriedades térmicas dos materiais dizem respeito a absorvidade, refletividade, transmissividade, emissividade, condutividade térmica e calor específico. Já as propriedades acústicas dizem respeito à capacidade de isolamento (em geral materiais pesados como o chumbo, concreto, entre outros) e ou de condicionamento/absorção do som (materiais leves, fibrosos ou de poros abertos) como as espumas, fibras cerâmicas e de vidro, tecidos e carpetes.

Logo, para o edifício sustentável devem ser projetados os detalhes e especificados os materiais constituintes de coberturas, pisos, elementos de vedação (paredes), esquadrias e forros no que se refere a melhoria do desempenho térmico e acústico do ambiente. Estes componentes influenciarão diretamente na eficiência energética do edifício (assegurando menor consumo de energia), na gestão da água (menor uso de água em aparelhos de condicionamento de ar), no conforto acústico e térmico. Por outro lado, incidirão

indiretamente nas questões relativas ao comportamento higroscópico dos componentes, na durabilidade, construtibilidade e manutibilidade da edificação, definida pela NBR 15575 (ABNT, 2013) em todas as suas partes.

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013) os sistemas da edificação, no que se refere à segurança contra incêndio, devem ser projetados de forma a:

Proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;

Dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;

Proporcionar meios de controle e extinção do incêndio;

Dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros.

Do ponto de vista ambiental, de acordo com Roaf (2006), a seleção dos materiais deve considerar ainda o impacto ambiental provocado pela extração do material da natureza. Segundo a autora os polímeros possuem uma energia incorporada extremamente alta. Acrescenta-se a isto sua proveniência, na maioria de fontes não renováveis e com elevadas cargas de adição de componentes químicos nocivos à saúde humana.

Para Roaf (2006) a energia incorporada dos plásticos é extremamente alta. [...] Depois de sua produção, os plásticos tendem a soltar gases na atmosfera, chamados de compostos orgânicos voláteis (VOCs), os quais podem ser prejudiciais se inalados em qualquer quantidade.

A autora aponta uma série de estratégias para as construções denominadas passivas e que envolvem o uso de quebra-ventos, o controle da emissão de particulados (poeira); o condicionamento natural do ar, as barreiras de som, uso de lagos de resfriamento, armadilhas de sol, resfriadores subterrâneos, coletores de vento, uso das superfícies dos pisos externos como elementos condicionadores de ar, quebra-ventos, isolamento térmico e localização (disposição e orientação de ruas, árvores, ventos dominantes). O cuidado no emprego destas estratégias pode minimizar a necessidade do uso de isolantes térmicos e acústicos incorporados aos sistemas da edificação (ROAF, 2006)

1.2 ISOLAMENTO TÉRMICO/ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES: TIPOS E MATERIAIS

A condutividade térmica é a propriedade que caracteriza o fluxo de calor transferido por unidade de espessura e por unidade de gradiente de temperatura, medido em $W/m.^{\circ}C$ e define-se que os materiais com menor densidade (kg/m^3) possui também menor condutividade térmica, podendo serem definidos como materiais isolantes (caso do Poliuretano). Desta mesma forma materiais com menor densidade tendem a possuir menor calor específico (quantidade de calor necessário para elevar de em um grau a temperatura de um componente, por unidade de massa).

Convencionalmente, utiliza-se como materiais isolantes térmicos as fibras (lã de rocha ou lã mineral, a lã de vidro, lã de PET ou mesmo a lã de ovelha natural); o poliestireno (expandido ou extrudado), a espuma de poliuretano; o concreto celular e os agregados leves na forma de vermiculita, argila expandida, cinza e escória sinterizada.

Estes materiais podem ser incorporados em sistemas de cobertura (telha sanduíche – metálica com miolo de poliuretano), em sistemas de pisos com contrapisos flutuantes, em forros, ou entre as placas de sistemas de vedação/paredes, na forma de chapas, placas, placas aluminizadas, mantas, espumas projetadas, tubos rígidos ou feltros isolantes.

A NBR 15220 (2003) estabelece as características que devem ser observadas no projeto de edificações de forma a assegurar um bom desempenho térmico conforme o enquadramento nas zonas bioclimáticas Brasileiras.

Em relação a acústica, diversas estratégias podem ser utilizadas como o uso de sistemas compostos de massa/mola/massa. Assim uma parede de alvenaria isola cerca de 45 dB, enquanto que uma parede dupla isolaria 55dB e pode-se compor grande variação de soluções com o uso de placas de poliuretano aderidas a outros materiais ou espumas de poli-éter-uretano autoextinguíveis.

Nas esquadrias pode-se usar vidros duplos, com ou sem preenchimento de gases. Para forros podem ser utilizadas mantas de polietileno. A Figura 1 mostra o poliuretano utilizado como isolante térmico e acústico nas edificações em diversos subsistemas.

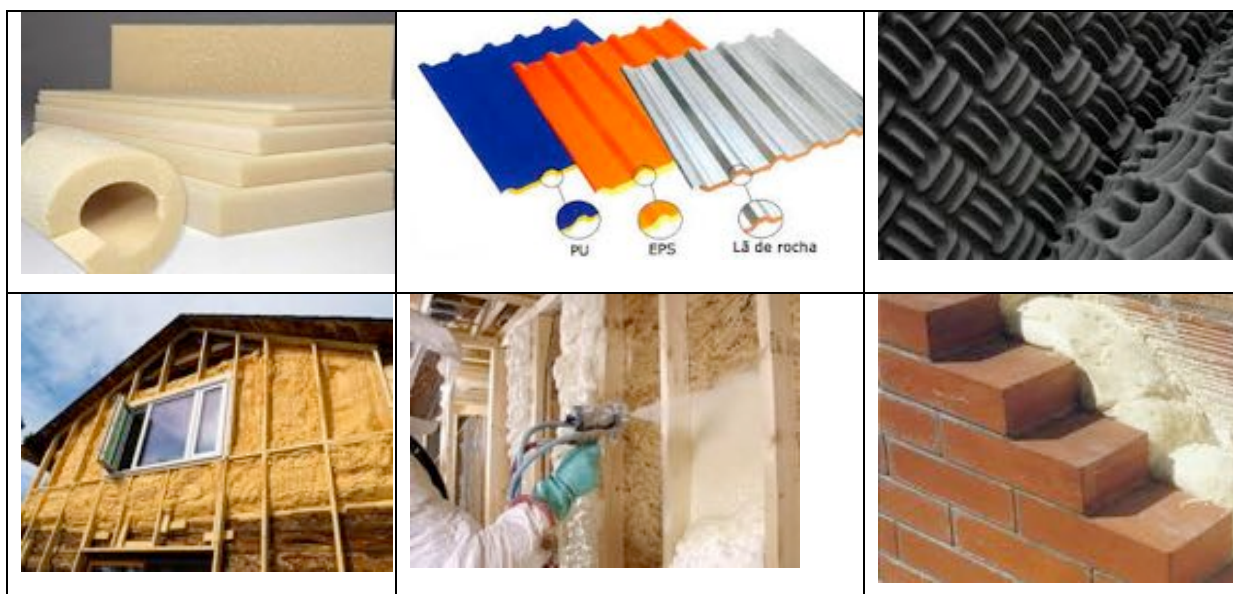


Figura 1: Aplicações do polituretano como isolante em tubos, placas, telhas do tipo sanduíche, painéis de forro, interior de paredes em Wood Frame ou entre paredes duplas de alvenaria.

Fonte: Termobras (2016), Google images (2016).

A NBR 10152 (ABNT, 2000) fixa os níveis de ruídos compatíveis com o conforto acústico dos ambientes conforme ilustrado no Quadro 1. A NBR 10151 (ABNT, 1992) estabelece as formas de avaliação do ruído nas edificações.

Locais	dB(A)	NC
Hospitais		
Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros cirúrgicos	35 – 45	30 – 40
Laboratórios, Áreas para uso do público	40 – 50	35 – 45
Serviços	45 – 55	40 – 50
Escolas		
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	35 – 45	30 – 40
Salas de aula, Laboratórios	40 – 50	35 – 45
Circulação	45 – 55	40 – 50
Hotéis		
Apartamentos	35 – 45	30 – 40
Restaurantes, Salas de estar	40 – 50	35 – 45
Portaria, Recepção, Circulação	45 – 55	40 – 50
Residências		
Dormitórios	35 – 45	30 – 40
Salas de estar	40 – 50	35 – 45
Auditórios		

Quadro 1: Níveis de ruído aceitáveis ao conforto acústico. Fonte NBR 10152 (2000).

1.3 FOGO E ETAPAS DE UM INCÊNDIO

A combustão é uma sucessão complexa de processos físicos e químicos em que as substâncias reagem com o oxigênio atmosférico liberando calor e formando produtos como água, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). Incêndio (do latim *incendium*) é o fogo de grandes proporções que destrói aquilo que não estava destinado a ser queimado. O surgimento de um incêndio implica a ocorrência de fogo fora de controle, com risco para os seres vivos, os edifícios e qualquer estrutura. Durante a queima de um substrato combustível ocorre a liberação de fumaça e/ou vapores que contenham vários elementos químicos inflamáveis que, na maioria das vezes, ocorre liberação simultânea de gases potencialmente tóxicos. A quantidade de fumaça liberada dependerá de inúmeros fatores, como por exemplo, fonte de ignição, disponibilidade de oxigênio no ar e a constituição e propriedades do material

combustível (BRYDSON, 2000). Segundo Mouritz, et al (2000), o processo de queima passa por quatro etapas, a saber:

- ✓ Ignição: Este é o ponto quando a fonte de combustível entra em ignição e mantém a combustão.

- ✓ Crescimento: O crescimento inicial de um incêndio depende principalmente do próprio combustível, com pouco ou nenhuma influência dos materiais combustíveis no interior do compartimento. O fogo vai crescer e a temperatura do compartimento continuará a aumentar se o combustível for suficiente e o oxigênio estiver disponível. Muitas vezes, é nessa fase que os materiais compósitos expostos à chama entrarão em combustão quando a temperatura for superior a 350-500 °C.

- ✓ Flashover: Isso ocorre quando o fogo está totalmente desenvolvido e todos os itens combustíveis, do compartimento (incluindo os materiais compósitos) estão envolvidos no incêndio. Flashover, geralmente, ocorre quando a temperatura média do gás na parte superior da sala excede cerca de 600 °C.

- ✓ Completo desenvolvimento do fogo: este estágio ocorre quando a taxa de calor liberado e a temperatura do fogo são altas. A temperatura máxima de pico típico pode chegar a 900-1000 °C, embora em alguns casos pode chegar a 1200 °C.

- ✓ Decaimento: A fase final ocorre quando o combustível e os materiais combustíveis tornam-se insuficientes para a queima, fazendo com que a temperatura do compartimento passe a cair.

Obviamente, a decadência também pode ser causada por sistemas de supressão de fogo. Com o advento de leis cada vez mais exigentes faz-se necessário o desenvolvimento de materiais cada vez mais resistentes a degradação e que apresentem menores índices de toxicidade.

O triângulo do fogo é formado pelo calor, combustível e oxigênio. Quando se remove um dos três componentes do fogo a chama se extingue, e é justamente um ou mais desta trindade que os retardantes de chama atuam. É possível que o retardante de chama atue sobre o calor, através da liberação de água durante o processo de combustão diluindo os gases inflamáveis, assim como é possível que o efeito seja por meio da formação de uma camada carbonizada sobre a superfície polimérica tendo a função de isolar o material polimérico, evitando o contato do oxigênio com a superfície do substrato, o retardante também pode

reagir com um dos combustíveis do fogo formando compostos incombustíveis resultando na extinção do fogo (RABELLO, 2000; BRYDSON, 2000).

Em muitos casos, isto só pode ser conseguido pela incorporação de cargas que sejam retardantes de chama aos polímeros. Entretanto, com a adição do agente para interrupção ou retardo do mecanismo que desencadeia a reação, quase sempre contribui para o aumento do nível de fumaça uma vez que eles suprimem as reações de oxidação que ocorrem durante a combustão e promove a formação de fuligem (BRYDSON, 2000)

Muitos são os polímeros que no processo de fabricação incluem o retardantes de chama. Exemplos são o processamento de policloreto de vinilo (PVC), nitrato de celulose, borrachas cloradas, borrachas nitrílicas e borrachas de estireno-butadieno. (SCHWARCZM, 2005). São exemplos de retardadores de chama o hidróxido de alumínio hidratado (ATH), trióxido de antimônio (Sb_2O_3), hidróxido de magnésio $Mg(OH)_2$, boratos e halogenados em geral (RX, onde R é um radical orgânicos e X um halogênio) (GALLO et al., 2001).

1.4 RETARDANTE DE CHAMA

Durante a combustão, com o fornecimento de energia a taxa da temperatura aumenta, dependendo do material e do calor específico, densidade, condutividade térmica, calor latente e o calor de evaporação (GACHTER, 1993).

A combustão é iniciada por aquecimento de um material plástico no ponto de decomposição. Numerosos combustíveis são formados a partir da decomposição, como por exemplo, hidróxi, carbonos, hidrogênio e monóxido de carbono. Estes gases de pirólise são misturados com o oxigênio do ar e atingim o limite de ignição e o combustível passa a alta ignição (GACHTER, 1993; GALLO et al., 2001).

A reação dos gases do combustível com o oxigênio do ar é uma reação exotérmica, a qual fornece energia a um dado patamar, por consequência ultrapassa os endotérmicos da reação de pirólise e inicia a propagação da chama. A incorporação de um retardante de chamas ao material poderia inibir ou mesmo suspender o processo de combustão.

Em polímeros que não são autoextinguíveis, como o Politetrafluoretileno (PTFE) ou o Polyether ether ketone (PEEK), os retardantes de chama são usados para diminuir a velocidade de queima e provocar o término da chama. Recomenda-se em alguns casos, como isolamento em edificações públicas, usar também aditivos antiestáticos que impedem a geração de faíscas e choques elétricos (Oliveira e Coutinho, 2006),

O agente retardante de chama interfere na combustão durante um estágio particular do processo de queima. Isto é, pode atuar durante o aquecimento, decomposição, ignição, na combustão ou propagação das chamas (GALLO et al., 2001).

Dependendo da natureza do material, o retardante pode atuar quimicamente e/ou fisicamente no polímero, em qualquer uma das fases: no estado sólido, líquido e gasoso.

A ação física do retardante de chama em polímero são três os modos pelos quais o processo de combustão pode ser retardado. Por resfriamento, que consiste em processos endotérmicos, o agente retardador resfria o substrato a temperaturas abaixo das requeridas para a ocorrência de pirólise; A segunda maneira é por formação de camada protetora, onde fase condensada do substrato combustível é isolada da fase gasosa por uma camada protetora sólida ou gasosa. O processo de retroalimentação térmica é retardado ou interrompido, o que causa resfriamento da fase condensada, inibindo a pirólise. A formação da camada protetora, que também reduz ou impede a transferência de gases combustíveis para a região de queima gasosa, o que contribui para a inibição das reações de combustão; E por diluição, onde a incorporação de aditivos que liberam gases inertes quando decompostos, dilui os combustíveis nas fases sólida e gasosa, de modo que o ponto de fulgor do material se torna mais elevado.

Quanto a ação química dos retardantes de chama, as reações químicas mais significativas que interferem no processo de combustão ocorrem nas fases sólida e gasosa.

Na fase gasosa, o retardante de chama interrompe a ação dos radicais livres no processo da combustão. Os fenômenos exotérmicos são assim interrompidos, causando o resfriamento do sistema como um todo, o que diminui a evolução de gases inflamáveis até eventualmente a completa extinção.

Na fase sólida, são possíveis dois tipos de reações. Em primeiro lugar, o retardante de chama pode acelerar o processo de fragmentação do polímero, causando um fluxo pronunciado dos fragmentos para fora da esfera de influência da chama, que por falta de combustível, se reduz ou é extinta; em segundo lugar, o retardante de chama pode causar a formação de uma camada de carbono na superfície do polímero, a qual atuará fisicamente como uma camada protetora. Isto pode ocorrer por exemplo, pela ação desidratante do agente sobre o polímero, gerando ligações duplas, as quais podem provocar a carbonização da superfície através de ligações cruzadas e ciclização.

Bem como, pode-se observar os efeitos sinérgicos. A combinação de retardantes com diferentes modos de ação pode produzir efeitos complementares, sinérgicos ou antagônicos.

Enquanto o efeito complementar é a soma das ações individuais, os outros efeitos são maiores e menores respectivamente que a soma de suas ações isoladas. Os efeitos sinérgicos são de grande importância prática. É comum o fato de certo retardante de chama ter pouco ou nenhum efeito quando usado isoladamente mas reduzir significativamente a quantidade necessária de outro retardante, usualmente mais caro, quando ambos são usados em conjunto. Um caso típico de sinergia é o uso de retardantes de chama halogenados juntamente com trióxido de antimônio (ARTIGO, 1998).

1.4.1 RETARDANTES DE CHAMA ADITIVOS DE COMPOSTOS INORGÂNICOS

Poucos compostos inorgânicos são convenientes para serem usados como retardantes de chama em polímeros, uma vez que tais compostos são demasiadamente inertes para serem efetivos no intervalo de temperatura de decomposição dos polímeros, entre 150 e 400°C (GACHTER, 1993). O retardante inorgânico mais amplamente usado é o hidróxido de alumínio ou magnésio e compostos contendo boro e fósforo que afetam o processo combustão por meios físicos, quando a temperatura do incêndio atinge níveis entre 200 e 300°C. Ao contrário dos compostos orgânicos, os retardantes inorgânicos não evaporam sob a influência do calor, não se decompõem, liberam gases não-inflamáveis tal como a água ou o dióxido de carbono, que dilui a mistura de gases inflamáveis por meio de pirólise formando um escudo de superfície no polímero contra o ataque de oxigênio e troca térmica (GACHTER, 1993; GALLO et al., 2001; PUBRASIL, 2007). O hidróxido de alumínio (alumina) é o retardante de chama mais amplamente utilizado como aditivo em processamentos de plásticos, isto se deve ao baixo custo e a facilidade de incorporá-lo aos termoplásticos e a temperatura de decomposição (cerca de 220°C) (GACHTER, 1993, LE BRAS et al., 2005).

Entretanto, para a utilização de substâncias como retardante de chama, alguns pesquisadores usaram grandes cargas de alumina em seus estudos para alcançar bons resultados, em torno de 40% sobre o peso da matriz polimérica (VELASCO et al., 2002), o que acaba interferindo nas propriedades mecânicas do polímero, também reduz a homogeneidade da mistura (PUBRASIL, 2007).

O hidróxido de magnésio, tem atuação semelhante ao hidróxido de alumínio, mas possui uma temperatura de decomposição um pouco mais elevada (cerca de 250°C a 330°C), sendo indicado para polímeros com temperaturas de processamento elevadas como poliamidas e poliésteres (RABELLO, 2000). Por apresentar custo elevado em comparação ao

ATH é usado normalmente em polímeros que apresentam temperaturas de processamento superiores ao de decomposição do ATH (LE BRAS et al., 2005, GALLO et al., 2001).

1.4.2 RETARDANTES DE CHAMA ADITIVOS DE COMPOSTOS HALOGENADOS

São compostos carbohalogenados de fórmula geral RX, onde R é um radical orgânico e X um halogênio, que interferem no mecanismo de radicais livres em fase gasosa que dá origem ao processo de combustão” (GALLO et al., 2001). A eficácia dos retardantes de chama halogenados aumenta na seguinte ordem: $F < Cl < Br < I$. Retardantes a base de flúor e iodo não são usados na prática porque nenhum deles interfere no ponto de ignição exato do processo de combustão (GACHTER, 1993; RABELLO, 2000; GALLO et al., 2001).

Entre os halogênios cloro e bromo, o bromo é o mais efetivo permitindo a ‘soldagem’ do carbono através da captura do H da ligação gerando ácido halogenídrico correspondente possibilitando, desta forma, interferir no ponto mais favorável no processo de combustão, ou seja, no exato momento do ponto de fusão do polímero, dando oportunidade para que a substância inicie a sua atuação no mesmo instante. Presume-se que, o agente efetivo, brometo de hidrogênio é liberado através de uma estreita gama de temperatura possibilitando altas concentrações na zona de chama (GACHTER, 1993; BILLMEYER JR, 1984).

Nas matrizes que contém cloro, este é liberado na forma de cloreto de hidrogênio durante o processo de chama ignição, entretanto em uma vasta gama de temperatura. Como o HCl é liberado em uma larga faixa de temperatura, por consequência, a concentração torna-se baixa ao longo do tempo tornando o agente menos eficaz para combater a chama (GACHTER, 1993; BILLMEYER JR, 1984).

Retardantes de chama contendo compostos halogenados (Br e Cl) agem por interferência no mecanismo da cadeia do radical, esta reação se sucede fase gasosa. Os reais efeitos retardadores são produzidos pelo composto HX. O haleto de hidrogênio consumido é regenerado por reação com o substrato RH, permitindo assim a inibição da reação, com a regeneração torna-se possível iniciar o ciclo novamente. Desta forma, o haleto de hidrogênio funciona, em última instância, como um catalisador.

Desde a década de 1960, retardantes de chama bromados tem sido amplamente usados em uma variedade de polímeros e materiais plásticos que são aplicados de forma generalizada na sociedade moderna, pois apresentam-se, de modo geral, mais eficientes que os retardantes de chama inorgânicos (GACHTER, 1993). No entanto os retardantes de chama halogenados (Cl e Br) também devem ser substituídos por outros tão eficientes e menos tóxicos, tendo em

vista que os compostos cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio a toxicidade são gases corrosivos e tóxicos.

1.5 POLIURETANO

O poliuretano é um polímero termoplástico frequentemente utilizado na construção civil em função de seu excelente desempenho como isolante térmico e acústico (Guo et. Al, 2015; American Chemistry Council, 2012; Cangemi, 2009; Thiruma, 2007). A este respeito, as propriedades físico-químicas de poliuretano são importantes (FISPQ, 2015). Mendonça (2014), no entanto, alerta que esse material não é indicado para acabamentos de revestimento de superfície ou acabamento interno em edificações, pois ele não apresenta resistência ao fogo.

A espuma de poliuretano, quando levada à combustão completa, forma dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Contudo, em um ambiente fechado, como no caso de uso em edificações, ocorre a combustão incompleta, e o efeito da queima do material torna-se ainda mais perigoso, tendo em vista a diminuição de oxigênio no ar e a formação do monóxido de carbono (CO), além de favorecer a produção de cianeto de hidrogênio (HCN), também conhecido como ácido cianídrico ou gás cianídrico, conforme Vilar (1999).

Neste sentido, quando se estuda um material para uso como revestimento térmico e acústico, é importante estar atento às características de inflamabilidade. De acordo com a ABNT NBR 9178:2015, que foi desenvolvida com base na norma americana UL 94, é necessário introduzir aditivos retardadores de chama a revestimentos como o poliuretano, de forma a elevar a segurança e as chances de evacuação do ambiente, com a desaceleração e/ou extinção da combustão (AX-431, 2012; BAYLER; HIRSCHLER, 2008).

Os retardantes halogenados estão em desuso devido a toxidades dos produtos gerados quando em combustão, que iriam contribuir aos efeitos nocivos oriundos dos gases tóxicos formados a partir da combustão do poliuretano (GUO *et al.*, 2015; ELJARRAT; BARCELÓ, 2011). Enquanto que os retardantes de chama não halogenados permanecem como os mais indicados ao uso. Um exemplo de retardador de chama não halogenado é a alumina tri-hidratada (ATH) e, entre outros destacam-se os minerais (ZHANG, 2011; THIRUMAL, 2010).

2. METODOLOGIA

2.1. MATERIAL E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para confecção dos compósitos os reagentes Polioliol Poliéter Formulado e Isocianato Polimérico foram adquiridos da empresa Arinos (SP). A alumina tri-hidratada e o Magnésio di-hidratado produzida pela HUBER Engineered Materials foram doados pela empresa Raw Material. O resíduo em pó de vidro, passante 0,3 mm foi doado pela empresa Personal Glass, este foi lavado e seco em estufa com circulação de ar por 24h a 100°C. Todos os materiais foram usados como recebidos e com as recomendações de segurança.

Os corpos de prova foram preparados com a incorporação de 40% de alumina tri-hidratada (ATH) ou Magnésio di-hidratado (MDH) ou pó de vidro, em relação à massa total. Os corpos de prova foram obtidos através da mistura de ATH ou MDH ou pó de vidro ao Polioliol Poliéter Formulado por 0,5min e, então, foi adicionado Isocianato Polimérico e misturado por mais 0,5min. Os moldes foram previamente untados com vaselina sólida para facilitar a retirada do corpo de prova. A mistura homogênea foi vertida para molde para o ensaio padrão de flamabilidade de materiais plásticos (UL 94). Também foram preparados corpos de prova somente com PU, ou seja, sem adição de retardante de chama.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE FLAMABILIDADE DE MATERIAIS PLÁSTICOS

Para a realização do teste foi utilizada uma amostra nas dimensões de 13mm x 125mm x 3mm (largura x comprimento x espessura). Cada amostra foi colocada em contato com a chama, medindo-se o tempo que o material levou para entrar em combustão e a distância percorrida pelas chamas na placa, bem como o tempo de extinção da chama.

3. RESULTADOS

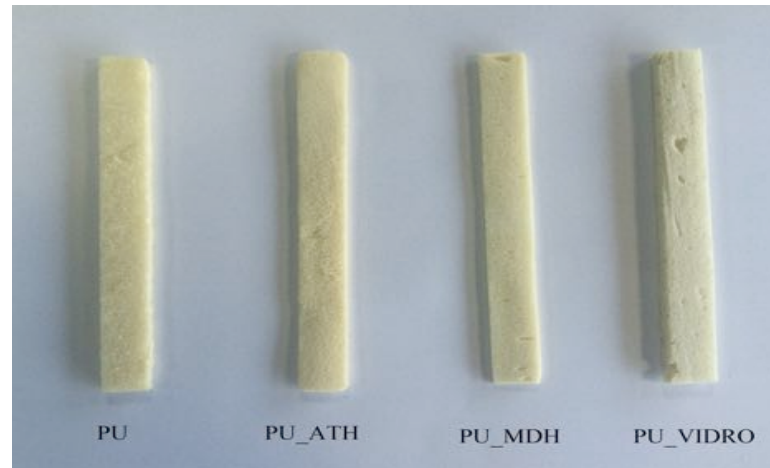
A seguir serão apresentados os resultados organizados a partir da composição dos corpos de prova e respectivo teste de flamabilidade de materiais plásticos.

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A matriz de poliuretano foi obtida por reação de policondensação entre Polioliol Poliéter Formulado e Isocianato Polimérico (CANGEMI; SANTOS; CLARO, 2009), sendo a composição utilizada em 1:1,5 polioliol:isocianato. Os corpos de prova tiveram adição de 40% de ATH ou MDH ou pó de vidro com relação à massa total. Os compósitos PU_ATH e PU_MDH apresentaram superfície uniforme e bom aspecto visual, não demonstrando deformação ou esfarelamento, enquanto que o compósito PU_VIDRO, apesar da boa

aparência, facilmente esfarela. Na Figura 2 apresentam-se corpos de prova de PU, PU_ATH, PU_MDH e PU_VIDRO, os quais foram utilizados para o teste de flamabilidade.

Figura 2: Corpos de prova de PU, PU_ATH, PU_MDH e PU_VIDRO utilizados para os testes de flamabilidade.



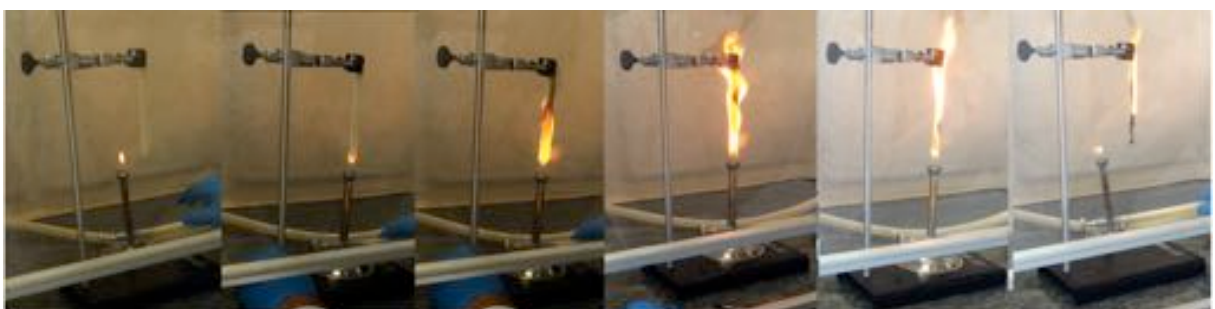
Fonte: Autor, 2016.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE FLAMABILIDADE DE MATERIAIS PLÁSTICOS

A determinação das características de queima do compósito é fundamental, pois a espuma de poliuretano, quando levada à combustão completa/incompleta, forma gases tóxicos.

Os testes de flamabilidade, segundo a UL 94 podem ser visualizados na Figura 3 para a amostra PU_VIDRO.

Figura 3: Teste de flamabilidade para amostra PU_VIDRO



Fonte: Autor, 2016.

A amostra de PU sofreu ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação da chama ao corpo de prova, apresentando queima completa com velocidade de 34,72 mm/s. Enquanto que para os compósitos foram observadas as velocidades de queima

menores, sendo de 31,25 mm/s para PU_MDH, 23,14 mm/s para PU_ATH e 18,23 mm/s para PU-VIDRO.

Os resultados obtidos neste ensaio motivam a continuidade do trabalho com resíduo de vidro, sendo necessário aprofundar a compreensão sobre o mecanismo deste como retardante de chama. O vidro (SiO_2) apresenta-se no estado máximo de oxidação e forma microcristalina amorfa, sendo que o aumento da temperatura, vai inicialmente levar a dilatação, ocorrendo a fusão em temperaturas a cerca de 1.000°C . O mecanismo dos retardantes de chama ATH e MDH ocorre por decomposição endotérmica, levando a formação de oxido correspondente e água de acordo com RIBEIRO et al. (2013). A taxa de decomposição máxima dos hidróxidos para os óxidos correspondentes ocorre entre 300 a 350°C . Esta decomposição contribui para a diminuição da temperatura do material, sendo que a água liberada dilui os gases combustíveis na chama. Outro aspecto que contribui para o efeito dos retardantes ATH e MDH é a formação de oxido correspondente, de alumínio ou magnésio, como uma camada protetora na superfície do produto de combustão, reduzindo a difusão do oxigênio para o meio reativo e dificultando a troca de calor.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos provenientes das indústrias de vidro, sendo que este se encontra em fase inicial dentro do grupo de pesquisa Ciência, Tecnologia e Inovação (GP-CTIM). Para tanto, foram realizados ensaios de incorporação deste resíduo de pó de vidro em poliuretano. Desta forma, observou-se que a incorporação de resíduos de pó de vidro em 40% da massa total do compósito mostrou-se viáveis. O material obtido mostrou-se visualmente uniforme, podendo ser utilizado para isolamento térmico e acústico. A presença de vidro, como retardador de chamas no compósito de poliuretano, mostrou-se eficiente quando comparado com os retardantes de chama ATH e MDH.

Para finalizar, resultados sobre a queima ao fogo do material indicam que a introdução do pó de vidro como retardante de chamas, trouxe benefícios ao material no que se refere à queima. Assim, conclui-se que a presença de um retardador de chamas, nos percentuais em massa aqui estudados, apresenta-se viável, quando se objetiva produzir um material mantendo as propriedades térmicas e acústicas do poliuretano; porém, com comportamento melhorado em relação à queima.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 15575-1. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1. Requisitos gerais. Rio de Janeiro. 2013.
- ABNT NBR 10152, *Níveis de ruído para conforto acústico*. Rio de Janeiro. 2000.
- ABNT. NBR 15220. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT NBR 10151, *Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimentos*. 1992.
- American Chemistry Council. (2012, Mar 11). *Guidance on Flammability Code Requirements for Polyurethane Foam Used as Interior Finish or Trim*. Retrieved from <http://polyurethane.americanchemistry.com/Resources-and-Document-Library/Guidance-on-Flammability-Code-Requirements-for-Polyurethane-Foam-Used-as-Interior-Finish-or-Trim.pdf>
- BILLMEYER Fred W. Textbook of polymer science. New York: John Wiley & Sons, 1984. - Vol. 1 : pp. 578 - 579.
- BRYDSON John Plastics Materials. Oxford: Butterworth Heireman, 7. ed:pp. 104 – 109, 2000.
- CANGEMI, J. M., SANTOS, A. M., e CLARO, N. S. Poliuretano: De Travesseiros A Preservativos, Um Polímero Versátil. *Química Nova na Escola*, 31(3), 159-164, 2009. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_3/02-QS-3608.pdf> Acesso em 16 may 2016.
- CARVALHO, M. T. M. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto**. 2009. 241 p. Doutorado (Tese). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2009.
- GALLO, J. B. e AGNELLI J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. *Plástico Industrial*. 31, 03. 162 -183, 2001.
- GACHTER R. H. M. *Plastics additives handbook : stabilizers, processing aids, plasticizers, fillers, reinforcements, colorants for thermoplastics*. Munich ; Viena ; New york ; Barcelona ; Hanser ; Cincinnati. : Hanser/Gardner Publications. 4 ed, 709 – 772, , 1993.
- GUO, H., GAO, Q., OUYANG, C., ZHENG, K., e XU, W. Research On Properties Of Rigid Polyurethane Foam With Heteroaromatic And Brominated Benzyl Polyols. *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 423-449, 2015.
- Google images. Imagens poliuretano isolante. Disponível em: <<http://www.google.com>> Acesso: maio de 2016.
- LE BRAS, M. Fire retardancy of polymers - New applications of mineral fillers. Cambridge, UK : Athenaem Press Ltd, 2005.
- MAHFUZ, E.C. **Ensaio sobre a Razão Compositiva**. Viçosa: UFV/AP Imp. Univ., 1995.
- MENDONÇA, H. T. T. (2014). *Edificações civis em situação de incêndio: estudo de caso da boate kiss e do edifício Joelma* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade de Fortaleza, MG.
- MOURITZ A. P. e GIBSON A. G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Dordrecht, The Netherlands : Speingwe, 143, 2000.

OLIVEIRA, C. M. F.; COUTINHO, F.M.B. Reações de polimerização em cadeia. Editora Interciência. São Paulo, 2006.

PUBRASIL Painel frigorífico com retardantes de chama. Poliuretano – Tecnologia & Aplicações. - São Paulo. 25, 2007.

RABELLO, M. Aditivção de polímeros. São Paulo - Brasil : Artliber, pp. 117 – 142, 2000.

ROAF, Susan. Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável. Susan Roaf, Manuel Fuentes, Stephanie Thomas; Tradução Alexandre Salvaterra. 2 edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

TERMOBRAS. Termobras Isolantes Térmicos. Disponível em: <<http://termobras.com/p1.php>>. Acesso em: maio de 2016.

THIRUMAL, M., KHASTGIR, D., MANJUNATH, B. S., NAIK, Y. P., & SINGLA, N. K. Mechanical, Morphological And Thermal Properties Of Rigid Polyurethane Foam: Effect Of The Fillers. *Cellular Polymers*, 26(4), 245-259, 2007.

VELASCO J. I., MORHIANA C. e MARTÍ Neza A. B. The effect of filler type, morphology and coating on the anisotropy and [Artigo] // Polymer. - Valladolid, Barcelona - Spain : [s.n.], setembro de 2002. - Vol. 43. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/polymer>. Acesso em 16 may 2016.

VILAR, W.D. Reagentes & fundamentos, in: Vilar, W.D. (Ed), Química e tecnologia dos poliuretanos. Rio de Janeiro, 10-14, 1999. Disponível em: <<http://www.poliuretanos.com.br/Cap1/1mercado.htm>>. Acesso em 16 may 2016.