



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUI
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DOS MATERIAIS

INFLUÊNCIA DA VERMICULITA NO RETARDAMENTO DA CHAMA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO

Doutoranda: Lívia Rezende Passos Silva Tenório Alves

Orientadora: Prof. Dra. Durcilene Alves da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Barbosa Furtini

Teresina - Piauí

2022

LÍVIA REZENDE PASSOS SILVA TENÓRIO ALVES

**INFLUÊNCIA DA VERMICULITA NO RETARDAMENTO DA CHAMA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, como requisito obrigatório à obtenção do título de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dra. Durcilene Alves da Silva

COORIENTADOR: Prof. Dr. Marcelo Barbosa Furtini

Teresina-Piauí

2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Divisão de Representação da Informação

A474i Alves, Livia Rezende Passos Silva Tenório.
Influência da vermiculita no retardamento da chama e propriedades mecânicas das espumas rígidas de poliuretano / Livia Rezende Passos Silva Tenório Alves. -- 2022.
91 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais, Teresina, 2022.
“Orientadora: Profª. Drª. Durcilene Alves da Silva”.
“Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Barbosa Furtini”.

1. Compósitos PU/VMT. 2. Retardante de chama.
3. Propriedades mecânicas. I. Silva, Durcilene Alves da. II. Furtin, Marcelo Barbosa. III. Título.

CDD 620.112

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – PPGCM

FOLHA DE APROVAÇÃO – DEFESA DE TESE

DISCENTE: Lívia Rezende P. Silva Tenório Alves

TÍTULO DA TESE: “Composto de espuma de poliuretano/vermiculita para retardante de chama”.

ORIENTADORA: Prof. Dr. Anderson de Oliveira Lobo

BANCA EXAMINADORA:

ASSINATURA

Profa. Dra. Durcilene Alves da Silva – UFDPAR
(Orientadora-Presidente)



Prof. Dr. Marcelo Barbosa Furtini – UFPI
(Coorientador)

ACESSO REMOTO

Profa. Dra. Josy Anteveli Osajima Furtini – UFPI
(Examinadora Interna ao Programa)

ACESSO REMOTO

Pós-Doc. Alan Ícaro Sousa Morais – UFPI
(Examinador Externo ao Programa)

ACESSO REMOTO

Prof.a Dra. Aleksandra de Sousa Rios – UFC
(Examinadora Externa à Instituição)

ACESSO REMOTO

Profa. Dra. Luzia Maria Castro Honório – UFPB
(Examinadora Externa à Instituição)

ACESSO REMOTO

DATA DA AVALIAÇÃO: 04 de Outubro de 2022.

HORÁRIO: 08:30h

DEDICATÓRIA

**Aos meus filhos, Davi e Bruna,
por me ensinar o verdadeiro amor:
o amor incondicional.
Te amo!**

AGRADECIMENTOS

„Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes“.
(Issac Newton).

Agradeço...

A Deus, arquiteto do universo, por sempre estar ao meu lado, nas horas difíceis e nas horas tranquilas, sempre pude contar com o Senhor!

Aos professores orientadores, professora Dra. Durcilene Alves da Silva e professor Dr. Marcelo Barbosa Furtini, por sua disposição e competência.

A professora Dra. Josy Antevéli Osajima, por sua amizade, sempre disposta a me ensinar, através de seus conselhos me permitiram que eu pudesse concluir esse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, por me ajudar na realização de um sonho.

Aos meus pais João e Martha, por sempre apoiarem minhas escolhas profissionais.

Ao meu esposo Davi, porque “onde quer que eu vá, o que quer que eu faça, sem você, não tem graça.”

Aos meus filhos Davi e Bruna, para que tenham orgulho de mim, por me fazerem forte e doce ao mesmo tempo. Tudo o que faço é para vocês e por vocês, sempre!

A todos os meus familiares, ao meu irmão, Vinícius, meus sobrinhos, tios, primos, etc. por sempre torcerem pelo meu sucesso, mesmo que à distância.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia dos Materiais, principalmente Kelson, Luzia, Alan, por me ajudarem durante as dificuldades na realização deste trabalho (e foram muitas!).

A todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste sonho.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	8
REFERÊNCIAS.....	10
CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
TIPOS E INFLUÊNCIA DE MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO COM VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO: UMA REVISÃO.....	11
1.INTRODUÇÃO.....	15
2.TIPOS DE MATERIAIS APLICADOS NA ARQUITETURA COM VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO.....	16
3.INFLUÊNCIA DE MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO COM VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO.....	20
4.CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
CAPÍTULO 2: ARTIGO 1	
COMPOSTO DE ESPUMA DE POLIURETANO/VERMICULITA COMO MATERIAL SUSTENTÁVEL PARA RETARDANTE DE CHAMA VERTICAL.....	42
1.INTRODUÇÃO.....	46
2. PARTE EXPERIMENTAL.....	49
2.1. REAGENTES.....	49
2.2. Preparação de Espuma Rígida e Compósitos.....	49
2.3. Caracterizações.....	50
2.4. Teste de inflamabilidade vertical.....	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
3.1. Análise de TG/DTG, DRX, MEV e EDS.....	52
3.2. Desempenho dos Compósitos no Teste de Chama Vertical.....	59

4. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
CAPÍTULO 3: ARTIGO 2	
INFLUÊNCIA DA VERMICULITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO.....	68
1.INTRODUÇÃO.....	72
2. PARTE EXPERIMENTAL.....	75
2.1 MATERIAIS.....	75
2.2 PREPARAÇÃO DA ESPUMA RÍGIDA.....	75
2.3. CARACTERIZAÇÕES.....	76
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	77
4. CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de preparação de espumas rígidas de poliuretano.	49
Figura 2 – Curvas TG dos compósitos	53
Figura 3 – Difratoograma composto.....	55
Figura 4 – Micrografias SEM dos compósitos	57
Figura 5 – Perfil EDS de compósitos	58
Figura 6 – Testes de inflamabilidade na vertical.....	59
Figura 7 – Preparação do compósito PU/VMT	76
Figura 8 – Resistências à compressão do PU e compósitos	77
Figura 9 – Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão.....	78
Figura 10 – Resistências à tração do PU e compósitos	79
Figura 11 – Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de tração	79
Figura 12 – Resistências à flexão do PU e compósitos	80
Figura 13 – Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de flexão.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações de compósitos PU/VMT.....	49
Tabela 2 – Perda de peso, faixa de temperatura, temperatura máxima de degradação e resíduo de amostras	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
ASTM	American Society for Testing and Materials
DRX	Difratometria de Raio-X
DTG	Derivada da curva de termogravimetria
IC	Índice de cristalinidade (%)
L	Comprimento do corpo de prova (m)
m	Massa (g)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PU	Poliuretano
PU/VMT	Compósitos de espuma de poliuretano/vermiculita
PU/VMT 0	Compósitos de espuma de poliuretano sem adição de vermiculita
PU/VMT 5	Compósitos de espuma de poliuretano com adição de 5% em massa de vermiculita
PU/VMT 10	Compósitos de espuma de poliuretano com adição de 10% em massa de vermiculita
PU/VMT 15	Compósitos de espuma de poliuretano com adição de 15% em massa de vermiculita
PU/VMT 20	Compósitos de espuma de poliuretano com adição de 20% em massa de vermiculita
T	Temperatura (°C)
UFPI	Universidade Federal do Piauí
V	Volume (cm ³)

RESUMO

Novos materiais para edifícios e espaços abertos estão sendo estudados e testados quanto a durabilidade, aspecto de desgaste, deterioração por UV e impacto da eficiência energética, uma solução viável é a formulação de compósitos de espumas rígidas de poliuretano (PU). As espumas rígidas de poliuretano (PU) foram preparadas pelo método de espuma expansível em uma etapa usando moldagem por fundição. Os compósitos de espuma de poliuretano/vermiculita (PU/VMT) foram desenvolvidos com a adição de argila em diferentes proporções (0, 5, 10, 15 e 20%) na formulação. Os efeitos de modificações compostas foram avaliados por difração de raios X (DRX), análise termogravimétrico (TG/DTG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) aplicada ao retardamento de chama explorado pelo teste de queima vertical (ASTMD 3801-96). A análise de DRX mostrou os picos definidos em $2\theta = 18^\circ$ e $2\theta = 73^\circ$ em relação à cristalinidade em formação e interação de segmentos rígidos foram identificados, como bem como a influência da redução da cristalinidade em compósitos. No teste de chama, o retardante de chama superfície foi bem sucedido em todos os compósitos, dado o sucesso da dispersibilidade e orientação planar das camadas de argila e a existência de um teor ideal de vermiculita (VMT) incorporado na matriz de espuma. Os compósitos PU/VMT foram testados na Máquina de ensaios universal – SHIMADZU AGX-250kN, utilizada para os ensaios mecânicos. Foram realizados o ensaio de Compressão (ASTM D 1621-10), Tração (ASTM D 638-14– Tipo III) e Flexão (ASTM 790 procedimento A). O aperfeiçoamento nas propriedades mecânicas nos compósitos PU10 e PU15 em relação à espuma compósita PU5, ocorre especialmente devido ao aumento da viscosidade da mistura pré-expansão, que propicia um aumento da densidade aparente das espumas compósitas em relação à espuma de PU. Todos os compósitos podem ser empregados com a vantagem de parte da espuma ser composta de VMT, proporcionando vantagens ambientais e econômicas.

Palavras-Chaves: compósitos PU/VMT, retardante de chama, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

New materials for buildings and open spaces are being studied and tested for durability, appearance of wear, caused by UV and impact on energy efficiency, a viable solution is the formulation of rigid polyurethane (PU) foam composites. Rigid polyurethane (PU) foams were prepared by the one-step expandable foam method using die casting. The polyurethane/vermiculite (PU/VMT) foam composites were accompanied with the addition of clay in different proportions (0, 5, 10, 15 and 20%) in the formulation. The effects of composite modifications were evaluated by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TG/DTG) and scanning electron microscopy (SEM/EDS) applied to the exploratory flame retardancy by the vertical burn test (ASTMD 3801-96) . An XRD analysis showed peaks defined at $2\theta = 18^\circ$ and $2\theta = 73^\circ$ in relation to crystallinity in formation and interaction of hard disks were identified, as well as the influence of crystallinity reduction in composites. In the flame test, the surface flame retardant was successful in all composites, given the successful dispersibility and planar orientation of the clay layers and the existence of an ideal vermiculite content (VMT) incorporated in the foam matrix. The PU/VMT composites were tested on the universal testing machine – SHIMADZU AGX-250kN, used for mechanical testing. Compression (ASTM D 1621-10), Tension (ASTM D 638-14– Type III) and Flexion (ASTM 790 procedure A) tests were performed. The improvement in the mechanical properties of the PU10 and PU15 composites in relation to the PU5 composite foam, occurs especially due to the increase in the pre-expansion mix descent, which provides an increase in the apparent density of the composite foams in relation to the PU foam. All composites can be used with the advantage that part of the foam is composed of VMT, providing environmental and environmental benefits.

Key-words: PU/VMT composites, flame retardant, mechanical properties.

1 APRESENTAÇÃO

A rápida urbanização e um crescimento acelerado na população urbana modificaram muito os materiais de superfície originais naturais e formas geométricas espaciais em todo o mundo. Essas mudanças causaram muitos problemas climáticos, incluindo o aquecimento global do clima e das ilhas de calor nas cidades urbanas (Tan, 2016).

O gasto energético com conforto térmico é de grande importância, uma vez que está diretamente relacionado às despesas dos edifícios (Maykot, 2018). Melhorar a eficiência energética em edifícios é primordial, reduzindo o consumo de energia e, conseqüentemente, a emissão de gases de efeito estufa sem comprometer o conforto humano (Kruger, 2017). O consumo de energia nos edifícios está aumentando rapidamente devido ao aumento da população humana e o acelerado crescimento da construção civil em áreas urbanas. Estas dificuldades estão sendo agravadas com a crise mundial, incluindo o alto custo de energia e as carências urgentes para mitigar as emissões de gases com efeito estufa.

A aplicação de novos materiais na construção é interessante no Brasil, que possui clima tropical, e principalmente no Piauí, que apresenta altas taxas térmicas durante praticamente o ano todo.

As espumas de poliuretano (PU) sem aditivos retardantes de chama são materiais comerciais com baixa condutividade térmica, baixa densidade e baixo custo (Ciecierska, 2016; Mahmood, 2016). Por isso, são amplamente utilizados como isolantes térmicos em aplicações de construção e engenharia e para o desenvolvimento de tecnologias de transferência de calor, tornando-os um recurso atraente para minimizar o desperdício de energia (Estravis, 2016; Wang, 2015).

Nos últimos anos, os compósitos de poliuretano e/ou materiais poliméricos/argilosos ganharam atenção especial das indústrias, pois a combinação possui

excelentes propriedades termomecânicas e uma série de propriedades físicas e químicas (Zhu, 2022). Esses compósitos de argila polimérica podem ser sintetizados pela incorporação de argilas inorgânicas dispersas em um polímero matriz e podem melhorar significativamente muitas propriedades essenciais, como resistência à tração, módulo e alongamento em propriedades de ruptura, resistência ao rasgo e retardantes de chama. Materiais poliméricos/cerâmicos geralmente exibem baixa condutividade térmica e são amplamente utilizados como isolantes térmicos. As propriedades térmicas desses elementos podem ser otimizadas pela incorporação de minúsculos poros, que são criados por espuma ao longo do método de produção (Callister, 2015).

O objetivo deste trabalho foi investigar as características morfológicas, estruturais, propriedades térmicas de estabilidade e propriedades mecânicas de espumas rígidas do compósito Poliuretano e Vermiculita (PU/VMT) em diferentes concentrações (0, 5%, 10%, 15% e 20%), além de contribuir para o desenvolvimento de produtos retardadores de chama favoráveis ao crescimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- Kruger, E.L.; Drach, P. (2017). Identifying potential effects from anthropometric variables on outdoor thermal comfort, *Build. Environ.* 117, 230–237.
- Maykot, J.K.; *et al.* (2018). A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. *Energy & Buildings* 178, 254–264.
- Tan, Z.; *et al.* (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy Build.* 114, 265–274.
- Ciecierska, E.; Jurczyk-Kowalska, M.; Bazarnik, P.; Gloc, M.; Kulesza, M.; Kowalski, M.; Krauze, S.; Lewandowska, M. (2016). Inflamabilidade, propriedades mecânicas e estrutura de espumas rígidas de poliuretano com diferentes tipos de materiais de reforço de carbono. *Compos. Estrutura.* 140, 67-76.
- Mahmood, N.; Yuan, Z.; Schmidt, J.; Xu, C. (Charles). (2016). Despolimerização de ligninas e suas aplicações para a preparação de polióis e espumas rígidas de poliuretano: uma revisão. *Renovar. Sustentar. Energia Rev.* 60, 317-329.
- Estravís, S.; Tirado-Mediavila, J.; Santiago-Calvo, M.; Ruiz-Herrero, J.L.; Villafañe, F.; Rodríguez-Pérez, M.Á. (2016). Poliuretano rígido espumas com nanoargilas infundidas: Relação entre estrutura celular e condutividade térmica. *EUR. Polím. J.* 80, 1-15.
- Wang, S.; Chen, H.; Liu, N. (2015). Ignição de espuma de poliestireno expansível por uma partícula quente: Um estudo experimental e numérico. *J. Perigo. Mater.* 283, 536-543.
- Zhu, M.; Ma, Z.; Liu, L.; Zhang, J.; Huo, S.; Song, P. (2022). Recentes avanços em espuma de poliuretano rígido retardante de fogo. *J. Mater. Sci. Tecnol.* 112, 315-328.

CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
TIPOS E INFLUÊNCIA DE MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO COM
VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO: UMA REVISÃO

**TIPOS E INFLUÊNCIA DE MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO COM
VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO: UMA REVISÃO**

Lívia Rezende P. S. Tenório Alves¹

*¹Limav, Limav, Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV, UFPI,
64049 -550, Teresina, PI, Brazil. liviarezende@gmail.com*

RESUMO

O setor da construção é responsável por 40% do consumo total de energia global. O gasto energético com conforto térmico é de grande importância, uma vez que está diretamente relacionado às despesas dos edifícios. O setor de construção no Brasil representa 14,6% do total consumo de energia. A energia empregada vem aumentando em edifícios e a maior parte deste incremento é devido ao crescente uso de aquecimento, ventilação e sistemas de ar condicionado. A rápida urbanização e um crescimento acelerado na população urbana modificaram muito os materiais de superfície originais naturais subjacentes e formas geométricas espaciais em todo o mundo. Essas mudanças causaram muitos problemas climáticos, incluindo o aquecimento global do clima e das ilhas de calor nas cidades. Novos materiais para edifícios e espaços abertos estão sendo estudados e testados quanto a durabilidade, aspecto de desgaste, deterioração por UV e cooperação para o impacto da eficiência energética. Estes materiais revolucionários repercutirão no ambiente arquitetado em um iminente amanhã e suas sequelas devem ser assimiladas no cenário de preservação de energia e sustentabilidade ambiental.

Palavras-Chaves: conforto térmico, materiais de construção, construção civil.

ABSTRACT

The construction sector is responsible for 40% of total global energy consumption. The energy expenditure with thermal comfort is of great importance, since it is directly related to the expenses of buildings. The construction sector in Brazil represents 14.6% of total energy consumption. The energy used in buildings is increasing and most of this increase is due to the increasing use of heating, ventilation and air conditioning systems. Rapid urbanization and a accelerated growth in the urban population have greatly modified the underlying natural original surface materials and spatial geometric shapes throughout the world. These changes have caused many climate problems, including global climate warming and of heat islands in cities. New materials for buildings and open spaces are being studied and tested for durability, wear appearance, UV deterioration and cooperation for the impact of energy efficiency. These revolutionary materials will reverberate in the architected environment in an imminent tomorrow and their consequences must be assimilated in the scenario of energy conservation and environmental sustainability

Key-words: thermal comfort, building materials, civil construction.

1. INTRODUÇÃO

A rápida urbanização e um crescimento acelerado na população urbana modificaram muito os materiais de superfície originais naturais e formas geométricas espaciais em todo o mundo. Essas mudanças causaram muitos problemas climáticos, incluindo o aquecimento global e a formação das ilhas de calor nas cidades urbana (Tan, 2016).

As transformações nas condições do ambiente térmico em espaços urbanos também têm grandes impactos sobre o consumo de energia do edifício e níveis de conforto térmico dos cidadãos (Kruger, 2017). Quando os indivíduos vivenciam mais estresse térmico, o desconforto resultante poderia impactar negativamente sua saúde e sua vida ao ar livre, em muitos aspectos, assim sendo, a análise quantitativa do conforto térmico ao ar livre está se transfigurando uma adversidade cada vez mais pertinente para os meteorologistas urbanos (Liu, 2018).

O gasto energético com conforto térmico é de grande importância, uma vez que está diretamente relacionado às despesas dos edifícios. Na Europa, aproximadamente 38,7% do total consumo de energia é utilizada com conforto térmico em edifícios comercial e residencial. O setor de construção no Brasil representa 14,6% do total consumo de energia. A energia empregada vem aumentando em edifícios e a maior parte deste incremento é devido ao crescente uso de aquecimento, ventilação e sistemas de ar condicionado. O conforto térmico afeta também o desempenho dos trabalhadores, prejudicando o rendimento diário no trabalho (Maykot, 2018).

Os edifícios são responsáveis por aproximadamente 30% do consumo total de energia no mundo, sendo 50% relacionado ao sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning ou Aquecimento, ventilação e ar condicionado) e contribui substancialmete para a alteração do clima, sendo agente de 30% das emissões de gases com efeito estufa mundial (Ghahramani, 2018).

O fenômeno Ilha do Calor Urbano (ICU) atribui as regiões metropolitanas temperaturas mais elevadas do que as áreas rurais em virtude dos espaços construídos reterem mais radiação solar que as superfícies naturais (Han, 2015). ICU tem um impacto desfavorável sobre o sistema de resfriamento de edifícios urbanos, ocasionando uma sobrecarga no sistema elétrico (Ferrari, 2015).

Promover o bem-estar em um ambiente com baixo consumo de energia é um desafio em áreas tropicais. Entretanto, edifícios adaptados para o conforto térmico, saúde e melhor desempenho nas atividades diárias pode consumir menos energia e garantir o bem-estar dos usuários (Abreu-Harbich, 2018).

As pessoas gastam 80-90% de sua vida dentro de casa. Por isso a tecnologia e os padrões de vida de desenvolvimento humano têm um alto nível de exigência de conforto em edifícios residenciais, o que desperta uma expansão do consumo de energia. Adverso a isso, uma vez que o gasto de energia se transformou em um grave problema, as pessoas são pressionadas a encontrar um equilíbrio entre o uso do ar condicionado para poupar energia e, adicionalmente, usufruir do conforto térmico e da saúde (Fang, 2018).

2. TIPOS DE MATERIAIS APLICADOS NA ARQUITETURA COM VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO

Uma das soluções mais eficientes para amenizar o fenômeno ICU é arquitetar revestimentos reflexivos solares para aumentar o raio de refletância do infravermelho próximo ou NIR (Near Infrared Ray) (Zinzi, 2012). Esses revestimentos solares reflexivos podem ser usados sobre azulejos, telhas, tijolos, etc. (Santamouris, 2011).

A radiação solar é composta por 5% de radiação ultravioleta (UV; 300–400 nm), 43% de radiação visível (400–700 nm) e 52% de radiação infravermelha próxima (NIR; 700–2500 nm). Revestimentos coloridos com pigmentos convencionais concentram a radiação NIR que carrega > 50% da energia solar, convertendo em condensação de calor (Jeevanandam, 2007; George, 2011).

Há uma crescente dedicação em pesquisas com materiais de cobertura solar NIR, chamados pigmentos “frios” ou “cool”, corantes que absorvem menos e refletem mais a radiação solar NIR (Levinson, 2010; Thongkanluang, 2011). Uma troca de cobertura com absorção NIR (“convencional”) por outra refletora NIR (“cool”) de cor semelhante pode minimizar substancialmente o calor concentrado na cobertura dos edifícios (Levinson, 2005). O uso de revestimentos “frios” contribui para diminuir a temperatura do telhado e, conseqüentemente, ajuda na redução da temperatura interna e minimiza a utilização de resfriamento (Wang, 2013).

Atualmente, o uso de revestimentos reflexivos NIR em edifícios e infraestruturas urbanas tem sido bastante estudado. Os pigmentos reflexivos NIR mais discutidos são os óxidos metálicos (TiO_2 , ZnO) (Baneshi, 2012), óxidos de metais mistos (Liu, 2015) e óxidos de compostos de metal de terras-raras de transição (Sameera, 2015). Recentemente o uso de pigmentos mica-titânio foi ratificado como revestimento com alta refletância NIR (Gao, 2014), sendo que em um procedimento experimental conseguiu reduzir $8,3^\circ\text{C}$ de temperatura na superfície interior de uma placa de silicato de cálcio (Gao, 2016).

Um estudo utilizando fluorocarbono demonstrou que materiais e revestimentos frios são capazes de mitigar a carga de arrefecimento em edifícios com cargas térmicas maiores, como edifícios industriais, em que geralmente possuem uma carga de resfriamento maior por efeito das maquinarias e linhas de produção. Nele o albedo, ou coeficiente de reflexão, da

cobertura aumentou 120% depois do emprego do revestimento frio e foi verificada uma redução de 73% no arrefecimento (Mastrapostoli, 2014).

Esses revestimentos não-brancos, além de reduzir a temperatura da superfície do telhado e levar a economia de energia, podem ser utilizados como pintura em automóveis. Os revestimentos coloridos convencionais utilizados em automóveis aumentam a temperatura no interior do veículo, acarretando um exagero no uso de ar condicionado, o que sobrecarrega o consumo de combustível do veículo (Sameera, 2015).

Novos materiais para edifícios e espaços abertos estão sendo estudados e testados quanto a durabilidade, aspecto de desgaste, deterioração por UV e cooperação para o impacto da eficiência energética. Estes materiais revolucionários repercutirão no ambiente arquitetado em um iminente amanhã e suas sequelas devem ser assimiladas no cenário de preservação de energia e sustentabilidade ambiental.

Um projeto eficiente no desenvolvimento sustentável em edifícios é um complexo problema de otimização. Este problema envolve muitos propósitos, como qualidade ambiental, energia, materiais sustentáveis, e gestão de água. Além disso, muitas variáveis são interligadas por múltiplas relações e que definem o espaço de design. Por essa razão, as abordagens atuais para a construção de um projeto tem que atender a um alto grau de colaboração interdisciplinar entre todos os profissionais envolvidos (arquitetos, engenheiros, consultores, etc.) a partir da fase de concepção preliminar para a entrega do edifício. Tais abordagens são muitas vezes referidas como “processo de design integrado”, sendo definidos como “uma abordagem para a construção de projeto que visa atingir um alto desempenho em uma ampla variedade de metas ambientais e sociais, enquanto permanecer dentro das restrições orçamentais e de agendamento” (Ferrara, 2018).

A teoria e a aplicação de uma metodologia com base em uma simples processo de otimização de um único objetivo naquela foi usada para minimizar a demanda anual primária

total de energia de um ambiente considerando a variação dos fatores relacionados a construção envelope (espessura do isolamento, tipo vidro, janela dimensões e dispositivos de proteção solar) na fase inicial da concepção. A abordagem original para a exploração do espaço de projeto, definida pela seleção das variáveis de projeto incluídos na otimização processo, e para a análise de sensibilidade sobre a ótimas soluções foi relatados e discutidos. Uma solução de concepção ótima estava encontrada para cada Orientação (N, S, E, W) (Ferrara, 2018).

Considerações térmicas durante a projeção de um edifício, como a colocação de janelas com aberturas na fachada sul, criando elementos que favorecem a ventilação cruzada, embora as condições de conforto térmico no interior não são garantidos pelo ventilação natural. As árvores perto das fachadas leste e sul proporcionam uma sombra e, assim, poderiam proteger essas fachadas de incidência solar direta, reduzindo o calor dentro dos ambientes (Abreu-Harbich, 2018).

As soluções ótimas resultantes estão relacionadas com um diferente tipo de construção de projeto para cada caso, mas os valores do objetivo são semelhantes em todos os casos, mostrando que é possível alcançar a mesma baixa demanda de energia primária no entanto, o sala de aula é orientado. Além disso, a solução ótima em termos energéticos resulta como a melhor escolha de design também depois de aplicar os filtros de conforto isto tem que ser considerado, as soluções ótimas resultaram estritamente dos valores escolhidos para as deficiências dos sistemas de energia primário e fatores de conversão dos vários vetores de energia. Portanto, as soluções ótimas podem modificar diversas hipóteses feitas em relação às deficiências de energia de conversão para incluir na função objetiva (Ferrara, 2018).

Existem relações estreitas entre conforto térmico e características arquitetônicas e de construção de um edifício, como o layout, as dimensões espaciais (incluindo altura do pé-direito), janela, tipo de parede, sombreamento externo e as propriedades da envolvente do edifício térmico. Ainda assim, em alguns ambientes, tais como climas tropicais, estratégias

ativas como o uso de ventiladores, ar condicionado e refrigeradores evaporativos são necessárias em algumas estações. O elevado consumo de energia por equipamentos sobrecarrega o sistema de energia, o que geralmente não é suficiente para atender às demandas. Para garantir o conforto térmico em um ambiente interno e, ao mesmo tempo, reduzir a demanda de energia são necessárias estratégias e tratamento do envelope da edificação (Abreu-Harbich, 2018).

3. INFLUÊNCIA DE MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO COM VISTAS AO CONFORTO TÉRMICO

As técnicas de construção têm evoluído continuamente de cavernas para modernos arranha-céus. Tradicionalmente, os edifícios são construídos com materiais disponíveis localmente, como: pedra, madeira, barro e cal. Nos últimos anos, os materiais de construção modernos como cimento e aço substituíram a maioria dos materiais locais, devido à alta durabilidade, baixa manutenção, baixa probabilidade de corrosão e decadência e facilidade de construção do primeiro. Entretanto, os materiais modernos de construção são consumidores de energia e ambientalmente inseguros. A indústria do cimento representa 2% do consumo global de energia e 5% da emissão de CO₂ mundial (Worrell, 2014).

A energia incorporada nas construções modernas é de 10-20% do seu consumo de energia da vida (Deepak, 2014). Além disso, o alto custo dos materiais de construção modernos aumenta o custo de capital dos edifícios. Por isso, os edifícios construídos com um uso predominante dos materiais locais e uma utilização racional dos materiais de construção modernos seriam não só mais barato, mas também mais duráveis (Leo Samuel, 2018).

Por isso, a mudança para os estilos de arquitetura tradicionais que têm características de arrefecimento passivo, além da arquitetura tradicional também melhorar o

emprego local, como é trabalho intensivo. Isso proporcionaria emprego para a força de trabalho migrante. O uso de materiais disponíveis localmente iria fortalecer a economia local e resulta em um impacto mais suave sobre o meio ambiente (Hatamipour, 2008).

Características de arrefecimento passivo da arquitetura vernacular têm sido bastante pesquisadas nos últimos anos. Arrefecimento passivo pode ser classificado em termos de prevenção de calor, modulação de calor e dissipação de calor. Sombreado, isolamento térmico, a construção de orientação e vidros são algumas estratégias de prevenção e redução de calor (Zaki, 2012).

O potencial de dispositivos de sombreamento para reduzir a demanda de arrefecimento é alternado de 10% a 50%. Em geral, a economia mais baixa é relatada para edifícios com janelas na parede inferior. O uso de grelhas em um edifício totalmente envidraçada em Santiago-Chile reduziu a demanda de resfriamento em 54% (Pino, 2012). Uma redução de 30% no consumo de energia primária (arrefecimento e carga de iluminação) foi obtida por otimização da concepção do dispositivo de sombreamento usando um algoritmo genético (Manzan, 2014).

No entanto, a arquitetura vernacular com materiais de construção locais puros é menos durável. Assim, nova arquitetura com uma mistura de arquitetura popular (para arrefecimento passivo), materiais de locais (de redução de custos e de emprego local) e materiais modernos (por resistência estrutural) é a ideal para um melhor aproveitamento do conforto térmico sem sobrecarregar o sistema energético e ainda reduzir os gastos excessivos (Hatamipour, 2008).

Antes do advento dos sistemas de ar condicionado modernos, o conforto térmico era alcançado através da concepção do edifício para se adequar às condições climáticas locais. Por exemplo, em regiões quentes, construções foram construídas com baixa ventilação para evitar o desconforto da infiltração do ar exterior quente. Em regiões secas, a flutuação de

temperatura do ar exterior é elevada. Assim, as edificações foram construídas com uma elevada massa térmica para reduzir a temperatura de flutuação do espaço interior. Em regiões quentes e úmidas tropicais, a ventilação do espaço interior foi mantida com aberturas largas (construção de janelas e portas) aproveitando a direção do vento predominante, ao passo que a massa térmica do edifício foi baixa para evitar desconforto do calor armazenado a noite. Em regiões-solares intensiva, a abóbada estruturada dos telhados foram usadas para reduzir o ganho de calor solar, uma vez que proporcionam um sombreamento e reduzem a área de superfície para razão de volume (Leo Samuel, 2018).

Uma casa com terraço convencional foi estudada e verificou-se que a casa necessitaria de ar condicionado mecânico por 24 horas em um dia quente de verão. Contudo, utilizando a arquitetura passiva como isolante no telhado e nas paredes, a adição de dispositivos de sombreamento para janelas e orientando o edifício e janelas na melhor direção iria reduzir a necessidade de ar condicionado mecânico para 8,5 h diárias (Zaki, 2012).

Em um clima tropical, o ganho de calor solar através do telhado foi reduzido em 63% utilizando as telhas de argila ocas com uma disposição para o ar ambiente para fluir através dele (Vijaykumar, 2007). O Uso de pinturas da cor de luz (Suehrcke, 2008) e trepadeira de plantas de folha caduca (Ip, 2010) para reduzir o ganho de calor solar, foram também investigados estratégias de modulação de calor utilizando a massa térmica do edifício para alcançar o conforto térmico através do armazenamento de calor e libertando-o por diversas vezes por dia (Leo Samuel, 2018).

Foi investigado um abrigo subterrâneo que utiliza a massa térmica de terra para melhorar o conforto térmico. Eles descobriram que a morada subterrânea era confortável, com uma temperatura interior de 25-26°C, mesmo quando a temperatura média do espaço acima do solo era 35°C. O calor pode ser acoplado com técnicas de dissipação de calor. A ventilação

noturna é um exemplo bem conhecido para o acoplamento de técnicas de modulação de calor e dissipação de calor (Hazbei, 2015).

Um estudo no clima Mediterrâneo relatado que o pico de temperatura do ar interior tinha 0,6 °C mais baixa do que sua contraparte ao ar livre se o espaço foi ventilado em todos os tempos (Michael, 2017). A diferença é aumentada para 6,5°C se o edifício foi ventilado apenas no momento da noite. Outro estudo sobre a ventilação noturna relatou uma redução de energia de arrefecimento de 69-83%. Em sistemas de dissipação de calor passivo, o calor é transferido do quarto com a temperatura do dissipador de calor inferior acessível no local. Arrefecimento evaporativo, ventilação, arrefecimento geotérmica, radiação noturna e arrefecimento profunda do oceano/lago são algumas técnicas de dissipação de calor conhecidas. Ventilação melhora a qualidade do ar interior (Sekhar, 2011). Em condições climáticas, ele fornece um melhor conforto térmico, bem como a remoção do calor da cavidade em uma fachada com duplo revestimento por ar de ventilação é relatado para reduzir a necessidade de arrefecimento de 17% (Radhi, 2013).

O movimento do ar mais elevada causada por ventilação poderiam definir a temperatura neutra. Para as pessoas adaptadas ao clima quente e úmido, uma velocidade do ar de 1,6 m/s pode aumentar a temperatura neutra de 2,6°C (Deb; Ramachandraiah, 2010). Arrefecimento por radiação de ondas longas noturna foi relatado para reduzir a temperatura interior por 2,5-4°C (Bagiorgas; Mihalakakou, 2008). Outras técnicas de dissipação de calor, tais como arrefecimento geotérmica (Li *et al.*, 2014) e arrefecimento evaporativo (Ezzeldin; Rees, 2013) também têm sido investigados extensivamente.

Outro fator importante a ser considerado durante a construção de um edifício é o conforto térmico do espaço interior. No entanto, nas últimas décadas, o desempenho térmico do edifício não é considerado durante a fase de concepção e construção. Isso resulta em edifícios com um desempenho térmico pobre. Após o edifício ser construído, o conforto térmico interior

é atingido utilizando sistemas de ar condicionado mecânicos que representam não apenas energia intensiva, mas também ambientalmente incorreta (Leo Samuel, 2018).

As mudanças nas temperaturas de resfriamento e aquecimento adequam-se a baixa inércia dos edifícios que pode ser minimizada pela incorporação da massa térmica na envolvente do edifício. A ideia é que, através da melhoria da inércia térmica destas construções, o excedente de calor e frio pode ser armazenado suavizando assim as cargas de arrefecimento e de aquecimento instantâneo vivenciados nesses edifícios de modo que, minimize o consumo de energia dos sistemas de aquecimento e de refrigeração mecânica (Nghana, 2016).

Os materiais de mudança de fase (Phase Change Materials - PCM) fornecem um meio tangível de incorporação de massa térmica nestas construções de baixa inércia sem necessitar de uma alteração drástica na prática de construção atual. PCMs são materiais de armazenamento de térmicas latentes que possuem maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume do que os materiais de construção típicos. Eles armazenar calor por uma mudança de fase do estado sólido para líquido, quando a temperatura ambiente aumenta acima do seu ponto de fusão e liberta o calor armazenado, assim como quando a temperatura ambiente cai abaixo do seu ponto de congelação, ele absorve o calor (Nghana, 2016).

As propriedades dos PCM, como temperatura de fusão e a gama, a capacidade de armazenamento de calor latente e condutividade térmica tem que ser otimizado especificamente para o clima. As características de construção, tais como o desenho da envolvente do edifício, a área de vitrificação e orientação, a estrutura de proteção, comportamento da ocupação, design HVAC, agenda de operações de construção, também são importantes uma vez que a concepção do edifício determina a blindagem do ambiente interior do ambiente exterior e pode ser melhorada para criar condições favoráveis para extrair mais benefícios dos PCMs (Zhang, 2006).

Investigações quanto à adequação de PCMs em climas diferentes produziram bons resultados. Em climas tropicais, até 2,5 horas e desvio de fase de 18% e a redução da carga de pico de arrefecimento é observada, assim como uma diminuição na carga de arrefecimento em torno de 29% e 100% (Zwanzing, 2013; Isa, 2010).

A utilização de materiais de enchimento em telhados e a presença de cavidades de ar nas paredes são encontrados para reduzir a transferência de calor através da estrutura de maneira significativa. O aumento na massa térmica da estrutura reduz a flutuação de temperatura e atrasa o tempo em que os extremos de temperatura são atingidos. A temperatura máxima da superfície do interior do telhado é atingido 3h 30min mais tarde na estrutura do bloco de lama (massa térmica mais elevada), em comparação com a da estrutura de bloco de lama estabilizada. A ventilação induzida provocada pelo aquecimento do telhado é encontrado para ter um impacto significativo sobre as temperaturas interiores. Um telhado inclinado, com ventilação induzida através das telhas cónicas encaixados nele, tem 1.2 e 1.9°C mais baixas temperaturas da superfície interior e exterior em comparação com a de um telhado com tais disposições. Assim, características arquitetônicas passivos em um edifício pode proporcionar conforto térmico se empregado corretamente (Leo Samuel, 2017).

Numerosos estudos têm pesquisado a aplicação interna de materiais de isolamento convencionais, feitas a partir de, por exemplo, lã de rocha, fibra de vidro expandido e poliestireno extrudido (EPS), silicato de cálcio, fibra de celulose. De um modo geral, as principais características investigadas foram espessuras de isolamento ótimas (Bianco, 2015), impacto ambiental (Santamouris, 2002), comportamento higrotérmico (Walker, 2015) e redução da demanda de aquecimento anual e de emissões de gases do efeito estufa (Santamouris, 2002).

Um material de isolamento não comumente usado na construção é aerogel. Embora descoberto na década de 1930, a investigação sobre o seu comportamento e desempenho como

um isolamento é mais recente. Devido à sua baixa condutividade térmica, aerogel atinge a redução elevada de energia em comparação com outros materiais da mesma espessura (Ibrahim, 2014). No entanto, a disponibilidade comercial de aerogel isolamento como um produto de construção de custo-eficácia é limitada. O desempenho térmico de materiais de isolamento à base de aerogel recentemente desenvolvidos foi avaliada, principalmente, em laboratório e por meio de modelos numéricos (Garay Martinez, 2016) e apenas em alguns casos em escala prédio e raramente em edifícios históricos (Cuce, 2014).

A investigação testando diferentes materiais de isolamento in situ em edifícios históricos descobriu-se que aerogel conseguiu o melhor desempenho térmico com baixa condutividade térmica, difusividade e efusividade, notável transmissão térmica (valor U) melhoria das paredes (Garay Martinez, 2016). Este desempenho foi obtido com aerogel que era mais fino do que os seus concorrentes. Uma aplicação particularmente útil para o isolamento de aerogel é o revestimento interno de cavidade das paredes sem isolamento (Cuce, 2014).

O novo produto desenvolvido é um material compósito que consiste em fibras de poliéster impregnado com partículas de aerogel de sílica. A vantagem que sobre os demais tipos de isolamento é que, além de ser adequado para cavidades estreitas, também é altamente termicamente eficiente, fornecendo o melhor desempenho em comparação com os outros tipos de isolamento. A principal desvantagem é a produção de poeira durante o processo de aplicação de sopro em, por conseguinte, é aconselhável usar máscaras e óculos durante a instalação e para soprar o material que proporciona a ventilação (Lucchi, 2017).

O consumo de energia edifício foi rapidamente aumentado devido à crescente demanda de conforto térmico dos edifícios pelos ocupantes. Recentemente, foi relatado que os edifícios foram responsáveis por cerca de 40% do consumo global de energia e contribuíram com mais de 30% do CO² emissões do mundo. Para melhorar a energia do edifício e eficiência, muitas tecnologias de poupança de energia têm sido desenvolvidas. Como uma tecnologia de

armazenagem térmica, PCM foi amplamente pesquisado em edifícios, porque ele pode armazenar e libertar o calor durante as mudanças de fase líquido-sólido. Construção de aplicações de PCMs possivelmente pode ser dividida em duas categorias - sistema passivo PCM e sistema ativo PCM. PCM sistema passivo refere-se a PCMs que estão integradas nos envelopes de construção para aumentar a massa térmica, o que é especialmente em envelopes de construção leves com baixa inércia térmica. PCM sistema ativo refere-se à capacidade de armazenamento de PCMs é integrado em sistemas de aquecimento ou arrefecimento, para atingir a redução de carga de pico e diminuição da procura eléctrica (Hwang, 2011).

Para o sistema passivo PCM, PCM foi geralmente incorporados nas paredes, pisos, telhados, janelas, etc. A inércia térmica do envelope do edifício foi reforçada pelo PCM. A incorporação do PCM e da envolvente do edifício também pode aumentar o conforto térmico interior, suavizando a temperatura interior com a sua capacidade de absorção/libertação térmica (Kong, 2017).

Um número crescente de edifícios públicos em Taiwan é construído envelopes com grandes áreas de fachada de vidro para a aparência estética nos últimos anos. No entanto, além de consumir quantidades consideráveis de energia, a grande quantidade de radiação solar que passa através da fachada de vidro, muitas vezes faz com que os ocupantes para sentir desconforto térmico (Hwang, 2011).

Wang *et al.* (2013) realizou uma investigação sobre os efeitos de fachadas de vidros duplos no consumo de energia, conforto térmico e condensação e comparação destes sistemas de fachada para vidraças individuais utilizados em Singapura. Os resultados da simulação mostrou que duplas fachadas envidraçadas são capazes de minimizar o consumo de energia, bem como para aumentar o conforto térmico. Foi examinou o impacto de sistemas de envidraçamento em consumo de energia e conforto em um edifício residencial. O impacto de oito diferentes tipos de vidros, quatro áreas de vidro e cinco diferentes tipos de saliência sobre

os ocupantes e o conforto térmico foram investigados em termos da ocorrência de desconforto e gravidade de sobreaquecimento. O tipo de vidros, áreas de janela e dispositivos de sombreamento efetivamente contribuem ao conforto térmico em região de clima quente e úmido (Hwang, 2011).

Padrões de vida, a arquitetura moderna globalizada, ilhas urbanas e as mudanças climáticas globais, juntamente com a acessibilidade de ar condicionado, fizeram com que a demanda de energia para o arrefecimento aumentar drasticamente. Estudos têm mostrado que a refrigeração e de ar condicionado são responsáveis por cerca de 15% do consumo total de energia elétrica no mundo. Por outro lado, o conforto térmico em construções modernas, seja livre ou ar-condicionado, tende a ser pobre. Design arquitetônico inferior utilizando abordagens de resfriamento passivos para o verão, enquanto que o uso constante de ar condicionado leva a condições desconfortáveis devido à má qualidade ambiental interna. Características climáticas pode significativamente ter influência no desempenho do ambiente construído, em termos de conforto térmico e consumo de energia (Du, 2014).

Uma alta intensidade de radiação solar é desfavorável, uma vez que aumenta a temperatura da superfície interior de vidro, que, em seguida, influencia a temperatura radiante média e, finalmente, o nível de conforto térmico. Além disso, a radiação solar agrava o desconforto quando cai diretamente sobre os ocupantes. Um indivíduo em contato com a radiação solar direta pode experimentar um ganho de calor equivalente a um aumento de 11°C na temperatura média radiante (Hwang, 2011).

A análise térmica de uma envolvente do edifício usando termografia infravermelha é um método comum para a avaliação qualitativa e quantitativa das irregularidades térmicas de envelopes de construção. Este tipo de análise é típico para investigar deficiências em envelopes de construção de áreas visualizando de perdas de calor indesejados e fontes de calor, pontes térmicas, o calor em infiltração, e avaliar o desempenho do isolamento. A câmera infravermelha

é uma eficiente ferramenta para diagnosticar e monitorizar a radiação de calor a partir de edifícios (Natephra, 2017).

O redirecionamento da luz através de reflexo, como forma de melhorar a iluminação natural em espaços de edifícios comerciais incorpora conceitos de construção de energia e gerenciamento de conforto através de sombreamento, o redirecionamento de luz solar através de painéis reflexivo e produção de electricidade. Esses fatores o tornam uma ferramenta versátil e eficaz para utilização em sistemas de construção de energia líquida de zero e otimização da gestão de energia do edifício (Powell, 2018).

Aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) são concebidos para responder aos sensores de temperatura do ar, mas não respondem a problemas de radiação solar. Num edifício as zonas do perímetro de vidros, a radiação solar e desempenho na janela influencia o nível de conforto térmico dos ocupantes fortemente (Hwang, 2011).

Nos últimos anos, pesquisadores, ambientalistas e arquitetos têm se tornado cada vez mais interessados no desempenho térmico dos edifícios no verão. Este interesse é principalmente dirigido para os dois principais aspectos, o consumo de energia e de conforto térmico (Du, 2014).

Os resultados do estudo paramétrico mostram a relação entre componentes de construção do envelope, no arrefecimento do consumo de energia e no conforto térmico. Através da concepção cuidadosa dos componentes de uma fachada de vidro, conforto e conservação de energia térmica podem ser alcançados. Os resultados deste estudo parecem indicar que os arquitetos precisam prestar atenção ao proporcionar conforto térmico para habitantes e oportunidades para a economia de energia dentro de suas propostas de design para a construção de Cortina (Hwang, 2011).

A essência do projeto bioclimático arquitetônico é entender o clima local e utilizar estratégias de design apropriadas para a construção de geração de forma e seleção de materiais,

a fim de criar ou modificar o microclima edifício necessário para um ambiente confortável. O modelo de conforto térmico adaptativo é adequado para avaliar o conforto térmico verão no microclima edifício, como seu núcleo suposição é de que “se ocorrer uma alteração de modo a produzir desconforto, as pessoas reagem de maneira que tendem a restaurar o seu conforto” e construção microclima fornece estas oportunidades, tomando todos os espaços (interiores, semi ao ar livre e exterior) de um único edifício em conta (Du, 2014).

A utilização de energia para sistemas HVAC continua a aumentar com a demanda cada vez maior para o conforto térmico. Por conseguinte, a importância dos materiais de isolamento em edifícios tem sido destacada. Os materiais de isolamento normalmente empregados são fibras de vidro, algodão, e espumas. Nesta perspectiva, os sistemas são atraentes devido à sua economia de energia em edifícios. Atualmente, a maior preocupação envolvendo o ambiente construído moderno está relacionada com a necessidade de estruturas sustentáveis e energia eficiente juntamente com design intuitivo e arquitetura. Gestão do abastecimento de energia e equilíbrio demanda exige sua preservação constante. O calor é armazenado ou libertado nos meios de armazenamento em conjunto com a alteração da temperatura. Por outro lado, nos materiais onde calor é armazenado ou libertado durante os processos de mudança de fase na forma de fusão/solidificação. PCM sofre uma mudança de fase do estado sólido para líquido, ou vice-versa quando a temperatura aumenta ou diminui. São os fenômenos de transformação de fase que permite que o PCM para armazenar e libertar quantidades significativas de calor latente durante as mudanças de fase. Esses sistemas são criadas por impregnação, inorgânicos ou compostos orgânicos eutéticas em elementos de construção, incluindo gesso e concreto. Eles são promissores devido à sua aceitação prevalente e adaptação posterior como materiais de construção em todo o ambiente construído. Isto permite a formação de um material de construção superior (gesso ou betão) com as propriedades

termicamente melhoradas para atenuar as variações de temperatura, ainda adequados para aplicações de habitação leves (Wahid, 2017).

Os vidros triplos estão se tornando cada vez mais utilizados em edifícios modernos, uma vez que proporcionam um melhor desempenho de energia e conforto térmico, fornecendo sombreamento no verão e isolamento extra no inverno. Também protege a janela de condensação sobre a superfície exterior da vidraça. A fim de investigar o desempenho influenciado por características diferentes e proporcionar uma melhor orientação para a concepção de janela de telhado, é necessário realizar uma análise global de diferentes parâmetros para otimizar os efeitos da janela e a forma como ela é instalada em um telhado. Outra função da janela do telhado é fornecer luz do dia (Liu, 2019).

Alguns dos principais desafios em relação ao futuro do planeta está relacionado a produção e consume de energia, uma vez que metade da população vive em áreas urbanas e 80% mora em países em desenvolvimento, onde as atividades relacionadas com a construção nunca estiveram mais intensa. Atualmente, cerca de 60% do consumo de energia elétrica está em edifícios em residencial e comercial este valor na América Latina é de 42%. No Brasil, o Balanço Energético Nacional revelou que edifícios são responsável por aproximadamente 50% do total consumo de eletricidade (Michels, 2018).

Portanto, na concepção arquitetônica, edifício apropriado e espaço não só são importantes em termos de estética, função e paisagem, mas também em termos de construção de desempenho e, especialmente desempenho térmico no verão. Construção de simulação de desempenho pode ajudar o projeto bioclimático de prever e conseguir um bom microclima edifício (Du, 2014).

Em regiões de clima quente, é de extrema importância para encontrar soluções para reduzir o ganho térmico em edifícios, e de uma maneira de conseguir isso é através do telhado, uma vez que nas construções horizontais esta superfície está mais exposta à radiação solar e,

por conseguinte, é responsável pela maior quantidade de transferência de calor para o interior do edifício. No Brasil, um país de altas temperaturas e radiação solar intensa, isolamento térmico no telhado ainda não é utilizado na maior parte dos edifícios (Michels, 2018).

O conceito de construção de produção de energia integrada em conjunto com a construção de gestão da procura de energia é aquela que utiliza alta tecnologia fotovoltaica em conjunto com um sistema de sombreamento e de controle de luz de dois eixos dinâmica em fachadas. As fachadas ativamente controladas também têm sido propostos como um método para gerenciar melhor a luz do dia para a construção de conforto dos ocupantes (Powell, 2018).

Melhorar o desempenho térmico da envolvente do edifício é uma das maneiras mais eficazes para prevenir excessivo consumo de energia para o aquecimento e arrefecimento e de manter as condições de conforto ótimos para os ocupantes. De acordo com o Padrão ASHRAE, os seguintes fatores físicos que são relevantes para o conforto térmico interior devem ser considerados durante a análise: temperatura do ar, da humidade relativa, temperatura radiante média (MRT), e velocidade do ar. A fim de obter tais informações, os sensores têm sido amplamente utilizados para monitorar e condições do edifício recorde. (Natephra, 2017).

4. CONCLUSÃO

Alguns dos principais desafios em relação ao futuro do planeta está relacionado a produção e consumo de energia. Padrões de vida, a arquitetura moderna globalizada, ilhas urbanas e as mudanças climáticas globais, juntamente com a acessibilidade de ar condicionado, fizeram com que a demanda de energia para o arrefecimento aumentasse drasticamente.

As pessoas passam a maior parte de suas vidas dentro de edificações. Por isso a tecnologia e os padrões de vida de desenvolvimento humano têm um alto nível de exigência de conforto em edifícios residenciais e comerciais, o que desperta uma expansão do consumo de energia. Adverso a isso, uma vez que o gasto de energia se transformou em um grave problema, as pessoas são pressionadas a encontrar um equilíbrio entre o uso do ar condicionado para poupar energia e, adicionalmente, usufruir do conforto térmico e da saúde.

Novos materiais para edifícios e espaços abertos estão sendo estudados e testados quanto a durabilidade, aspecto de desgaste, deterioração por UV e cooperação para o impacto da eficiência energética. Estes materiais revolucionários repercutirão no ambiente arquitetado em um iminente amanhã e suas sequelas devem ser assimiladas no cenário de preservação de energia e sustentabilidade ambiental.

Melhorar a eficiência energética em edifícios é primordial para atingir as metas definidas pelo acordo de Paris em 2015, reduzindo o consumo de energia e, conseqüentemente, a emissão de gases de efeito estufa sem comprometer o conforto humano. O consumo de energia nos edifícios está aumentando rapidamente devido ao aumento da população humana e o acelerado crescimento da construção civil em áreas urbanas. Estas dificuldades estão sendo agravadas com a crise mundial, incluindo o alto custo de energia e as carências urgentes para mitigar as emissões de gases com efeito estufa.

A aplicação de novos materiais na construção é interessante no Brasil, que possui clima tropical, e principalmente no Piauí, que apresenta altas taxas térmicas durante praticamente o ano todo. Os edifícios são usados principalmente no calor, portanto eles têm um elevado consumo de energia com altos gastos com ar condicionado. A otimização do desempenho energético dos edifícios pode ser obtida com refrigeração eficiente e tecnologias sem riscos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu-Harbich, L.V. ;*et al.* (2018). Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. *Building and Environment* 135, 257–268.
- Bagiorgas, H.S.; Mihalakakou, G. (2008). Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling. *Renew. Energ.*33, 1220–1227.
- Baneshi, M.; Maruyama, S.; Komiya, A. (2012). The effects of TiO₂ pigmented coatings Characteristics on temperature and brightness of a coated black substrate. *Sol. Energy* 86, 200–207.
- Bianco, L.; *et al.* (2015). Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: first experimental results. *Energy Build* 95, 86 e 91.
- Cuce, E.; *et al.* (2014). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy Build.* 77, 28 e 39.
- Deb, C.; Ramachandraiah, A. (2010). Evaluation of thermal comfort in a rail terminal location in India. *Build. Environ.* 45. 2571–2580.
- Deepak, B.; *et al.* (2014). Effect of construction materials on embodied energy and cost of buildings-A case study of residential houses in India up to 60 m² of plinth area. *Energy Build.* 69, 260–266.
- Du, X.; *et al.* (2014). Building microclimate and summer thermal comfort in free-running buildings with diverse spaces: A Chinese vernacular house case. *Building and Environment* 82, 215 e 227.
- Ezzeldin, S.; Rees, S.J. (2013). The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates. *Energy Build.* 65, 368–381.

Fang, Z.; *et al.* (2018). Experimental investigation on thermal comfort model between local thermal sensation and overall thermal sensation. *Energy and Buildings* 158, 1286–1295.

Ferrara, M. *et al.* (2018). Automated optimization for the integrated design process: the energy, thermal and visual comfort nexus. *Energy & Buildings* 168, 413–427.

Ferrari, C.; Muscio, A.; Siligardi, C.; Manfredini, T. (2015). Design of a cool color glaze for solar reflective tile application. *Ceram. Int.* 41, 11106–11116.

Gao, Q.; Wu, X.; Fan, Y. (2014). Solar spectral optical properties of rutile TiO₂ coated mica–titania pigments. *Dyes Pigments* 109, 90–95.

Gao, Q.; *et al.* (2016). Effect of Sn⁴⁺ doping on the photoactivity inhibition and near infrared reflectance property of mica-titania pigments for a solar reflective coating. *Ceramics International* 42, 17148–17153.

Garay Martinez, R.; *et al.* (2016). Thermal assessment of ambient pressure dried silica aerogel composite boards at laboratory and field scale. *Energy Build.* 128, 111 e 118.

George, G.; Vishnu, V.S.; Reddy, M.L.P. (2011). The synthesis, characterization and optical properties of silicon and praseodymium doped Y₆MoO₁₂ compounds: environmentally benign inorganic pigments with high NIR reflectance. *Dye Pigm.* 88, 109–115.

Ghahramani, A. (2018). Towards unsupervised learning of thermal comfort using infrared Thermography. *Applied Energy* 211, 41–49.

Han, Y.; Taylor, J.E.; Pisello, A.L. (2015). Toward mitigating urban heat island effects: Investigating the thermal-energy impact of bio-inspired retro-reflective building envelopes in dense urban settings. *Energy Build.* 102, 380–389.

Hatamipour, M.S.; Abedi, A. (2008). Passive cooling systems in buildings: some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region. *Energy Convers. Manage.* 49, 2317–2323.

- Hazbei, M.; *et al.* (2015). Reduction of energy consumption using passive architecture in hot and humid climates. *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 47, 16–27.
- Hwang, R.L.; Shu, S.Y. (2011). Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control. *Building and Environment* 46, 824 e 834.
- Ibrahim, M.; *et al.* (2014). A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating. *Build. Environ.* 81, 112 e 122.
- Ip, K.; *et al.* (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Build. Environ.* 45, 81–88.
- Isa, M.H.M.; *et al.* (2010). Preliminary study of passive cooling strategy using a combination of PCM and copper foam to increase thermal heat storage in building façade. *Sustainability* 2 (8), 2365 e 2381.
- Jeevanandam, P.; Mulukutla, R.S.; Phillips, M.; Chaudhuri, S.; Erickson, L.E.; Klabunde, K.J. (2007). Near infrared reflectance properties of metal oxide nanoparticles. *J. Phys. Chem. C* 111, 1912–1918.
- Kruger, E.L.; Drach, P. (2017). Identifying potential effects from anthropometric variables on outdoor thermal comfort, *Build. Environ.* 117, 230–237.
- Leo Samuel, D.G.; *et al.* (2017). Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials. *International Journal of Sustainable Built Environment* 6, 463–475.
- Levinson, R.; Berdahl, P.; Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 89, 351–389.
- Levinson, R.; Akbari, H.; Berdahl, P.; Wood, K.; Skilton, W.; Petersheim, J. (2010). A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 94, 946–954.

- Li, H.; *et al.* (2014). Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. *Renew. Energy* 62, 468–477.
- Liu, L.; Han, A.; Ye, M.; Feng, W. (2015). The evaluation of thermal performance of cool coatings colored with high near-infrared reflective nano-brown inorganic pigments: magnesium doped ZnFe₂O₄ compounds. *Sol. Energy* 113, 48–56.
- Liu, L.; Han, A.; Ye, M.; Zhao, M. (2015). Synthesis and characterization of Al³⁺ doped LaFeO₃ compounds: a novel inorganic pigments with high near-infrared reflectance. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells* 132, 377–384.
- Liu, L. *et al.* (2018). Quantitative effects of urban spatial characteristics on outdoor thermal comfort based on the LCZ scheme. *Building and Environment* 143, 443–460.
- Liu, M.; *et al.* (2019). Parametric analysis on the heat transfer, daylight and thermal comfort for a sustainable roof window with triple glazing and external shutter. *Energy & Buildings* 183, 209–221.
- Lucchi, E.; *et al.* (2017). Thermal performance evaluation and comfort assessment of advanced aerogel as blown-in insulation for historic buildings. *Building and Environment* 122, 258 e 268.
- Manzan, M. (2014). Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy Build.* 72, 431–440.
- Mastrapostoli, E.; Karlessi, T.; Pantazaras, A.; Kolokotsa, D.; Gobakis, K.; Santamouris, M. (2014). On the cooling potential of cool roofs in cold climates: use of cool fluorocarbon coatings to enhance the optical properties and the energy performance of industrial buildings. *Energy Build.* 69, 417–425.
- Maykot, J.K.; *et al.* (2018). A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. *Energy & Buildings* 178, 254–264.
- Michael, A.; *et al.* (2017). Natural ventilation for cooling in mediterranean climate: A case study in vernacular architecture of Cyprus. *Energy Build.* 144, 333–345.

Michels, C.; *et al.* (2018). Development of an experimental test rig for the evaluation of the thermal performance of building roofs. *Energy & Buildings* 180, 32–41.

Natephra, W.; *et al.* (2017). Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. *Building and Environment* 124, 194 e 208.

Nghana, B.; Tariku, F. (2016). Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. *Building and Environment* 99, 221e 238.

Pino, A.; *et al.* (2012). Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile. *Energy Build.* 47, 441–449.

Powell, D.; *et al.* (2018). A reflective adaptive solar façade for multi-building energy and comfort management. *Energy & Buildings* 177, 303–315.

Radhi, H.; *et al.* (2013). Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings. *Energy Build.* 56, 179–188.

Sameera, S.; Rao, P.P.; Divya, S.; Raj, A.K.V. (2015). Brilliant IR Reflecting yellow colorants in rare earth double molybdate substituted BiVO₄ solid solutions for energy saving applications. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 3, 1227–1233.

Santamouris, M.; Synnefa, A.; Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Sol. Energy* 85, 3085–3102.

Sekhar, S.C.; Goh, S.E. (2011). Thermal comfort and IAQ characteristics of naturally/mechanically ventilated and air-conditioned bedrooms in a hot and humid climate. *Build Environ.* 46, 1905–1916.

- Santamouris, M.; Dascalaki, E. (2002). Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the OFFICE project. *Build. Environ.* 37 (6), 575 e 578.
- Suehrcke, H.; *et al.* (2008). Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Energy Build.* 40, 2224–2235.
- Tan, Z.; *et al.* (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy Build.* 114, 265–274.
- Thongkanluang, T.; Kittiauchawal, T.; Limsuwan, P. (2011). Preparation and characterization of Cr₂O₃–TiO₂–Al₂O₃–V₂O₅ green pigment. *Ceram. Int.* 37, 543–548.
- Vijaykumar, K.C.K.; *et al.* (2007). A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates. *Energy Build.* 39, 886–892.
- Worrell, E. (2014). Cement and Energy. *Ref. Module Earth Syst. Environ. Sci.* 1, 307–315.
- Wahid, M.A.; *et al.* (2017). An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. *Applied Thermal Engineering* 112, 1240–1259.
- Walker, R.; Pavia, S. (2015). Thermal Performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. *Build. Environ.* 94, 155 e 165.
- Wang, J.L.; Li, Y.Q., Byon, Y.J.; Mei, S.G.; Zhang, G.L. (2013). Synthesis and characterization of NiTiO₃ yellow nano pigment with high solar radiation reflection efficiency. *Powder Technol.* 235, 303–306.
- Zaki, W.R.M.; *et al.* (2012). Environmental prospective of passive architecture design strategies in terrace houses. *Proc. Soc. Behav. Sci.* 42, 300–310.
- Zhang, Y.P.; *et al.* (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy & Build.* 38 (10), 1262 e1269.

Zinzi, M.; Carnielo, E.; Agnoli, S. (2012). Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application. *Energy Build.* 50, 111–119.

Zwanzig, S.D.; *et al.* (2013). Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope. *Energy Convers. Manag.* 69, 27e 40.

CAPÍTULO 2: ARTIGO 1

**COMPOSTO DE ESPUMA DE POLIURETANO/VERMICULITA COMO
MATERIAL SUSTENTÁVEL PARA RETARDANTE DE CHAMA VERTICAL**

**COMPOSTO DE ESPUMA DE POLIURETANO/VERMICULITA COMO
MATERIAL SUSTENTÁVEL PARA RETARDANTE DE CHAMA VERTICAL**

*Livia R. P. Silva Tenório Alves¹, Márcio Davi Tenório C. Alves², Luzia M. Castro Honorio³,
Alan I. Moraes¹, Edson C. Silva-Filho¹, Ramón Peña-Garcia⁴, Marcelo B. Furtini¹,
Durcilene A. da Silva⁵, Josy A. Osajima^{1,*}*

¹*Limav, Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados—LIMAV, UFPI, Teresina 64049-550, PI, Brasil*

²*Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFPI, Teresina 64049-550, PI, Brasil*

³*Departamento de Química e Física, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Areia 58397-000, PB, Brasil*

³*Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 54518-430, PE,
Brasil*

³*Centro de Pesquisa em Biodiversidade e Biotecnologia, BIOTEC, Universidade Federal do Delta do
ParnaíbaUFDPAr, Parnaíba 64202-020, PI, Brasil*

* Correspondence: durcileneas@gmail.com (D.A.d.S.); josyosajima@ufpi.edu.br (J.A.O.)

RESUMO

As espumas rígidas de poliuretano foram preparadas pelo método de espuma expansível em uma etapa usando moldagem por fundição seguida pela formação de compósitos à base de argila. Os compósitos de espuma de poliuretano/vermiculita (PU/VMT) foram controlados com base na adição da porcentagem de argila na formulação. O efeitos de modificações compostas foram avaliados por difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG/DTG) e microscopia eletrônica de varredura (SEM/EDS) aplicada ao retardamento de chama explorado pelo teste de queima vertical. Os resultados indicaram que a adição de argila controlou o tamanho relativo às espumas de poliuretano (PU). No entanto, eles exibiram estruturas esféricas com células com distribuição relativamente uniforme. A análise de XRD mostrou os picos definidos em $2\theta = 18^\circ$ e $2\theta = 73^\circ$ em relação à cristalinidade em formação e interação de segmentos rígidos foram identificados, como bem como a influência da redução da cristalinidade em compósitos. No teste de chama, o retardante de chama superfície foi bem sucedida em todos os compósitos, dado o sucesso da dispersibilidade e orientação planar das camadas de argila e a existência de um teor ideal de vermiculita (VMT) incorporado na matriz de espuma.

Palavras-Chaves: espumas de poliuretano; compósitos polímero-argila; retardador de chama.

ABSTRACT

Rigid polyurethane foams were prepared by the one-step expandable foam method using casting molding followed by forming clay-based composites. Polyurethane/vermiculite foam composites (PU/VMT) were controlled based on adding the percentage of clay in the formulation. The effects of composite modifications were evaluated by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TG/DTG), and scanning electron microscopy (SEM/EDS) applied to the flame retardancy explored by the vertical burn test. The results indicated that adding clay controlled the particle size concerning polyurethane (PU) foams. However, they exhibited spherical structures with closed cells with relatively uniform distribution. XRD analysis showed the peaks defined at $2\theta = 18^\circ$ and $2\theta = 73^\circ$ relative to the crystallinity in formation and interaction of rigid segments were identified, as well as the influence of crystallinity reduction in composites. In the flame test, the flame retardant surface was successful in all composites, given the success of the dispersibility and planar orientation of the clay layers and the existence of an ideal content of vermiculite (VMT) incorporated in the foam matrix.

Key-words: polyurethane foams; polymer–clay composites; flame retardant.

1. INTRODUÇÃO

As espumas de poliuretano (PU) sem aditivos retardantes de chama são materiais comerciais com baixa condutividade térmica, baixa densidade e baixo custo (Ciecierska *et al.*, 2016; Mahmood *et al.*, 2016). No entanto, eles têm um caráter inflamável e rápida propagação da chama através da formação de uma poça de fogo sob o objeto em chamas (Laufer *et al.*, 2012). Por isso, são amplamente utilizados como isolantes térmicos em aplicações de construção e engenharia e o desenvolvimento de tecnologias de transferência de calor, tornando-os um recurso atraente para minimizar o desperdício de energia causado por transferência de calor (Estravís *et al.*, 2016; Wang, 2015).

O isolamento térmico merece atenção especial no desenvolvimento da tecnologia de transferência de calor (Estravís *et al.*, 2016). No entanto, apesar das muitas vantagens da PU, muitos pesquisadores buscam o aperfeiçoamento do retardamento da chama e a supressão de fumaça. Os PUs retardadores de chama podem ser produzidos por compostos halogenados (Slezak, 1964), grafite expandido (EG) (Ye *et al.*, 2009), amônio polifosfato (APP) (Shi *et al.*, 2006), derivados de melamina (Chen, 2017), fósforo vermelho microencapsulado, e outros (Thirumal, 2010). Os compostos halogenados foram proibidos por vários países, como a França (Munsch, 2015), os Estados Unidos (Abe, 2021) e a União Europeia (Richardson, 2019), devido à sua toxicidade e bioacumulação. Por outro lado, outros aditivos retardadores de chama sempre prejudicam o PU, que podem danificar as propriedades de isolamento mecânico e térmico do PU, causando a lixiviação de retardadores de chama (Yang, 2019).

Nos últimos anos, os compósitos de poliuretano e/ou materiais poliméricos/argilosos ganharam atenção especial das indústrias, pois a combinação possui excelentes propriedades termomecânicas, físicas e químicas (Zhu, 2022). Esses compósitos de argila polimérica podem ser sintetizados pela incorporação de argilas inorgânicas dispersas em um polímero matriz. A fácil disponibilidade, as propriedades sustentáveis e o baixo custo dos

minerais argilosos exigem uma pequena porcentagem em peso da argila para produzir um nanocompósito útil, com uma notável melhoria nas propriedades. Tais como resistência à tração e módulo, permeabilidade ao gás, calor de deformação, temperatura e inflamabilidade sem afetar a homogeneidade óptica dos produtos tornam esses enchimentos atraentes (Sapalidis, 2011; Bee, 2018).

A baixa porcentagem de argilas em camadas ($\leq 10\%$ em peso) para a matriz de PU pode significativamente melhorar muitas propriedades essenciais, como resistência à tração, módulo e alongamento em propriedades de ruptura, resistência ao rasgo e retardantes de chama. Materiais poliméricos/cerâmicos geralmente exibem baixa condutividade térmica e são amplamente utilizados como isolantes térmicos. As propriedades térmicas desses elementos podem ser otimizadas pela incorporação de minúsculos poros, que são criados pela espuma ao longo do método de produção (Callister, 2015).

Entre as argilas utilizadas para a preparação de nanocompósitos polímero-argila (Ruiz-Hitzky, 2013), existe a vermiculita (VMT), que é um mineral argiloso com estrutura básica composta por folhas de cristais, geralmente coladas face a face, concebendo uma célula unitária de duas células tetraédricas separadas por uma folha octaédrica. Como a vermiculita pode ser expandida até 30 vezes seu volume original quando aquecida a $650\text{--}950^\circ\text{C}$, vermiculita expandida (EV) é frequentemente usada como aditivo em materiais e geopolímeros para obter maior porosidade e resistência ao fogo (Shmuradko, 2012; Hillier, 2013; Beal, 2019; Wang, 2022).

A vermiculita é um mineral de argila filossilicato hidratado intumescente com um produto químico ideal de fórmula $(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}]\text{OH}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Brindley, 1980). A vermiculita está entre os silicatos mais comumente usados na fabricação de bio-nanocompósitos. As argilas minerais podem modificar as características do polímero e melhorar sua processabilidade. Esses silicatos são compostos por camadas tetraédricas (silício,

tetracoordenadas) e octaédricas (alumínio, hexacoordenadas) com uma estrutura de cristalinidade lamelar que é formada por uma unidade de célula argila mineral 2:1 (Tjong, 2006; Alexandre, 2000; Júnior *et al.*, 2019).

O objetivo deste trabalho foi investigar as características morfológicas, estruturais e propriedades térmicas de estabilidade de espumas rígidas do compósito PU/VMT em diferentes concentrações (0, 5%, 10%, 15% e 20%), além de contribuir para o desenvolvimento de produtos retardadores de chama favoráveis ao crescimento sustentável.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Reagentes

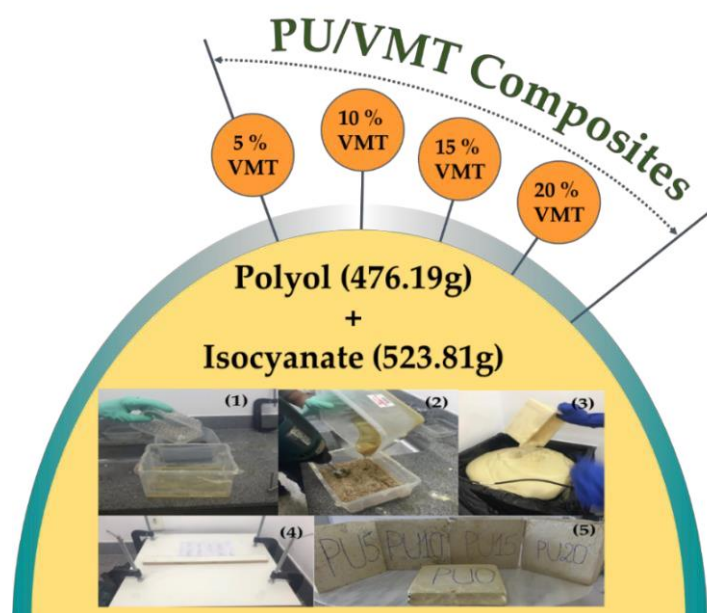
A vermiculita de expansão média foi comprada em Gaya Indústrias Minerais. O polioliol usado no PU/VMT é o polipropilenoglicol com viscosidade a 20°C = 1500 ± 300 cps (MCNS Inc., Seul, Coréia) contendo n-pentano (grau técnico). O isocianato utilizado foi 4,40-difenilmetano diisocianato (MDI) com NCO% = 31% e uma funcionalidade média de 2,8 (Tosoh Corporation, Tóquio, Japão). Os reagentes foram usados sem purificação.

2.2. Preparação de Espuma Rígida e Compósitos

As espumas rígidas de poliuretano foram preparadas usando o método de espuma expansível de uma etapa com molde de fundição. Primeiro, a vermiculita (VMT) foi dispersa no polioliol antes de adicionar o isocianato (Figura 1 (1)). Então, uma certa quantidade de isocianato de MDI (MDI/polioliol = 1,1 p/p) foi adicionado à mistura com agitação vigorosa por 10 s (Figura 1 (2)). A mistura foi despejada rapidamente em um molde para produzir espuma de PU (Figura 1 (3)). Os moldes contendo as PU foram mantidas em temperatura ambiente por 24 h (Figura 1 (4)). Por fim, as espumas de PU foram retiradas do molde e a superfície dura das espumas foi removida (Figura 1 (5)).

Dez amostras de cada formulação foram preparadas. Os compósitos foram chamados de PU/VMT x%, onde x é a quantidade de argila utilizada. Os componentes de espuma são mostrados na Tabela 1.

Figura 1. Etapas de preparação de espumas rígidas de poliuretano. Etapas de preparação de espumas rígidas de poliuretano. (1) Vermiculita (VMT) dispersa no polioliol antes da adição do isocianato; (2) Isocianato de MDI foi adicionado à mistura; (3) A mistura foi então rapidamente vertida em um molde para produzir espuma PU; (4) Os moldes contendo PU foram mantidos em temperatura ambiente por 24 h (5) espumas de PU.



Fonte: Autoria própria

Tabela 1. formulações de compósitos PU/VMT.

Amostras	Poliol	Isocianato	VMT
PU/VMT 0	476.19g	523.81g	-
PU/VMT 5	476.19g	523.81g	5%
PU/VMT 10	476.19g	523.81g	10%
PU/VMT 15	476.19g	523.81g	15%
PU/VMT 20	476.19g	523.81g	20%

Fonte: Autoria própria

2.3. Caracterizações

Os compósitos PU/VMT foram caracterizados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) usando um microscópio eletrônico de varredura com uma fonte de elétrons por emissão de campo FEG (Field Emission Gun), Quanta FEI 250. As micrografias foram obtidas a 20 kV e um tamanho de ponto de 3 com um Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), possibilitando avaliar sua composição química semiquantitativamente. Além disso, a análise

termogravimétrica foi realizada em um Shimadzu T.G., modelo TGA-51, sob ar com taxa de aquecimento de 10°C^{-1} da temperatura ambiente a 1000°C .

A análise do difratômetro de raios X (DRX) foi realizada nos compósitos em um Panalytical Difratômetro de raios X, Modelo Serie Empyrean. Primeiro, o índice de cristalinidade de cada amostra foi determinado pelo método de intensidade de pico representado pela Equação (1).

$$\text{IC} = (\text{Ic} - \text{Ia}) / \text{Ic} \times 100\%$$

Onde:

IC é o índice de cristalinidade (%);

Ic é a intensidade do pico cristalino (a.u.);

Ia é a intensidade do pico amorfo (a.u.).

2.4. Teste de inflamabilidade vertical

O teste de inflamabilidade realizado foi o Teste de Queima Padrão Vertical ASTM D 3801-96 (Becker, 2015). O tamanho da amostra foi de $130 \times 13 \times 3 \text{mm}$ (comprimento \times largura \times espessura).

De acordo com o Teste de Queima Padrão Vertical ASTM D 3801-96 (Método de Teste Padrão para Medir as Características Comparativas de Queima de Plásticos Sólidos em uma Posição Vertical), calculamos o tempo total de pós-chama para cada conjunto de cinco amostras, t_f , usando a seguinte Equação (2):

$$t(f) = \sum_{i=1}^5 (t_{1,i} + t_{2,i}) \quad (2)$$

Onde:

t_f = tempo total de chama, s;

$t_{1,i}$ = tempo pós-chama após o primeiro impacto da chama, s;

$t_{2,i}$ = tempo pós-chama após o impacto da segunda chama, s, do i-espécime.

Para o teste de queimadura padrão vertical (ASTMD 3801-96) [29], foram testadas cinco amostras testadas de cada formulação. As amostras foram testadas em atmosfera ambiente e umidade relativa de 45 a 75%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de TG/DTG, DRX, MEV e EDS

As estabilidades térmicas dos compósitos PU/VMT x% ($x = 0\%$, 5% , 10% , 15% , e 20%) foram estudados e analisados pelo comportamento das curvas TG/DTG mostradas na Figura 2 e na Tabela 2. Para o material de controle, PU/VMT 0% (Figura 2, (a1 e b1)), foi possível observar quatro estágios de perdas de massa, sendo o primeiro referente à perda de água ou gases fisissorvidos. As outras perdas são características do PU ocorrendo no segundo evento, incluindo a decomposição do grupo carbamato na cadeia principal do PU na ligação C–O para formar isocianato e polioliol. No terceiro evento, a continuação da decomposição de intermediários (difênil etil alofanato) ocorre em aminas primárias ou secundárias, alceno e CO_2 . No quarto evento, polioliol cadeias são degradadas, liberando uma grande quantidade de CO_2 . Os valores dos eventos térmicos estão resumidos na Tabela 2 (Wang, 2019; Meng, 2019; Kirba, 2020). Os materiais PU/VMT 5% (Figura 2 (a2 e b2)), PU/VMT 10% (Figura 2 (a3 e b3)), PU/VMT 15% (Figura 2 (a4 e b4)) e PU/VMT 20% (Figura 2 (a5 e b5)) mostrou um perfil semelhante ao material de controle PU/VMT0%, com exceção do valor residual. Este fenômeno é semelhante aos resultados de Meng *et al.* (2019). Eles estudaram um revestimento auto-regenerativo baseado em espuma de poliuretano flexível e o trabalho de Wang *et al.* (2017) apresenta perfis muito semelhantes das curvas TG e DTG de espumas de PU. Além disso,

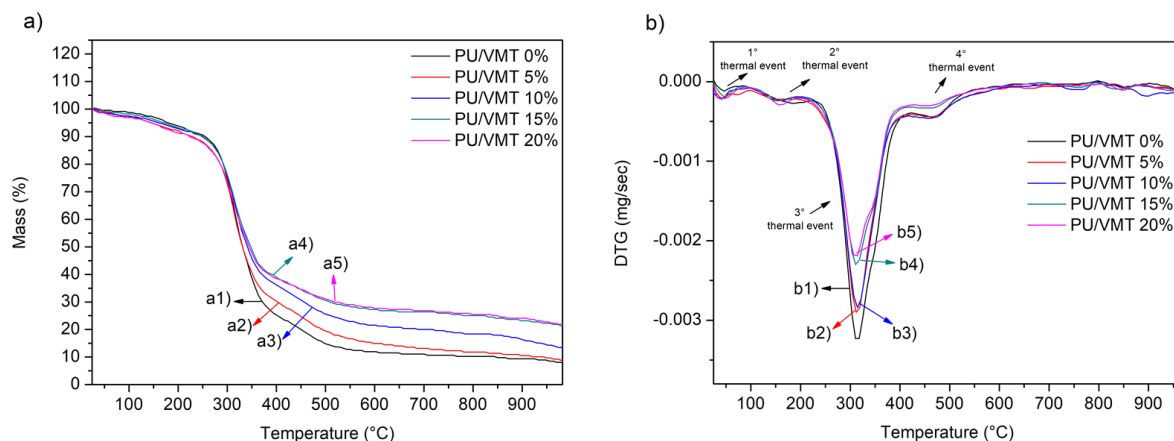
Miedzińska *et al.* (2021) indicam estágios de decomposição térmica em torno de $T_{max} = 215^{\circ}\text{C}$ (1º Estágio), 319°C (2º Estágio) e 591°C (3º Estágio), corroborando os dados obtidos neste trabalho experimentalmente.

Tabela 2. Perda de peso, faixa de temperatura, temperatura máxima de degradação e resíduo de amostras.

Amostras	Perda de massa (%)	Faixa de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura de pico ($^{\circ}\text{C}$)	Resíduo (%)
PU/VMT 0	1,07%	25-86 $^{\circ}\text{C}$	47 $^{\circ}\text{C}$	9.10%
	6,83%	86-225 $^{\circ}\text{C}$	182 $^{\circ}\text{C}$	
	69,34%	225-425 $^{\circ}\text{C}$	310 $^{\circ}\text{C}$	
	14,77%	425-985 $^{\circ}\text{C}$	468 $^{\circ}\text{C}$	
PU/VMT 5	3,02%	25-99 $^{\circ}\text{C}$	47 $^{\circ}\text{C}$	9.93%
	4,42%	99-188 $^{\circ}\text{C}$	157 $^{\circ}\text{C}$	
	64,76%	188-422 $^{\circ}\text{C}$	312 $^{\circ}\text{C}$	
	17,88%	422-988 $^{\circ}\text{C}$	459 $^{\circ}\text{C}$	
PU/VMT 10	3,02%	21-96 $^{\circ}\text{C}$	41 $^{\circ}\text{C}$	13.72%
	4,42%	96-196 $^{\circ}\text{C}$	153 $^{\circ}\text{C}$	
	64,76%	196-417 $^{\circ}\text{C}$	314 $^{\circ}\text{C}$	
	17,88%	417-982 $^{\circ}\text{C}$	461 $^{\circ}\text{C}$	
PU/VMT 15	3,02%	24-85 $^{\circ}\text{C}$	46 $^{\circ}\text{C}$	22.53%
	4,42%	85-195 $^{\circ}\text{C}$	164 $^{\circ}\text{C}$	
	64,76%	195-421 $^{\circ}\text{C}$	311 $^{\circ}\text{C}$	
	17,88%	421-987 $^{\circ}\text{C}$	458 $^{\circ}\text{C}$	
PU/VMT 20	3,02%	28-86 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	23.53%
	4,42%	86-197 $^{\circ}\text{C}$	160 $^{\circ}\text{C}$	
	64,76%	197-426 $^{\circ}\text{C}$	314 $^{\circ}\text{C}$	
	17,88%	426-983 $^{\circ}\text{C}$	454 $^{\circ}\text{C}$	

Fonte: Autoria própria

Figura 2. (a) Curvas TG dos compósitos: PU/VMT 0% (a1), PU/VMT 5% (a2), PU/VMT 10% (a3), PU/VMT 15% (a4) e (b) DTG: PU/VMT 20% (a5); DTG: PU/VMT 0% (b1), PU/VMT 5% (b2), PU/VMT 10% (b3), PU/VMT 15% (b4) e PU/VMT 20% (b5).



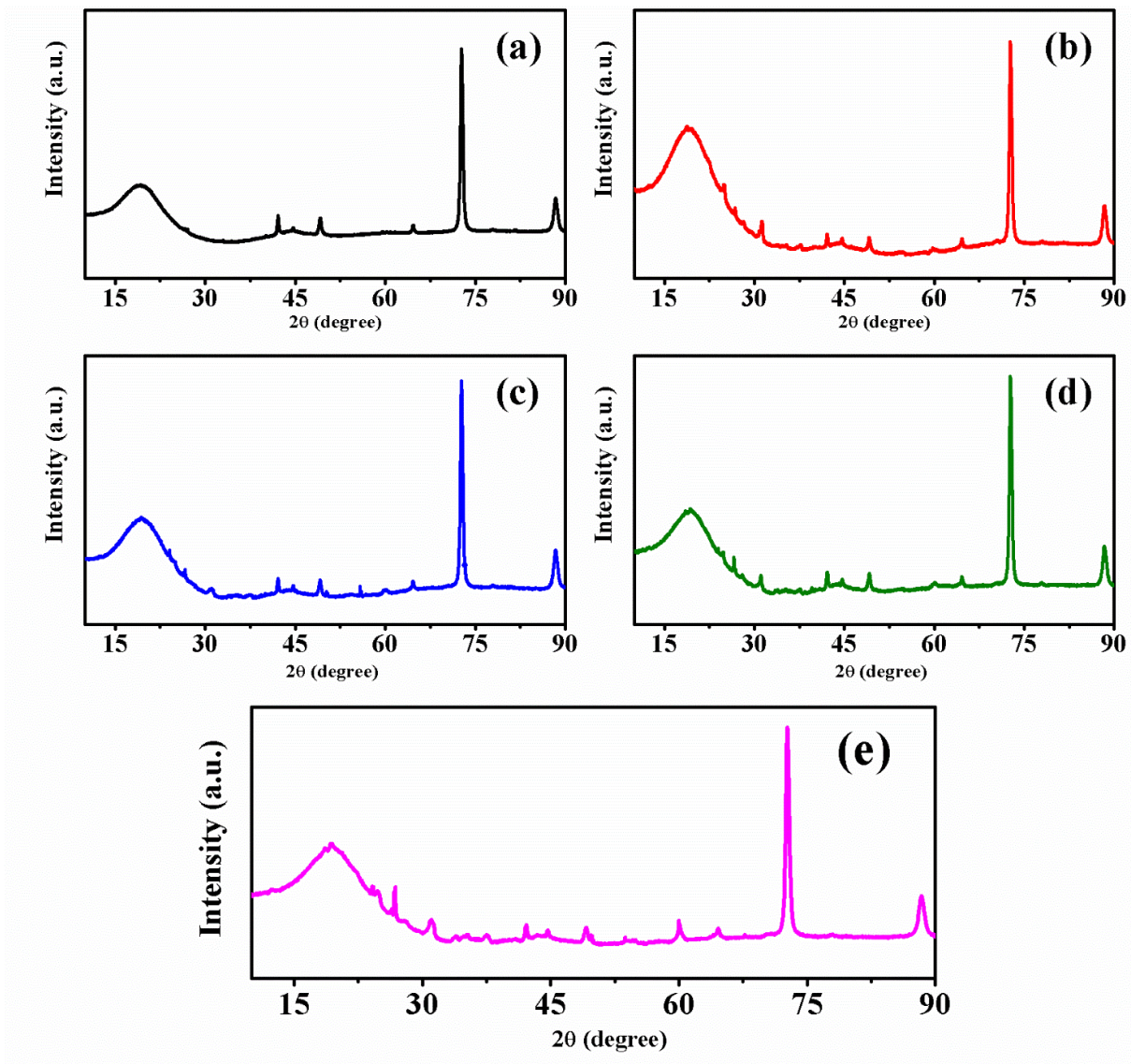
Fonte: Autoria própria

Para o controle PU/VMT 0%, há uma quantidade de massa residual de aproximadamente 9,095% (Tabela 2). No entanto, após a adição de argila, há um aumento no resíduo, que cresce à medida que a argila aumenta na composição do material: PU/VMT 5%; PU/VMT 10%; PU/VMT 15%; e PU/VMT 20%, 9,93%, 13,72%, 22,53% e 23,53% (Tabela 2), respectivamente, mostrando uma relação entre os eventos de degradação (principalmente de uma temperatura acima de 300°C, o aumento na quantidade de argila e massas residuais. Este massa residual aumenta à medida que a argila não se decompõe igualmente em PU (composto orgânico), pois é um mineral. A maior parte de sua massa não se degrada com a temperatura, com apenas água saindo a condensação de grupos hidroxila na superfície e estrutura do VMT. Curva 2 (b) mostra as derivadas da curva TG. É possível observar a semelhança de eventos em todos os sistemas, com variação significativa ocorrendo no terceiro evento, com máxima degradação a 310°C. A maior intensidade (ou área) ocorreu para PU/VMT0% até o PU/VMT20%. Corroborar com a discussão anterior, uma vez que o integração da área deste pico é proporcional à massa degradada na temperatura intervalo, indicando mais uma vez a presença de argila e a proporcionalidade com a massa adicionados em diferentes sistemas.

A Figura 3 mostra os difratogramas dos compósitos PU/VMT (0%, 10% e 20%) com um pico largo em $2\theta = 18^\circ$. Outro é definido em um $2\theta = 73^\circ$ em relação à cristalinidade na

formação e interação de segmentos rígidos. Os difratogramas mostram a natureza predominantemente amorfa do poliuretano e seus derivados, dada a ausência de picos de difração (Mahfuz, 2004).

Figura 3. Difratograma composto: PU/VMT 0% (a), PU/VMT 5% (b), PU/VMT 10% (c), PU/VMT 15% (d), e PU/VMT 20% (e).



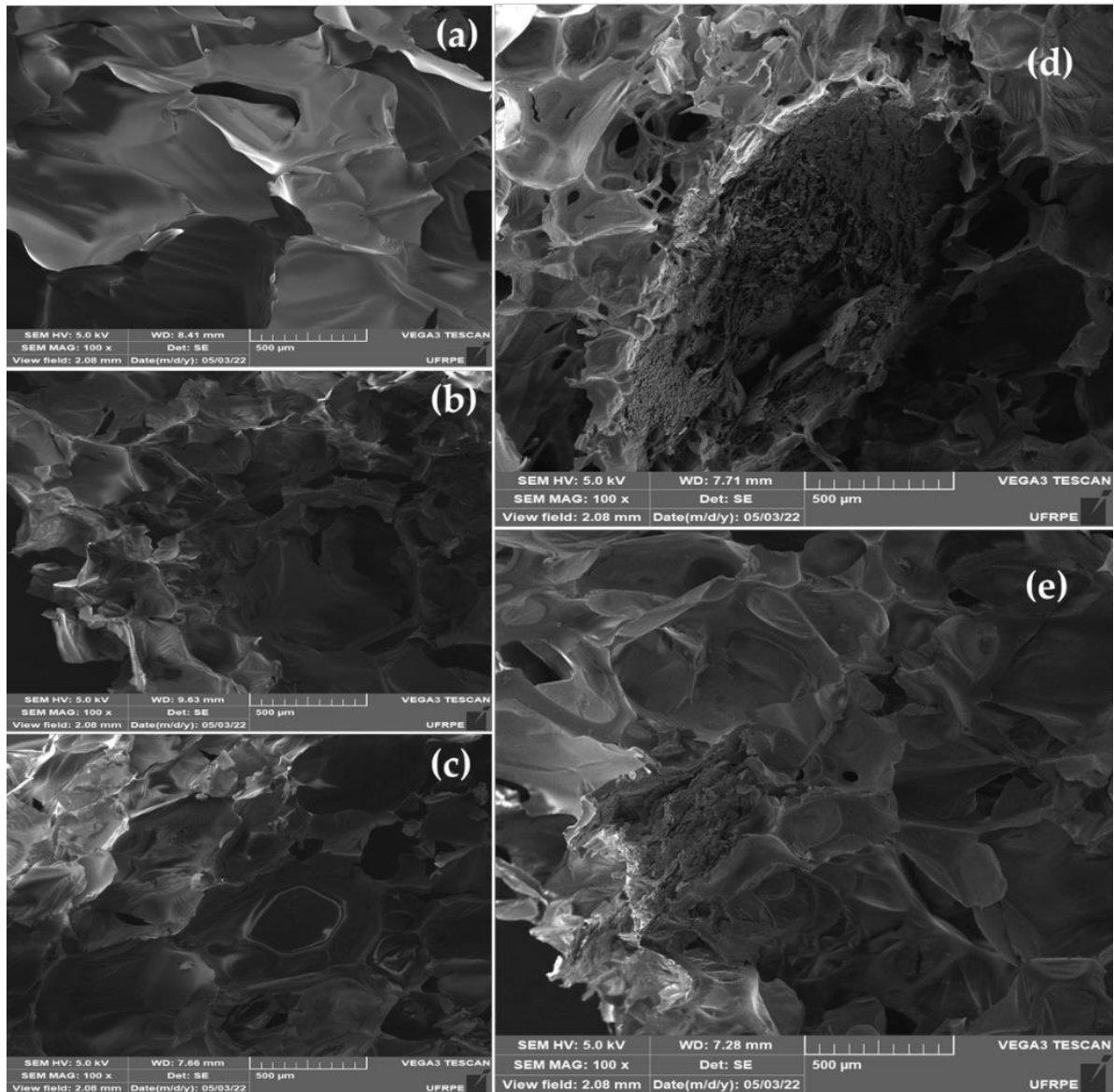
Fonte: Autoria própria

A cristalinidade diminui com o aumento da vermiculita até um limite de 20% m/m de carga vegetal. Usando o método de medição de intensidade de pico, é possível identificar que

o índice de cristalinidade para poliuretano e seus compósitos foi de aproximadamente 82,19% para PU/VMT 0%, 64,58% para PU/VMT 5%, 72,61% para PU/VMT 10%, 74,38% para PU/VMT 15% e 63,78% para PU/VMT 20%. Portanto, em todas as composições, a adição de vermiculita influenciou na formação e compactação dos segmentos rígidos, o que explica a redução da cristalinidade nos compósitos (Figura 3).

A Figura 4 mostra imagens SEM/EDS das superfícies de compósitos PU/VMT. Toda microscopia exhibe estruturas esféricas fechadas e faces energeticamente estáveis. Além de apresentando sítios de nucleação não distribuídos regularmente devido à aglomeração e/ou excesso Cargas de VMT, resultando na formação de morfologia não uniforme, conforme mostrado na Figura 4. Para Xia, *et al.* (2019), esse fenômeno é explicado pelo fato da VMT atuar como um preenchimento na parede do compósito, restringindo o aumento de tamanho, distribuição e uniformidade. No compósito puro, é possível observar um maior tamanho de estruturas desordenadas em torno do compósitos com 5%, 10%, 15% e 20% de argila orgânica. Esse mesmo comportamento foi observado por Harikrishnan, *et al.* (2007) ao avaliar micrografias de espumas de poliuretano precursoras com um carbono vítreo reticulado. Para os autores, a diminuição do tamanho da célula da espuma de carbono feita do precursor de espuma composta é clara sobre espuma de carbono feita de espuma PU pura.

Figura 4. Micrografias SEM dos compósitos: PU/VMT 0% (a), PU/VMT 5%(b), PU/VMT 10% (c), PU/VMT 15% (d), e PU/VMT 20% (e).



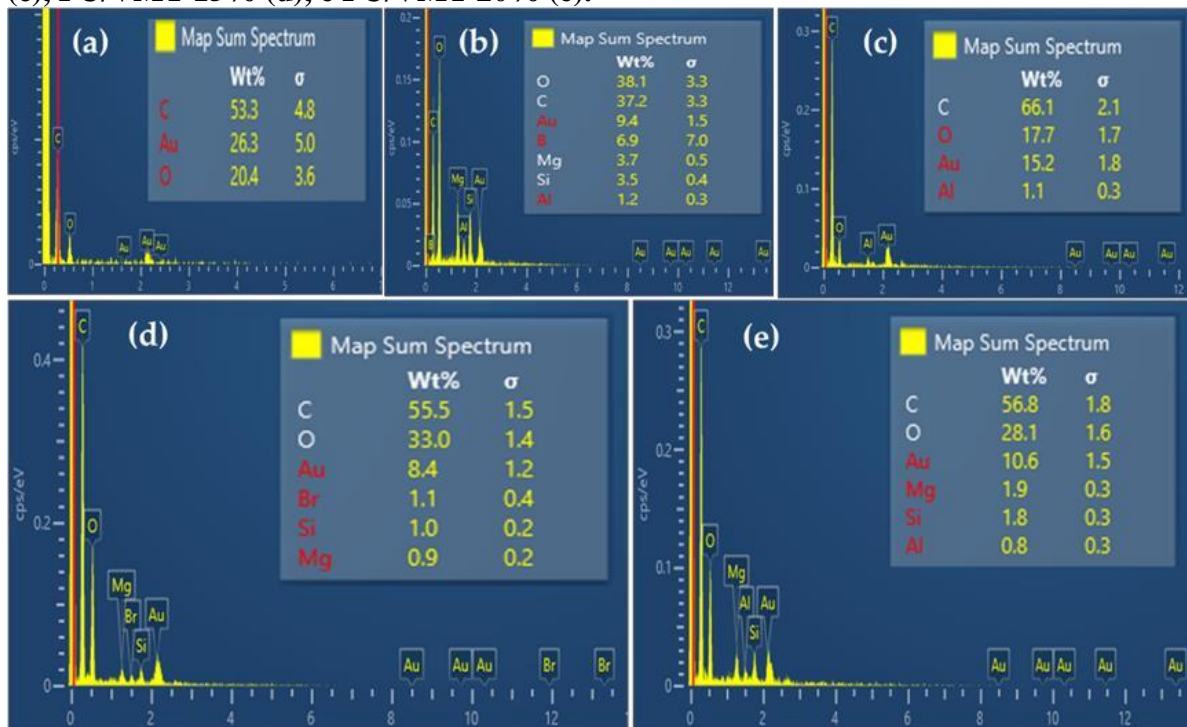
Fonte: Autoria própria

A incorporação de vermiculita (5%, 10%, 15% e 20%) interfere no diâmetro e distribuição de poros devido ao aumento da viscosidade do polioli (Wang, *et al.*, 2019), sugerindo que a quantidade de argila muda a orientação e dispersão com o processo de formação de espuma uma vez que pode atuar como agente nucleante devido à sua boa compatibilidade com o poliéster e conseqüentemente padronizar os sítios de nucleação (Han *et al.*, 2020); ou seja, a barreira de energia de nucleação favorece a interface carga-polímero (Laufer, 2012). Wang, *et al.* (2019) reforçam a relação entre o real identificação da argila. Os arredores do núcleo na

forma são gerados por interface polímero e argila dispersos no meio. A morfologia e propriedades dos compósitos dependem de vários fatores que orientam a distribuição e percentuais relativos, como a grupos funcionais da argila incorporada, o procedimento de síntese, o peso molecular dos polióis, reações químicas e as interações físicas envolvidas (Cao, 2005).

A análise EDS (Figura 5) mostra a composição elementar dos compósitos PU/VMT. O compósito sem argila na espuma precursora de PU apresenta os elementos típicos, como carbono (53,3%), presença de oxigênio (20,4%) e ouro (26,3%) atribuído ao porta-amostra do equipamento. Os demais compósitos na presença de vermiculita apresentam boro, alumínio, silício e magnésio, oriundos da decomposição da argila, que é um aluminossilicato composto por numerosos elementos químicos, sugerindo assim a incorporação de argila em PU. Em pequenas quantidades, cloro (PU/VMT 5%) e bromo (PU/VMT 10%) são elementos residuais.

Figura 5. Perfil EDS de compósitos: PU/VMT 0% (a), PU/VMT 5% (b), PU/VMT 10% (c), PU/VMT 15% (d), e PU/VMT 20% (e).

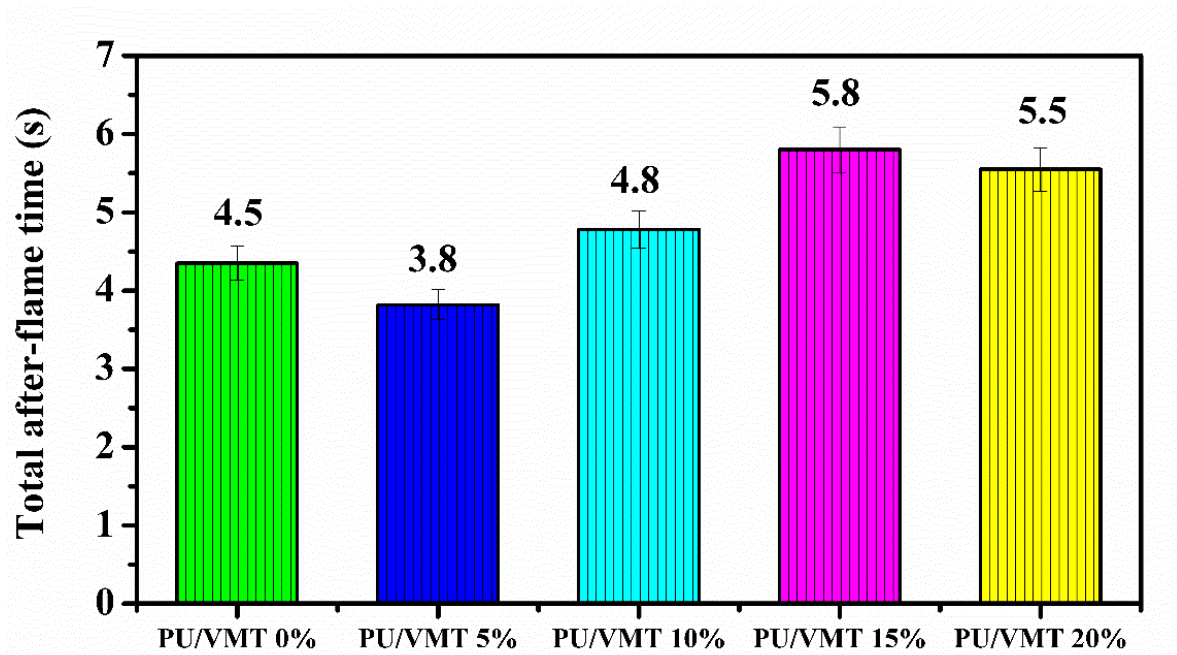


Fonte: Autoria própria

3.2. Desempenho dos Compósitos no Teste de Chama Vertical

O teste de chama vertical é uma maneira rápida e direta de avaliar a retardação de chama (Zhang, 2018). No teste de inflamabilidade vertical (Figura 6), o tempo total pós-chama foi observado para cada conjunto de composições compostas (0%, 5%, 10%, 15% e 20%). O VMT atua como um reforço carga, e por ser um material inorgânico, pode contribuir para a redução da inflamabilidade de materiais poliméricos. A resistência à chama é vertical, e o compósito contendo 15% VMT mostrou melhor desempenho de queima. Além disso, obteve melhor dispersibilidade e orientação planar das camadas de argila, dando um teor de VMT ideal para ser incorporado a matriz de espuma.

Figura 6. Testes de inflamabilidade na vertical.



Fonte: Autoria própria

A proporção da mistura entre os componentes garante alta atividade na interação entre as fases (PU + VMT) e um desempenho satisfatório (Xia, 2019; Rabello, 2021). Além disso, o VMT é uma argila natural e econômica, muito utilizada principalmente por ser termoestável e

retardante de chama, o que pode ter favorecido o resultado de chama (Miedzińska *et al.*, 2021), como mostra a Figura 6.

No entanto, o teste de chama das espumas de PU não apresentou regularidade com o aumento da vermiculita de 0 a 20%. Sabe-se que quando expostas ao fogo, as camadas de PU começam a queimar rapidamente e formam uma camada inflável de carbono (Li *et al.*, 2021). Acreditamos que após a incorporação com VMT, a área exposta das espumas diminui, dificultando a ventilação do oxigênio e consequentemente a queima (Yan *et al.*, 2017). Assim, infere-se que naquele momento, a razão mássica de PU por unidade de volume foi reduzido com o aumento da incorporação de VMT. Por sua vez, precisa mais oxigênio para manter a queima após a adição de argila (Yan *et al.*, 2017). Além disso, outro ponto a nota é que o excesso de VMT impede a homogeneização na matriz, o que resultaria na formação de uma camada de carbono residual irregular após a queima, levando à diminuição da queima quando o conteúdo de VMT excede 15%.

4. CONCLUSÃO

Compósitos PU/VMT foram sintetizados com sucesso pelo método de moldagem por fundição. A mistura de vermiculita com PU proporcionou boa dispersão e proporcionalidade, as composições adicionadas da argila. O compósito PU/VMT15% é uniforme, reforçando a custo-benefício com vantagens ambientais e econômicas. Esse comportamento reforça os dados de inflamabilidade, e a adição de VMT afetou a formação e compactação dos segmentos rígidos, reduzindo o grau de cristalinidade dos compósitos. A inflamabilidade foi reduzida no compósito PU/VMT 15%, apresentando melhor desempenho de queima e conseqüentemente alcançando melhor dispersibilidade e orientação planar das camadas VMT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ciecierska, E.; Jurczyk-Kowalska, M.; Bazarnik, P.; Gloc, M.; Kulesza, M.; Kowalski, M.; Krauze, S.; Lewandowska, M. (2016). Inflamabilidade, propriedades mecânicas e estrutura de espumas rígidas de poliuretano com diferentes tipos de materiais de reforço de carbono. *Compos. Estrutura*. 140, 67-76.
- Mahmood, N.; Yuan, Z.; Schmidt, J.; Xu, C. (Charles) (2016). Despolimerização de ligninas e suas aplicações para a preparação de polióis e espumas rígidas de poliuretano: uma revisão. *Renovar. Sustentar. Energia Rev.* 60, 317-329.
- Laufer, G.; Kirkland, C.; Caim, A.A.; Grunlan, J.C. (2012). Clay–Chitosan Nanobrick Walls: Barreira de Gás Completamente Renovável e Nanorevestimentos retardadores de chama. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 4, 1643-1649.
- Estravís, S.; Tirado-Mediavila, J.; Santiago-Calvo, M.; Ruiz-Herrero, J.L.; Villafañe, F.; Rodríguez-Pérez, M.Á. (2016). Poliuretano rígido espumas com nanoargilas infundidas: Relação entre estrutura celular e condutividade térmica. *EUR. Polím. J.*, 80, 1-15.
- Wang, S.; Chen, H.; Liu, N. (2015). Ignição de espuma de poliestireno expansível por uma partícula quente: Um estudo experimental e numérico. *J. Perigo. Mater.* 283, 536-543.
- Slezak, F.B.; Stallings, J.P.; Rose, I. (1964). Derivados de Xileno Clorados para Espumas de Poliuretano Rígidas Retardadoras de Chamas. *Ind. Eng. Química Prod. Res.* 3, 292-294.
- Ye, L.; Meng, X.-Y.; Ji, X.; Li, Z.-M.; Tang, J.-H. (2009). Síntese e caracterização de grafite-poli(metilmacrilato) expansível partículas compostas e sua aplicação no retardamento de chama de espumas rígidas de poliuretano. *Polím. Degradar. Punhalada*. 94, 971-979.
- Shi, L.; Li, Z.-M.; Xie, B.-H.; Wang, J.-H.; Tian, C.-R.; Yang, M.-B. (2006). Retardância de chama de partículas de grafite expansíveis de tamanhos diferentes para espumas rígidas de poliuretano de alta densidade. *Polím. Int.* 55, 862-871.

Chen, Y.; Li, L.; Wang, W.; Qian, L. (2017). Preparação e caracterização de polifosfato de amônio modificado na superfície e seu efeito na retardação de chama de espuma rígida de poliuretano. *J. Appl. Polím. Sci.* 134, 45369.

Thirumal, M.; Khastgir, D.; Nando, G.B.; Naik, Y.P.; Singha, N. K. (2010). PUF retardante de chama sem halogênio: Efeito da melamina compostos em propriedades mecânicas, térmicas e retardantes de chama. *Polím. Degradar. Punhalada.* 95, 1138-1145.

Munsch, C.; Olivier, N.; Veyrand, B.; Marchand, P. (2015). Ocorrência de contaminantes orgânicos halogenados legados e emergentes em mariscos marinhos ao longo das costas francesas. *Quimiosfera* 118, 329-335.

Abe, F.R.; de Oliveira, A.Á.S.; Marino, R.V.; Rialto, T.C.R.; Oliveira, D.P.; Dorta, D. J. (2021). Uma comparação da toxicidade no desenvolvimento de retardante de chama bromado e sem halogênio em peixe-zebra. *Ecotoxicol. Ambiente. Saf.* 208, 111745.

Richardson, S.D.; Kimura, S. Y. (2019). Análise da Água: Contaminantes Emergentes e Problemas Atuais. *Anal. Química* 77, 3807-3838.

Yang, H.; Yu, B.; Canção, P.; Maluk, C.; Wang, H. (2019). Engenharia de revestimento de superfície para espumas de poliuretano flexíveis retardantes de chama: A revisão crítica. *Compos. Parte B Eng.* 176, 107185.

Zhu, M.; Ma, Z.; Liu, L.; Zhang, J.; Huo, S.; Song, P. (2022). Recentes avanços em espuma de poliuretano rígido retardante de fogo. *J. Mater. Sci. Technol.* 112, 315-328.

Sapalidis, A.A.; Katsaros, F.K.; Kanellopoulos, N. K. (2011). Nanocompósitos PVA/Montmorilonita: Desenvolvimento e Propriedades. *Dentro Nanocompósitos e Polímeros com Métodos Analíticos*; InTech: Londres, Reino Unido.

Bee, S.-L.; Abdullah, M.A.A.; Bee, S.-T.; Sin, L.T.; Rahmat, A. R. (2018). Nanocompósitos poliméricos à base de montmorilonita sililada: A Reveja. *Prog. Polím. Sci.* 85, 57-82.

Callister, W.D., Jr.; Rethwisch, D. G. (2015). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 8ª ed.; LTC: Rio de Janeiro, Brasil.

Ruiz-Hitzky, E.; Darder, M.; Fernandes, F.M.; Wicklein, B.; Alcântara, A.C.S.; Aranda, P. (2013). Bionanocompósitos à base de argilas fibrosas. *Prog. Polím. Sci.* 38, 1392-1414.

Ruiz-Hitzky, E.; Aranda, P.; Álvarez, A.; Santarén, J.; Esteban-Cubillo, A. (2011). Materiais Avançados e Novas Aplicações da Sepiolite e Paligorsquita. Em *Desenvolvimentos na Ciência da Argila*; Elsevier: Amsterdã, Holanda; Volume 3, pp. 393–452. ISBN 9780444536075.

Shmuradko, V.T.; Panteleenko, F.I.; Reut, O.P.; Panteleenko, E.F.; Kirshina, N.V. (2012). Composição, estrutura e formação de propriedade de materiais de isolamento térmico de fogo e refletores de calor à base de vermiculita para geração de energia industrial. *Refração. Ind. Ceram.* 53, 254-258.

Brindley, G.W.; Brown, G. (1980). *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*; Sociedade Mineralógica da Grã-Bretanha e Irlanda: Londres, Reino Unido.

Hillier, S.; Marwa, E.M.M.; Arroz, C. M. (2013). Sobre o mecanismo de esfoliação da ‘Vermiculita’. *Mineiro de Argila.* 48, 563-582.

Beal, B.; Selby, A.; Atwater, C.; James, C.; Viens, C.; Almquist, C. (2019). Uma Comparação das Propriedades Térmicas e Mecânicas da Argila Tijolos Preparados com Três Diferentes Aditivos Formadores de Poros: Vermiculita, Cinza de Madeira e Serragem. *Ambiente. Prog. Sustentar. Energia* 38, 13150.

Wang, S.; Gainey, L.; Marinelli, J.; Cervo, B.; Wang, X.; Mackinnon, I.D.R.; Xi, Y. (2022). Efeitos da vermiculita no comportamento térmico in-situ, microestrutura, propriedades físicas e mecânicas de tijolos de barro cozidos. *Constr. Construir. Mater.* 316, 125828.

Tjong, S.C. (2006). Propriedades estruturais e mecânicas de nanocompósitos poliméricos. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 53, 73-197.

Alexandre, M.; Dubois, P. (2000). Nanocompósitos de silicato em camadas de polímero: Preparação, propriedades e usos de uma nova classe de materiais. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 28, 1–63.

Júnior, R.M.S.; de Oliveira, T.A.; Araque, L. M.; Alves, T.S.; de Carvalho, L.H.; Barbosa, R. (2019). Comportamento térmico de materiais biodegradáveis bionanocompósitos: Influência das argilas bentonita e vermiculita. *J. Mater. Res. Technol.* 8, 3234-3243.

Becker, F.G.; Cleary, M.; Equipe, R. M.; Holtermann, H.; O, D.; Ordem do Dia, N.; Ciência, P.; Sk, S.K.; Hinnebusch, R.; Hinnebusch, A. R. (2015). Método de teste padrão para medir as características comparativas de queima. *Coudelaria Síria.* 7, 37-72.

Wang, H.; Li, T.-T.; Ren, H.; Peng, H.; Huang, S.-Y.; Lin, Q.; Lin, J.-H.; Lou, C.-W. (2019). Poliuretano preenchido com vermiculita expandida Compósitos Biônicos Foam-Core: Preparação e Propriedades Térmicas, de Compressão e de Amortecimento Dinâmico. *Polímeros* 11, 1028.

Meng, D.; Liu, X.; Wang, S.; Sun, J.; Li, H.; Wang, Z.; Gu, X.; Zhang, S. (2021). Revestimento complexo polieletrólito auto-regenerativo para chama espuma de poliuretano flexível retardante com propriedades mecânicas aprimoradas. *Compos. Parte B Eng.* 219, 108886.

Wang, W.; Pan, Y.; Pan, H.; Yang, W.; Liew, K. M.; Canção, L.; Hu, Y. (2016). Síntese e caracterização de nanofolhas de MnO₂ baseadas revestimento multicamadas e aplicações como retardante de chama para espuma flexível de poliuretano. *Compos. Sci. Technol.* 123, 212-221.

Kirba, S. I. (2020). Investigação da estrutura interna, combustão e resistência térmica dos materiais rígidos de poliuretano reforçados com vermiculita. *J. Termoplástico. Compos. Mater.*

Miedzińska, K.; Członka, S.; Strzałkowska, A.; Strzelec, K. (2021). Carga de Vermiculita Modificada com Caseína, Quitosana e Proteína de Batata como um retardador de chama para espumas de poliuretano. *Int. J. Mol. Sci.* 22, 10825.

Mahfuz, H.; Rangari, V.K.; Islam, M.S.; Jeelani, S. (2004). Fabricação, síntese e caracterização mecânica de nanopartículas infundidas espumas de poliuretano. *Compos. Parte A Ap. Sci. Manuf.* 35, 453-460.

Xia, Z.; Wang, Z. (2019). Poliuretano rígido/vermiculita expandida/espumas compostas de fenilfosfato de melamina com boa chama propriedades retardadoras e mecânicas. *E-Polímeros*, 19, 563-573.

Harikrishnan, G.; Umasankar Patro, T.; Khakhar, D. V. (2007). Carbono vítreo reticulado de compósitos de espuma-argila de poliuretano. *Carbon N. Y.* 45, 531-535.

Han, S.; Zhu, X.; Chen, F.; Chen, S.; Liu, H. (2020). Sistema retardante de chama para espumas rígidas de poliuretano à base de dietil bis(2-hidroxietil)aminometilfosfonato e argila esfoliada in situ. *Polím. Degradar. Punhalada.* 177, 109178.

Cao, X.; James Lee, L.; Widya, T.; Macosko, C. (2005). Espumas de nanocompósitos de poliuretano/argila: Processamento, estrutura e propriedades. *Polímero* 46, 775-783.

Zhang, X.-S.; Xia, Y.-Z.; Shi, M.-W.; Yan, X. (2018). O retardamento de chama de fibras de viscosa de alginato/retardador de chama investigado por vertical teste de queima e calorímetro de cone. *Queixo. Química Lett.* 29, 489-492.

Rabello, L.G.; Carlos da Conceição Ribeiro, R. (2021). Uma nova resina composta de vermiculita/poliuretano vegetal para isolamento térmico produção de tijolos ecológicos. *Compos. Parte B Eng.* 221, 109035.

Li, T.-T.; Liu, P.; Wang, H.; Dai, W.; Wang, J.; Wang, Z.; Shiu, B.-C.; Lou, C.-W.; Lin, J.-H. (2021). Preparação e características do flexível espuma de poliuretano preenchida com pó de vermiculita expandida e painel estrutural côncavo-convexo. *J. Mater. Res. Technol.* 12, 1288-1302.

Yan, L.; Fu, L.; Chen, Y.; Tian, H.; Xiang, A.; Rajulu, A. V. (2017). Melhor estabilidade térmica e resistência à chama da poliimida flexível espumas por reforço de vermiculita. J. Appl. Polím. Sci. 134, 2-8.

CAPÍTULO 3: ARTIGO 2

INFLUÊNCIA DA VERMICULITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS

ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO

**INFLUÊNCIA DA VERMICULITA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS
ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO**

Lívia Rezende P.S. Tenório Alves¹

¹*Limav, Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV, UFPI, 64049 -550,*

Teresina, PI, Brasil.

RESUMO

As espumas de poliuretano (PU) representam o maior mercado entre as espumas poliméricas, possuindo uma ampla aplicabilidade como: isolamento térmico, amortecimento, absorção de energia (embalagem), flutuabilidade, etc. Apesar de inúmeras utilidades relacionadas ao grande arranjo de monômeros com diversas propriedades físico-químicas, os poliuretanos apresentam algumas desvantagens, como baixa estabilidade térmica e propriedades de barreira. Esta característica tem proporcionado a sua utilização como matriz nos nanocompósitos, visando a coesão de especificidades entre estas fases. A vermiculita é caracterizada como um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro com uma estrutura micáceo-lamelar, com água na região interlamelar. Apesar de inúmeras vantagens dessa associação, poucos trabalhos de pesquisa realizaram testes em compósitos PU/VMT. Este artigo analisa o comportamento da resistência mecânica de compósitos de PU/VMT, contribuindo para o desenvolvimento de produtos compósitos favoráveis ao meio ambiente e para o crescimento sustentável, buscando o melhoramento das propriedades mecânicas.

Palavras-Chaves: Poliuretano, Vermiculita e propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Polyurethane foams (PU) represent the largest market among polymeric foams, having a wide applicability such as: thermal insulation, damping, energy absorption (packaging), buoyancy, etc. Despite numerous uses related to the large array of monomers with different physicochemical properties, polyurethanes have some disadvantages, such as low thermal stability and barrier properties. This characteristic has provided its use as a matrix in nanocomposites, aiming at the cohesion of specificities between these phases. Vermiculite is characterized as a hydrated magnesium, aluminum and iron silicate with a lamellar-micaceous structure, with water in the interlamellar region. Despite the numerous advantages of this association, few research studies performed tests on PU/VMT composites. This article analyzes the behavior of the mechanical strength of PU/VMT composites, contributing to the development of environmentally friendly composite products and to sustainable growth, seeking to improve mechanical properties.

Key-words: Polyurethane, Vermiculite and mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

Em 1937, o cientista Otto Bayer criou os primeiros poliuretanos (PU's) através da polimerização de diisocianatos com polióis (Bayer, 1937). O poliuretano (PU) pode ser descrito como um polímero derivado da reação entre um isocianato e um composto hidroxilado, sendo sua estrutura química formada de um grupamento uretânico, éter, éster, ureia, alofanato, biureto, carbodiimida e anéis aromáticos hidrocarbonados (Domanska, 2014).

As espumas de poliuretano (PU) representam o maior mercado entre as espumas poliméricas. As espumas de PU possuem uma ampla aplicabilidade, como: isolamento térmico, amortecimento, absorção de energia (embalagem), fluotabilidade, etc. Sua baixa densidade também oportuniza o design de luz, rigidez de componentes como painéis interiores de aeronaves, estruturas formas (núcleos de popa, núcleos das anteparas, longarinas, suportes de motor etc.) na construção de barcos em plástico reforçado com fibra, limitadores de impacto e amortecedores, núcleos de espuma composta, moldes e buchas, material do núcleo de equipamentos esportivos e ferramentas compostas (Cao, 2005).

As espumas flexíveis apresentam diversas finalidades no comércio de colchões, estofados, travesseiros, bancos de automóveis, calçados, etc., por abranger habilidade de amortecimento de impacto, flexibilidade, durabilidade e disposição de moldagem entre outros. Entretanto as espumas rígidas, em consequência ao seu notável isolamento acústico e térmico e propriedades mecânicas, têm como aplicações básicas protetores de equipamentos eletrônicos, indústria automotiva, construção civil, fabricação de equipamentos, aplicações náuticas etc. (Amaral, 2012; Macedo, 2017).

Apesar de inúmeras utilidades relacionadas ao grande arranjo de monômeros com diversas propriedades físico-químicas, os poliuretanos apresentam algumas desvantagens, como baixa estabilidade térmica e propriedades de barreira, especialmente por causa da separação de setores rígidos e flexíveis efetivos em sua cadeia polimérica. Esta característica

tem proporcionado a sua utilização como matriz nos nanocompósitos, em conjunto com nanocargas inorgânicas visando a coesão de especificidades entre estas fases (Almeira, 2014).

Em busca por alternativas sustentáveis para aplicações de isolamento e embalagem ou de implantes biocompatíveis para medicina regenerativa, estudos estão sendo realizados com polímeros biodegradáveis sintéticos e naturais, incluindo polissacarídeos e proteínas estruturais (quitosana, amido ou colágeno) ou polímeros como PLA (poliácido láctico) ou policaprolactona (PCL) [Ruiz-Hitzky *et al.*, 2013; Darder, 2011]. Sua incorporação com sólidos inorgânicos podem melhorar a resistência mecânica das espumas bionanocompósitos resultantes e também aprimorar outras propriedades (Darder, 2011).

Há várias formulações envolvendo o emprego de polióis de fontes renováveis e a criação de novos compósitos, respeitando a questão ambiental com o objetivo de controlar o uso de matérias-primas de fontes não renováveis. Espumas de poliuretano rígidas foram criadas utilizando resíduos de casca de ovo como material de enchimento reciclável. Os resultados mostraram que a carga agregada teve uma interferência positiva nas propriedades do material, como melhora na resistência à compressão, estabilidade térmica, baixa absorção de água, resistência a bactérias e não apresentou toxicidade com células da pele (Zieleniewska *et al.*, 2015; Zieleniewska *et al.*, 2016).

Espumas rígidas com óleo de rícino (*Ricinus communis*) foram analisadas para o emprego em sistemas de isolamento térmico. O óleo tem a vantagem de ser biodegradável e renovável. Os compósitos apresentaram uma redução na transferência de calor com o ambiente exterior, constituindo uma opção sustentável para sistemas de telhado (Cardoso *et al.*, 2012). Duas espumas rígidas de poliuretano foram fabricadas com origem em polióis obtidos a partir da lignina. Os resultados mostraram que o uso dos polióis à base de lignina (10 e 12%) amplifica a biodegradação do poliuretano (Amaral *et al.*, 2012).

A biodegradação de espumas derivadas de óleo de mamona em cultura de *Aspergillus niger* foi investigada. Os autores demonstraram que seria viável o mecanismo de degradação da espuma referente ao processo de degradação de gorduras (Santos *et al.*, 1998). Diversas pesquisas sobre espumas de poliuretano demonstraram sua relevante evolução, interesses e vantagens que vêm oferecendo uma perspectiva futura de sustentabilidade ambiental.

O nome vermiculita vem do latim *vermiculus* o que significa verme pequeno por causa da sua expansão quando aquecida, na qual suas partículas se movimentam semelhante aos vermes (Ugarte *et al.*, 2005). A vermiculita é caracterizada como um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro com uma estrutura micáceo-lamelar, sendo sua estrutura formada por superfícies lamelares de silicatos com água na região interlamelar. Quando a vermiculita é aquecida a uma temperatura entre 650°C e 1000°C, sua água se converte em vapor rapidamente. A pressão realizada acarreta o afastamento das lamelas, provocando uma deformação axial em sua estrutura. Esse método, que também é conhecido como esfoliação, promove a expansão da vermiculita, ampliando seu volume de 15 a 25 vezes (Gomes *et al.*, 2007a; Gomes *et al.*, 2007b).

Este artigo analisa o comportamento da resistência mecânica de compósitos de PU/VMT, contribuindo para o desenvolvimento de produtos compósitos favoráveis ao meio ambiente e para o crescimento sustentável buscando o melhoramento das propriedades mecânicas. Compósitos de PU/VMT contendo concentrações variáveis (0, 5, 10, 15 e 20%) foram avaliados em termos de comportamento mecânico (compressão, tração e flexão) em comparação com espumas rígidas de PU pura. O objetivo deste trabalho é mostrar que propriedades mecânicas de espumas de PU rígidas podem ser melhoradas, beneficiando-se de interações favoráveis que não agredem ao meio ambiente, tornando-se uma opção de material sustentável.

2. PARTE EXPERIMENTAL

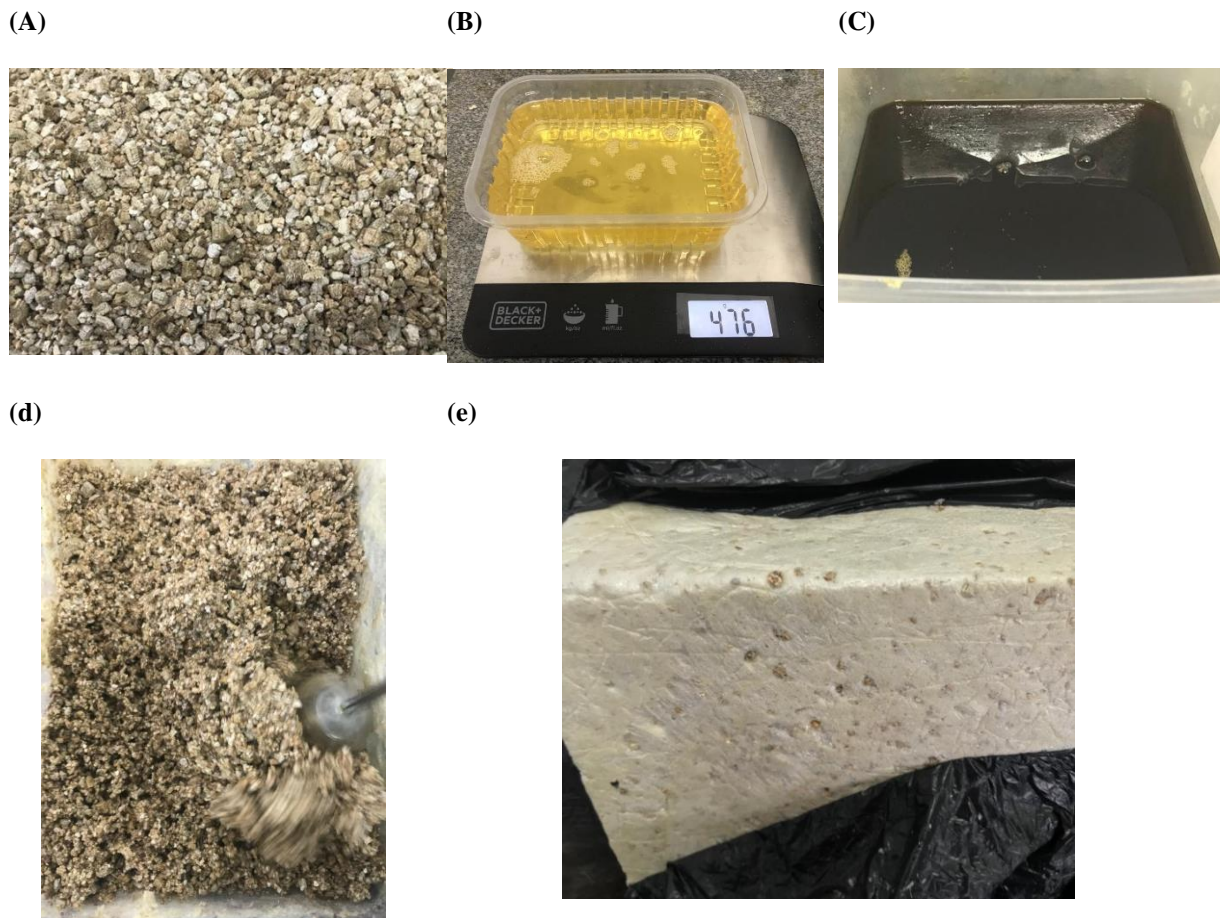
2.1 Materiais

O polioliol utilizado na preparação do PU/VMT é um polipropileno glicol com viscosidade a 20°C = 1500 ± 300 cps (MCNS Inc.) contendo *n*-pentano (grau técnico) como agente de expansão. O isocianato usado foi diisocianato de 4,4'-difenilmetano (MDI) com NCO % = 31% e funcionalidade média 2,8 (Tosoh Corporation, Japão). O componente adicional usado para o compósito PU/VMT foi a Vermiculita (VMT), representada pela fórmula $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

2.2 Preparação da espuma rígida

Espumas rígidas de poliuretano foram preparadas pelo método de espuma expansível em uma etapa. A Vermiculita (VMT) (Figura 7A) foi dispersa no polioliol (Figura 7B) antes de adicionar o isocianato (Figura 7C). Os componentes foram misturados e agitados até obter uma mistura homogênea. Depois, uma certa quantidade de isocianato MDI (MDI / polioliol = 1,1 p / p) foi adicionado a mistura com agitação vigorosa por 10 s (Figura 7D). A mistura foi então rapidamente derramada em um molde para produzir espuma de PU. Para a conclusão da polimerização entre MDI e polioliol, os moldes contendo PU foram mantidos em temperatura ambiente por 24 h. Finalmente, as espumas de PU foram separadas do molde e a superfície dura das espumas foi removida (Figura 7E). Os componentes da espuma foram 476,19g de Polioliol (parte A) e 523,81g de Isocianato (parte B), além desses, foram acrescentadas porcentagens diferentes de Vermiculita (VMT), sendo estas: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%.

Figura 7: Preparação do compósito PU/VMT.



Fonte: Autoria própria.

2.3. Caracterizações

A Máquina de ensaios universal – SHIMADZU AGX - 250kN foi utilizada para os ensaios mecânicos. O ensaio de compressão foi realizado com 5 amostras de 60 mm x 60 mm x 30 mm (L x P x A), de acordo com a Norma ASTM D 1621-10. O ensaio de tração foi feito com 5 amostras, de acordo com a norma ASTM D 638 – 14 – Tipo III. No ensaio de flexão, foram utilizadas 5 amostras de 220 mm x 40 mm x 10 mm (L x P x A), de acordo com a Norma ASTM 790 procedimento A.

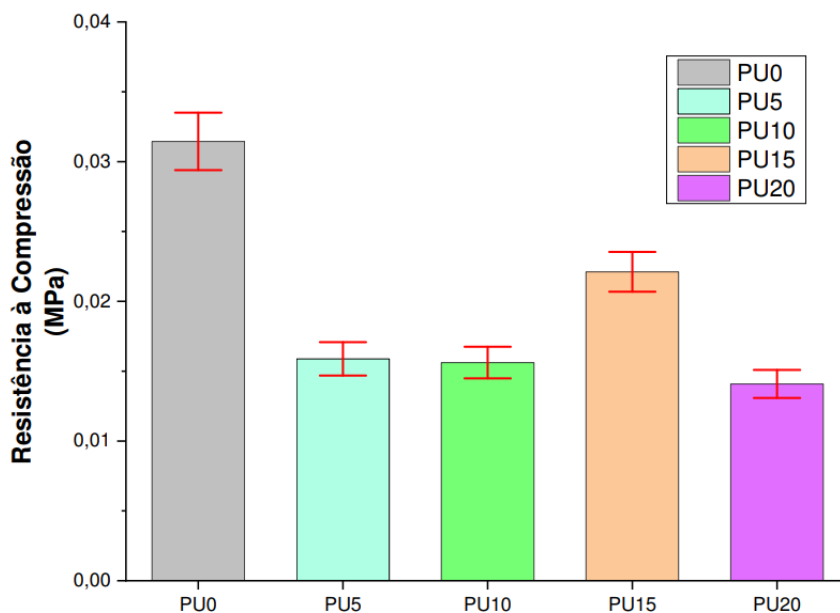
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades Mecânicas

Para avaliar as propriedades mecânicas das espumas rígidas de poliuretano e seus compósitos com Vermiculita (VMT) foram realizados ensaios de compressão, tração e flexão em três pontos. Os três ensaios revelaram um comportamento similar entre PU puro e seus compósitos, com a redução das resistências mecânicas com o acréscimo de Vermiculita. O motivo determinante que induziu essa predisposição foi a forma irregular das células e o tamanho das mesmas, modificadas com a adição da carga vegetal.

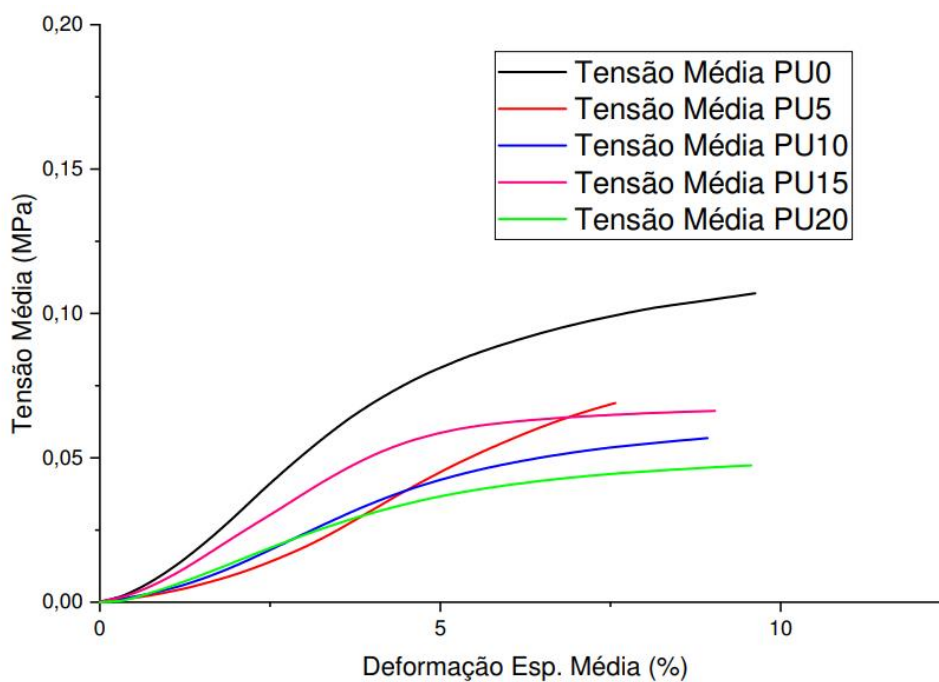
A resistência à compressão em função da porcentagem de massa da Vermiculita assim como as curvas de tensão-deformação do ensaio de compressão pode ser observada nas Figura 8 e 9.

Figura 8: Resistências à compressão do PU e compósitos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão.

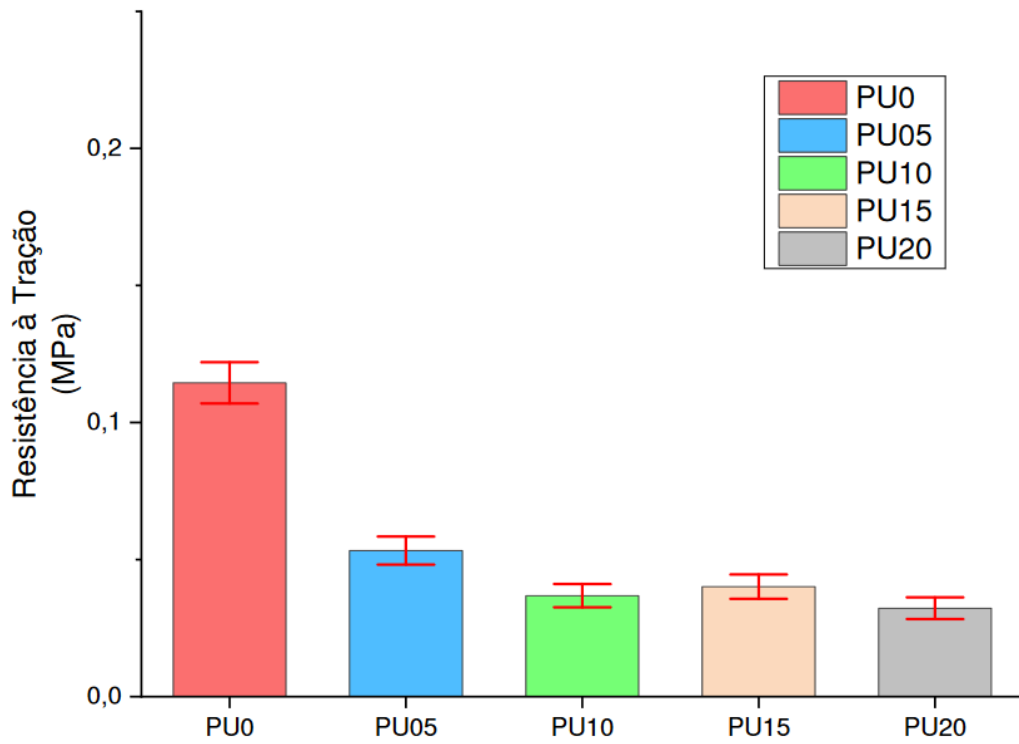


Fonte: Autoria própria.

Os resultados revelam uma redução de 50% da resistência à compressão do compósito PU5 e PU10 em relação ao PU. Já o compósito PU15 obteve uma perda menor da resistência à compressão com diminuição de 33,33%. O compósito PU20 foi o que atingiu a menor resistência à compressão, sendo a redução de 56,67%.

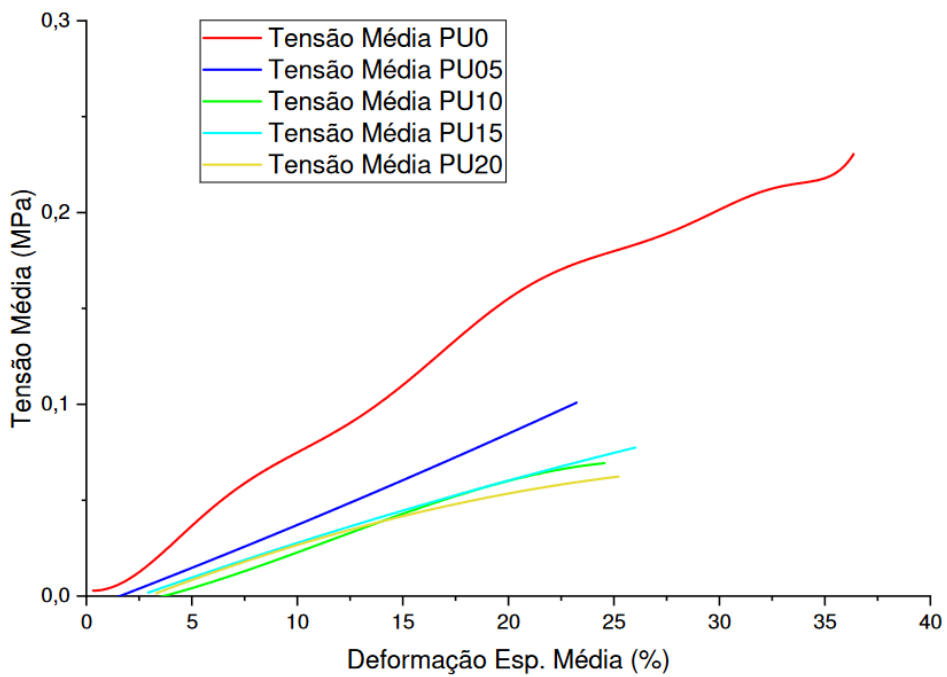
A resistência à tração em função da porcentagem de Vermiculita e a curva tensão-deformação podem ser constatados nas Figura 10 e 11.

Figura 10: Resistências à tração do PU e compósitos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11: Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de tração.

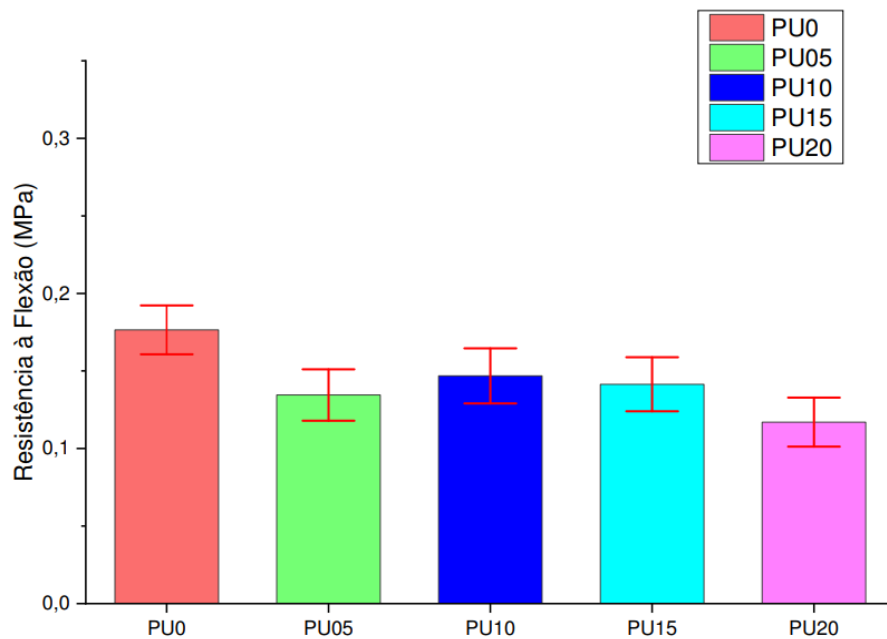


Fonte: Autoria própria.

Os resultados apontam uma perda de 45,45% da resistência à tração do compósito PU5 em relação ao PU0. Já os compósitos PU10 e PU15 exibiram uma perda com diminuição de 72,72% e 63,63% respectivamente. O compósito com 20% em massa exibiu resistência à tração bem menor, com 86,36% menor em relação à espuma de PU.

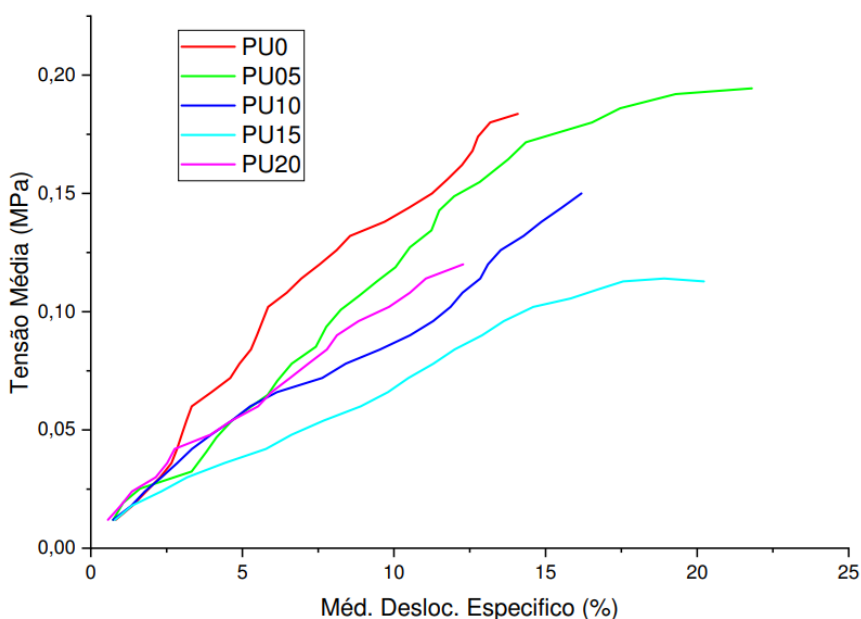
As resistências à flexão em função da porcentagem de Vermiculita até a ruptura ou deformação máxima de 5%, podem ser vistas na Figuras 12 e 13.

Figura 12: Resistências à flexão do PU e compósitos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de flexão.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentam uma diminuição de 21,43%, 14,28% e 17,14% da resistência à flexão para os compósitos PU5, PU10 e PU15, respectivamente, em relação ao PU. Já o compósito PU20 obteve uma perda maior da resistência à flexão com redução de 28,57%.

As propriedades mecânicas das espumas rígidas baseiam-se na densidade, na estrutura celular e no processo de fabricação. A estrutura celular constituída por um esqueleto e paredes que suportam a construção da espuma deve ser resistente para segurar as tensões e sujeitam-se ao tamanho das células e principalmente ao formato. As células esféricas apresentam as mesmas propriedades em todas as direções, em contrapartida as alongadas (elípticas) revelam propriedades distintas, dependentes da direção (Bolsoni, 2008). Isso revela que as propriedades mecânicas das espumas dependem do formato das células, interferindo diretamente na resistência mecânica, sendo as espumas puras (sem adição de carga) mais resistentes que as espumas compósitas (com a adição de carga) pois as primeiras possuem células esféricas, mais

resistentes às tensões, enquanto que a segunda possuem predominantemente células elípticas, menos resistentes às tensões devido a tensões de cargas serem em orientações distintas.

Como pode ser verificado nas micrografias das amostras, as espumas compósitas possuem paredes de células irregulares, esclarecendo o empobrecimento da resistência mecânica das espumas com adição de Vermiculita em comparação a espuma elaborada somente com poliuretano puro.

O aperfeiçoamento nas propriedades mecânicas nos compósitos PU10 e PU15 em relação à espuma compósita PU5, ocorre especialmente devido ao aumento da viscosidade da mistura pré-expansão (Thirumal, 2010), que propicia um aumento da densidade aparente das espumas compósitas em relação à espuma de PU.

4. CONCLUSÃO

As mudanças nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos resultam provavelmente do aumento da viscosidade da mistura pré-polimerização, que provocou a formação de células com tamanhos e formas irregulares. A redução nas resistências mecânicas não prejudica a aplicação dos compósitos, sendo viável a utilização da VMT como matéria-prima na fabricação de compósitos. Todos os compósitos podem ser empregados com a vantagem de parte da espuma ser composta de VMT, proporcionando vantagens ambientais e econômicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bayer, C. (1937). Catalogue of the Doliidae in the Rijksmuseum van Natuurlijke Historie. Zoologiscshe Mededelingen. 20(5): 29-50.
- Domanska, A.; Bockczkowska, A. (2014). Biodegradable polyurethanes from crystalline prepolymers. *Polymer Degradation and Stability*. v. 108, p.175-181.
- Cao, X., *et al.* (2005). Polyurethane/clay nanocomposites foams: processing, structure and properties. *Polymer* 46, p. 775–783.
- Amaral, *et al.* (2012). Fungal degradation of lignin-based rigid polyurethane foams. *Polymer Degradation and Stability*. v. 97, p. 2069-2076.
- Macedo, V. de. (2017). Obtenção de espumas flexíveis de poliuretano com celulose de *Pinus elliottii*. *Polimeros*.
- Almeira, L.S., D.M. do Carmo, M.G. de Oliveira, B.G. Soares. (2014). Efeito do teor de argila na síntese de nanocompósitos de PU/HDL empregando a combinação das técnicas de ultrassom de banho e ultraturrax como metodologia dispersiva. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil.
- Ruiz-Hitzky, E., *et al.* (2013). Fibrous clays based bionanocomposites. *Progress in Polymer Science* 38, 1392–1414.
- Darder, M., Aranda, P., Ferrer, M.L. (2011). Progress in bionanocomposite and bioinspired foams. *Advanced Materials*, 23:5262–7.
- Darder, M., *et al.* (2011). Progress in bionanocomposite and bioinspired foams. *Advanced Materials* 23:5262–7.
- Zieleniewska, M. *et al.* (2015). Preparation and characterisation of rigid polyurethane foams using a rapeseed oil-based polyol. *Industrial Crops and Products* v. 74, p.887–897.

Zieleniewska, M.; *et al.* (2016). Development and applicational evaluation of the rigid polyurethane foam composites with egg shell waste. *Polymer Degradation and Stability*. v. 132, p.78-86.

Cardoso, T.G., *et al.* (2012). Rigid foam polyurethane(PU) derived from castor oil (*Ricinus communis*) for thermal insulation in roof systems. *Frontiers of Architectural Research*. v. 1, P.348–356.

Santos, *et al.* (1998). *apud* Cangemi, J.M. (2006). Biodegradação de poliuretano derivado de óleo de mamona. São Carlos, 163 p. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo.

Ugarte, J.F.O., *et al.* (2005). Vermiculita. Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações, Pág. 677 a 698. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro.

Gomes, U., *et al.* (2007a). Troca catiônica de metais pesados em água de produção através do argilomineral vermiculita, In: II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica, 2. São Luís/MA.

Gomes, U., *et al.* (2007b). Hidrofobização de vermiculita a partir de gordura vegetal, In: II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica, 2. São Luís/MA.

Bolsoni, E. (2008). Estudo do reaproveitamento e Reutilização das espumas rígidas de Poliuretano pós-consumo. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Thirumal, M.; Singha, N.K.; Khastgir, D.; Manjunath, B.S.; Naik, Y.P. (2010). Halogen-Free Flame-Retardant Rigid Polyurethane Foams: Effect of Alumina Trihydrate and Triphenylphosphate on the Properties of Polyurethane Foams. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 116, p. 2260-2268.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Novos materiais estão sendo estudados e testados quanto a durabilidade, resistência mecânica, resistência ao fogo, aspecto de desgaste, deterioração e cooperação para o aumento da eficiência energética. Nos últimos anos, os compósitos de poliuretano e/ou materiais poliméricos/argilosos ganharam atenção especial das indústrias, pois a combinação possui excelentes propriedades termomecânicas e uma série de propriedades físicas e químicas. Esses compósitos de argila polimérica podem ser sintetizados pela incorporação de argilas inorgânicas dispersas em um polímero matriz. A fácil disponibilidade, as propriedades sustentáveis e o baixo custo dos minerais argilosos exigem uma pequena porcentagem em peso da argila para produzir um nanocompósito útil, com uma melhoria nas propriedades, tais como resistência à tração e módulo, permeabilidade ao gás, calor de distorção, temperatura e inflamabilidade sem afetar a homogeneidade óptica dos produtos tornando esses enchimentos atraentes. Todos os compósitos desse trabalho podem ser empregados com a vantagem de parte da espuma ser composta de Vermiculita, proporcionando vantagens ambientais e econômicas. Estes materiais revolucionários repercutirão no cenário de preservação de energia e sustentabilidade ambiental.