

## **PROPOSTA PARA O USO DO POLI (ETILENO TEREFTALATO GLICOL) - PETG EM COBERTURAS DE EDIFICAÇÕES: ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA.**

*PROPOSAL FOR THE USE OF POLY (ETHYLENE TEREFTALATE GLYCOL) - PETG IN BUILDING COVERS: THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS.*

**Souza, André Ricardo de**

Mestre em Processos Construtivos, Universidade Fumec. [andre.souza@fumec.edu.br](mailto:andre.souza@fumec.edu.br)

**Fuina, Jamile Salim**

Professora Doutora em Engenharia de Estruturas, Universidade Fumec. [jamile@fumec.br](mailto:jamile@fumec.br)

**Lacerda, Kássio André**

Professor Doutor em Engenharia de Materiais, Universidade Fumec. [kassio@fumec.br](mailto:kassio@fumec.br)

### **RESUMO**

A cobertura é um elemento construtivo importante para o controle termoacústico no interior das edificações, sob essas demandas os empreendimentos que apresentam conforto térmico e utilizam a iluminação natural mostram-se mais eficientes no consumo de energia, recursos e na geração de emissões, aumentando a proteção ambiental. Neste trabalho avaliou-se uma solução de engenharia para confecção de telhas termoacústicas à base de Poli(etileno tereftalato glicol) - PETG. O trabalho investigou amostras comerciais do material adquirindo placas de 2 mm e 3 mm de espessura. Foi conduzido um arranjo experimental de caracterizações: física (densidade), físico-química (análise térmica), químicas (espectroscopia), micro e nanoestruturais (imagens obtidas por microscopia eletrônica), avaliações termofísicas e mecânicas das amostras. Adicionalmente, foi avaliado o desempenho térmico por meio da determinação do valor da transmitância térmica em protótipo de uma cobertura padrão, conforme ABNT NBR 15220-2:2015 (ABNT, 2015), exemplo C.6. Os resultados obtidos para a transmitância térmica indicam que não houve alteração significativa com relação ao desempenho térmico quando comparado com o material e tipologia de referência, confirmando assim que o PETG é um material potencial que pode ser utilizado em coberturas de edificações.

**Palavras-chave:** Poli(Etileno Tereftalato Glicol). PETG. Coberturas Leves. Telhas Termoacusticas. Conforto Ambiental. Conforto Térmico.

### **ABSTRACT**

The roof is an important constructive element for the thermoacoustic control within buildings, under these demands the projects that offer thermal comfort and use of natural light show to be more efficient in energy consumption, resources and the generation of emissions,

increasing the protection environmental. This work evaluated an engineering solution for the production of thermo-acoustic tiles based on poly (ethylene terephthalate glycol) - PETG. The work investigated commercial samples of the material acquiring plates of 2 mm and 3 mm of thickness. An experimental arrangement of characterizations was performed: physical (density), physical-chemical (thermal analysis), chemical (spectroscopy), micro and nanostructural (images obtained by electron microscopy), thermal and mechanical evaluations of the samples. In addition, the thermal performance was evaluated by determining the thermal transmittance value in prototype of a standard cover, according to ABNT NBR 15220-2: 2015 (ABNT, 2015), example C.6. The results for thermal transmittance indicate that there was no significant change in thermal performance when compared to the reference material and typology, thus confirming that PETG is a potential material that can be used in building roofs.

Keywords: Poly (Ethylene Terephthalate Glycol). PETG. Lightweight coverings. Thermoacoustic tiles. Environmental comfort. Thermal comfort.

## 1. INTRODUÇÃO.

Como precursora entre os sistemas construtivos, as coberturas aparecem como a primeira interferência do homem no meio ambiente para se proteger contra os agentes físicos naturais. Do ponto de vista funcional, a cobertura de uma edificação pode ser executada com qualquer tipo de material, desde que atenda aos requisitos básicos de estanqueidade e escoamento de líquidos sobre sua superfície. É destinada a proteger todo o objeto construído contra a ação de intempéries, como chuvas, vento, insolação, neve, além de partículas de poeira e ruídos provenientes do seu exterior.

De acordo com Filho *et al* (2016), além das importantes funções de segurança e de proteção contra intempéries as coberturas devem preencher as seguintes condições: (i) funções utilitárias - impermeabilidade, leveza, isolamentos térmico e acústico; (ii) funções estéticas - forma e aspecto harmônicos com as linhas arquitetônicas, dimensão dos elementos, textura e coloração; e (iii) funções econômicas - custo da solução adotada, durabilidade e fácil conservação dos elementos.

Em edificações horizontais, além das funções mencionadas, as coberturas também devem preencher os requisitos de desempenho térmico e acústico, pois nessa tipologia a cobertura é a parte da edificação mais suscetível à absorção sonora e mais exposta à radiação solar, absorvendo grande parte da energia térmica, transferindo-a para o interior dos ambientes, elevando sua temperatura interna (MICHELS, 2008). Assim, é primordial considerar o conforto

térmico dos usuários na seleção de coberturas. Neste contexto, o conforto térmico como definido na norma ISO 7730:2005, é uma:

*"...condição da mente que expressa a satisfação com o ambiente térmico" (ISO, 2005, p.10).*

Segundo Dagraça et al. (2007), o conforto ambiental é uma somatória entre ambiente físico, as características do local e da arquitetura da edificação. Entretanto, as condições de conforto térmico podem ser particularizadas a cada ser humano, ou seja, um mesmo ambiente provoca impressões diversas em indivíduos diferentes. Assim, um dos desafios da indústria da construção civil é a melhoria do conforto térmico das edificações, sendo a criação de um ambiente termicamente confortável um dos parâmetros mais importantes na elaboração dos projetos das edificações.

Já Gutiérrez *et al.* (2009) *apud* Lengen (1997) definindo o conforto térmico como uma condição importante para o nosso bem-estar e para a nossa saúde, pois, quando o ser humano trabalha ou dorme, necessita de conforto, sendo qualquer desconforto um fator promotor de distração, causando a interrupção de raciocínio ou sono. No entanto, o desconforto também é um indicador de saúde. Ele é o primeiro sintoma que nos alerta para o fato de que as condições em que nos encontramos não são as mais adequadas, e que, por isso, convém atuar (fechar ou abrir janelas, controlar a temperatura do ambiente, etc.) para criar condições mais confortáveis.

Vários são os trabalhos disponíveis na literatura voltados para a pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas e novos materiais a fim de melhorar o conforto térmico (ARANTES, 2017, CORREA, 2001), sendo o uso de novos materiais e os parâmetros arquitetônicos bioclimáticos geradores de grandes influências no conforto térmico das edificações. A forma, localização e orientação arquitetônica aliada à carta solar, o conhecimento de fatores antropométricos e proxêmicos do uso do espaço – função do espaço a ser produzido e suas particularidades cotidianas, a escolha correta dos materiais e da concepção das vedações e aberturas, o uso de sistemas de proteção solar internos e externos e a tipologia das coberturas são alguns dos fatores que devem ser considerados no projeto de ambientes termicamente confortáveis para uso humano (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 1997).

O potencial do uso de polímeros puros e/ou blendas pode ser explorado em sua totalidade quando se vislumbra a possibilidade de sua utilização como peças, com funções estruturais ou de composição. Os polímeros oferecem novas concepções a soluções tradicionalistas, e até mesmo melhorias em mecanismos de reforço de estruturas existentes,

permitindo recuperar aplicações degradadas ou sujeitas a novas demandas de sobrecarga. Da mesma forma, o processo industrializado de conformação de polímeros pode gerar um ganho substancial no controle tecnológico dos componentes, a produção de peças com formas complexas, a padronização geométrica das peças, a redução dos índices de massa das estruturas construtivas, diminuição nos custos de aquisição e reduções nas emissões. Por todos os aspectos técnicos científicos os materiais poliméricos apresentam uma grande potencialidade para compor ou até mesmo substituir materiais tradicionais na indústria de construção civil (FRANCHETTI, 2003).

As demandas por edificações que experimentam materiais, processos, métodos e técnicas de construção mais eficiência tem sido o ponto central nas áreas de construção civil. Indicadores dessa tendência são abalizados por normas de técnicas que aferem a qualidade e o desempenho sob os aspectos construtivos. Desta forma, para conduzir uma avaliação do desempenho térmico é necessário aplicar o arcabouço de normas padronizadoras.

Existem muitos isolantes térmicos para residências disponíveis no mercado e os materiais usualmente encontrados são de três tipos: materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos (AI-HOMOUD 2005). Alguns exemplos dos produtos mais utilizados são: (i) cerâmicos - fibra de vidro, lã rocha, silicato de cálcio e vermiculita; (ii) poliméricos - celulose, fibras sintéticas e polímeros (poliestireno, poliuretano e outros); (iii) metais – alumínio e aço (SILVA e VASCONCELOS 2017).

Michels (2008), apresentou uma análise sobre a influência das barreiras radiantes (mantas com revestimento metálico) no fluxo de calor total na superfície superior de forro de uma edificação. Constatou-se que houve uma redução na transferência de calor através da cobertura para o ambiente interno em torno de 91 % durante o dia com o uso de uma manta de alumínio comercial dupla face como subcobertura em telhado com telhas esmaltadas cerâmicas quando comparada à mesma cobertura sem qualquer subcobertura. As barreiras radiantes também reduziram a emissão do calor gerado no interior da edificação para o ambiente externo - máxima de 63 % quando se utilizou esta mesma manta durante o período de perda de energia (a noite, dias frios e/ou muito nublados), situação comum para períodos de inverno na região sul do Brasil.

A seguir, a tabela 1 apresenta o critério para a avaliação do desempenho térmico através do método simplificado e estabelece os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica ( $U$ ) das coberturas, considerando um fluxo térmico descendente, em

função das zonas bioclimáticas, segundo a ABNT NBR 15575-5:2005 (ABNT, 2005). As zonas bioclimáticas são regiões geográficas homogêneas quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano.

**Tabela 1 – Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica.**

Transmitância Térmica ( $U$ ) ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FV	$U \leq 1,5$ FV

$\alpha$  - absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura.

Nota:

- (1) O fator de ventilação (FV) está estabelecido na ABNT NBR 15220-2.
- (2) A sigla FV na presente tabela não consta na ABNT NBR 15220-2. NA NBR 15220-3 a sigla adotada é FT (fator de correção da transmitância).

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-5 (2013).

A tabela 2 apresenta o nível de desempenho (mínimo - M, intermediário - I e superior - S) de aceitação quanto à transmitância térmica considerando a zona bioclimática, de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005). Na falta de dados para a cidade onde se encontra a edificações, adota-se os dados da cidade mais próxima com clima similar do local onde está a edificação, conforme indicado na ABNT NBR 15220-3:2005 (ABNT, 2005).

**Tabela 2 - Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica.**

Transmitância Térmica ( $U$ ) ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )					
Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 6		Zonas bioclimáticas 7 e 8		Nível de desempenho
$U \leq 2,30$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$	$\alpha^a \leq 0,4$	$\alpha^a > 0,4$	M
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FV	$U \leq 1,5$ FV	
$U \leq 1,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$	$\alpha^a \leq 0,4$	$\alpha^a > 0,4$	I
	$U \leq 1,5$	$U \leq 1,0$	$U \leq 1,5$ FV	$U \leq 1,0$ FV	
$U \leq 1,0$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$	$\alpha^a > 0,4$	$\alpha^a > 0,4$	S
	$U \leq 1,0$	$U \leq 0,5$	$U \leq 1,0$ FV	$U \leq 0,5$ FV	

<sup>a</sup>Na zona bioclimática 8 também são atendidas coberturas com componentes de telhas cerâmicas, mesmo que a cobertura não tenha forro.

NOTA:

- 
- (1) O fator de ventilação (FV) está estabelecido na ABNT NBR 15220-2. Para coberturas sem forro ou áticos não ventilados, o  $FV = 1$ .
- (2) A sigla FV na presente tabela não consta na ABNT NBR 15220-2. NA NBR 15220-3 a sigla adotada é FT (fator de correção da transmitância).
- 

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-5 (2013).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram adquiridas duas amostras de PETG em forma de chapas de 2 mm (amostras codificadas com a letra B) e de 3 mm de espessura (amostras codificadas com a letra A), da marca SPECTAR COPOLYESTER® da Eastman Chemical Company (USA). A tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas e termofísicas indicadas pelo fabricante.

**Tabela 3 - Valores típicos de características da chapa comercial de PETG tipo SPECTAR COPOLYESTER® da Eastman Chemical Company (USA).**

Propriedades	Condições	Métodos (ASTM)	Unidades	2 mm	3 mm
Densidade	23°C	D 1505	kg/m <sup>3</sup>	1270	1270
Limite de Resistência a Tração	50 mm/min	D 638	MPa	53	53
Tensão de tração – ruptura	50 mm/min	D 638	MPa	31	26
Alongamento – tensão máxima	50 mm/min	D 638	%	4,7	4,8
Alongamento – ruptura	50 mm/min	D 638	%	210	54
Módulo de tração de elasticidade	5,0 mm/min	D 638	MPa	----	2200
Condutividade térmica	----	52612	W/mK	0,2	0,2
Calor específico	----	D 2766	J/gK	1.1	1.1

Fonte: Eastman Chemical Company (2017)

Na etapa de preparação das amostras do PETG para os ensaios termofísicos e mecânicos as chapas foram divididas em quadrantes cobrindo toda área, na sequência foram cortados os corpos de prova para os ensaios de tração, conforme a norma ASTM D638:2014 (ASTM, 2014).

### 2.1. Caracterização de composição e estrutura molecular do polímero PETG.

As análises de infravermelho (Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, no modo refletância total atenuada - FTIR/ATR) foram realizadas em um espectrofotômetro da marca Thermo NICOLET, modelo Nexus 470, na região espectral do IR compreendida de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $650\text{ cm}^{-1}$ , com acumulação de 64 espectros. As análises de FTIR contribuíram para uma avaliação química composicional das amostras.

A estabilidade térmica, e as transições de cadeias moleculares recorrentes a partir da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das amostras foram ensaiadas, através das análises simultâneas TGA/DTA (do inglês: *Thermogravimetric analysis/Differential Thermal Analysis*) e TGA/DSC (do inglês: *Thermogravimetric analysis/Differential Scanning Calorimetry*), de acordo com ASTM E1131-14 (ASTM, 2014). Foram selecionadas aleatoriamente amostras retiradas dos corpos de provas dos materiais ensaiados mecanicamente. As análises foram realizadas em atmosfera de nitrogênio de alta pureza, com fluxo de 25 mL/min e taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , entre o intervalo de temperatura de  $25^\circ\text{C}$  até decomposição do material, limitando o intervalo de temperatura a  $1000^\circ\text{C}$ . As amostras de aproximadamente 11,01 mg e 11,50 mg, foram acondicionados em cadinhos de alumínio e alumina para os ensaios de TGA/DSC e TGA/DTA, respectivamente.

A morfologia das amostras ensaiadas em tração (ASTM D638, 2014), assim como defeitos estruturais, análise da fratura criogênica, informações químicas e físico-químicas, tais como homogeneidade, segregação de fases variações químicas e inclusões de impurezas foram analisadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizada uma tensão de aceleração de 10 kV. As amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido e colocadas em um porta-amostra de alumínio, sem ou com a metalização com uma fina camada de Au. As micrografias foram obtidas em várias magnificações.

## **2.2. Propriedades mecânicas.**

Os ensaios para determinação limites de resistência à tração, limite de resistência à ruptura à tração, módulo de elasticidade à tração e deformações das amostras foram realizados de acordo com a norma técnica ASTM D638-14 (ASTM, 2014). Esse método de teste envolve a determinação das propriedades sobre tração de plásticos reforçados e não reforçados. Foram preparados corpos de prova em formato de “halteres” do tipo I, conforme descrito na seção 6

da norma ASTM D638:2014 (ASTM, 2014). Foram realizados os ensaios de tração em duas velocidades distintas, sendo 50 mm/min para obtenção do limite de resistência à tração, limite de resistência à ruptura e deformação na ruptura e 5 mm/min para obtenção do módulo de elasticidade na tração, conforme preconiza a ASTM D638-14. Todas as amostras foram ensaiadas em uma máquina universal de ensaios mecânicos, da marca Contenco, modelo I 3058. Com capacidade de 3000 kgf (30 kN), atendendo a uma ampla faixa de velocidade de 0,01 mm/min a 1000 mm/min. Para este estudo, foi utilizada a célula de carga de 2 kN com uma incerteza de medição de 1,2 N até 400 N e 2,4 N até 800 N. Para as medições da deformação foi utilizado o próprio sensor de movimento da máquina. A aquisição e processamento do sinal foi realizado utilizando o software do próprio equipamento.

### **2.3. Difusividade térmica e condutividade térmica.**

Para a determinação da difusividade térmica, foi utilizado o método quadrupolo térmico desenvolvido por Degiovanni (2000). Este método é uma ferramenta analítica da modelagem matemática da transferência de calor unidimensional de uma parede plana e homogênea. A amostra é aquecida por um feixe de luz que incide em uma de suas faces e, através do método dos mínimos quadrados é obtida a curva teórica para comparação com a curva experimental. A partir do conhecimento da espessura do material, é determinada a difusividade térmica, por meio da solução da equação geral de calor:

$$\frac{\delta T^2}{\delta x^2} = \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{\delta T}{\delta t} \right) - \nabla(\varphi_r) \quad (1),$$

cujo o termo  $\varphi_r$  é a densidade de fluxo de calor,  $T$  a temperatura e  $t$  o tempo.

A figura 11 mostra o difusímetro utilizado (Protolab, Quadruflash 1200), que é constituído por uma lâmpada de xenônio (1200 J), responsável pelo pulso de energia, três termopares do tipo K de classe especial, um detector infravermelho InSb, um forno resistivo para o aquecimento das amostras e a unidade de processamento de sinal. Todas as amostras foram recobertas por uma camada de tinta à base de grafite para melhorar a absorção da energia emitida pela lâmpada de xenônio.

Figura 1 – Difusímetro QuadruFlash 1200.



Fonte: Autor (2018).

A condutividade térmica  $\lambda$  foi determinada pelo produto do valor da difusividade térmica  $a$ , do calor específico  $C_p$  e da densidade  $\rho$ , expressa pela seguinte equação:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot C_p. \quad (2).$$

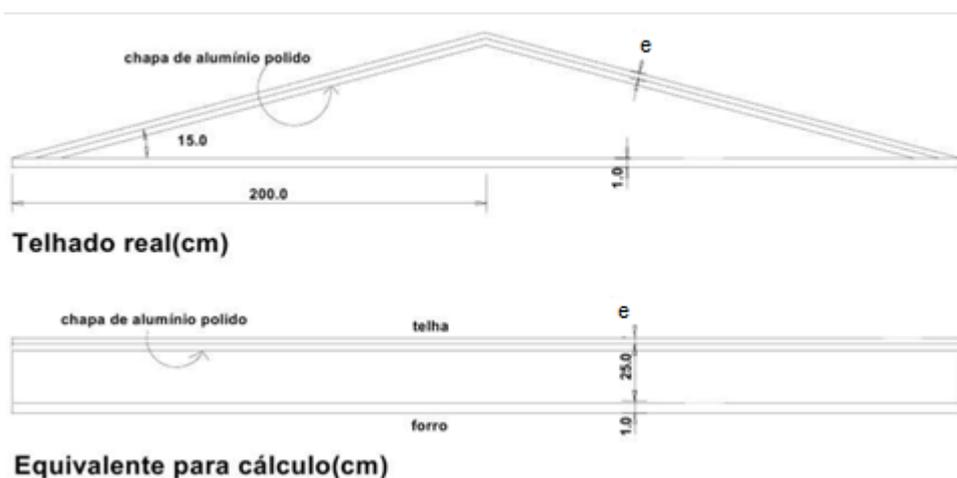
#### **2.4.Avaliação do desempenho térmico de uma cobertura - Transmitância térmica.**

A avaliação simplificada do desempenho térmico de uma cobertura hipotética consistiu em comparar apenas o valor da transmitância térmica (equação 3) das amostras obtidas com o valor do referencial teórico apresentado no exemplo C.6 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005), figura 3, somente para a condição de verão em virtude de ser a condição predominante do Brasil.

$$U = \frac{1}{R_T}. \quad (3).$$

Neste exemplo, é considerado uma cobertura de duas águas (figura 3), com telha de fibrocimento com forro de pinus, câmara muito ventilada, lâminas de alumínio polido com câmara de ar de emissividade baixa ( $\epsilon < 0,2$ ); direção do fluxo de calor descendente para a resistência térmica da câmara de ar ( $R_{ar}$ ) e para a resistências térmicas superficiais interna ( $R_{si}$ ) e externa ( $R_{se}$ ).

Figura 3 - Tipologia da cobertura de referência.



Comprimento do telhado = 7 metros.

Altura da abertura de ventilação (em cada beiral) = 0,05 metros.

Comprimento da abertura de ventilação (em cada beiral) = 7 metros.

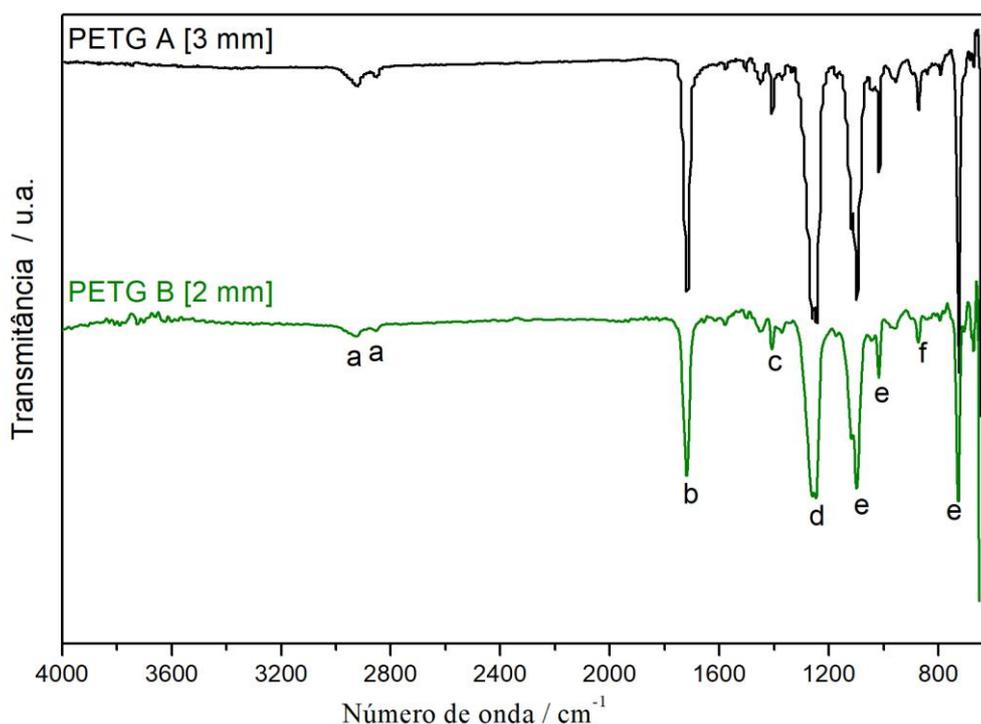
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Os espectros de infravermelho obtidos na região espectral de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$  são mostrados na figura 2, e suas interpretações são apresentadas na tabela 4. Para todas as amostras analisadas foram evidenciadas as assinaturas espectrais de grupamentos ésteres (bandas de absorção do grupamento de carbonila), recorrentes nos PET (CHEN, 2012).

**Figura 2 – Espectros de FTIR para amostras PETG.**



Fonte: Autor (2017).

Essa assinatura comprova a composição química dos polímeros e suas modificações, por: copolimerização com glicerol nas placas de PETG; Em tela, as bandas de absorção em  $1780-1650\text{ cm}^{-1}$ , e em  $920-820\text{ cm}^{-1}$ , bem como, o pico em  $1235\text{ cm}^{-1}$ , são característicos do grupamento carbonila ( $-\text{CO}-$ ), contudo esse é grupamento comum nas funções orgânicas oxigenadas, e suas absorções podem sofrer deslocamentos espectrais. Esses fatos são recorrentes e podem ser vistos nas atribuições espectrais codificadas pelas letras “b” e “d” vistas na tabela 4 e figura 2. As absorções indicadas em “a”  $2.924\text{ cm}^{-1}$  e  $2.852\text{ cm}^{-1}$ , são decorrentes de estiramento simétrico e assimétrico das ligações C-H de grupamentos alifáticos e aromáticos presentes na molécula do PET. Confirmações das absorções de grupos alifáticos presentes na estrutura dos polímeros à base de PET, as bandas que acusam esse comportamento espectral são indicadas em “d” na figura 4, e os números de ondas das referidas absorções são  $1090 - 1016\text{ cm}^{-1}$  e  $725\text{ cm}^{-1}$  (PASZKIEWICZ, 2017); (CHEN, 2012); (LOPES 2004).

**Tabela 4 - Caracterização das bandas de absorção das amostras de PETG.**

Código	Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuições das Bandas e dos picos do Espectro FTIR
a	2924-2852	Estiramento sim; e assim, da ligação C-H de compostos alifáticos e aromáticos. Para o PET essa absorção ocorre em $2907-2968\text{ cm}^{-1}$ .

b	1780-1650	Estiramento da ligação C-O do grupamento Carbonila do éster. Com absorção característica de 1712 para PET.
c	1470-1350	Vibração angular e deformação sim. fora do plano do seguimento etileno glicol.
d	1260	Estiramento da ligação –C(O)-O do grupo Ester.
e	1090-1016-725	Deformação angular da ligações C-H dos grupamentos químicos metílicos e aromáticos.
f	920-820	Vibrações de esqueleto do grupo –O-C-(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -.

Fonte: Aist (2018); Paszkiewicz (2017); Chen (2012); Lopes (2004)

### 3.2. Análise termogravimétrica

As curvas da análise termogravimétrica obtidas indicam que todas as amostras têm sua decomposição máxima em temperaturas abaixo de 440°C, com perdas de massa expressivas acima de 83% (tabela 5). A amostra PETG A [3 mm] mostrou dois picos de decomposição, um deles em baixa temperatura entre 70°C e 80°C, com redução da massa em menos de 1 %. O segundo estágio de decomposição ocorreu em temperaturas entre 430°C e 435°C com redução significativa da massa em 91,9 % para PETG (A) de 3 mm. Em análise geral as amostras comerciais mostraram-se estáveis termicamente, com perda de massa próximo as temperaturas de decomposição do material.

**Tabela 5 – Resultados das análises térmicas.**

Amostras	Evento Térmico (°C)	Varição de massa (%)	Resíduo em, 600°C (%)	T <sub>g</sub> (°C)
PETG B [2 mm]	434,5	94,6	4,5	64,0
PETG A [3 mm]	79,7	0,6	5,1	76,3
	432,4	91,9	-	

Fonte: Autor (2017).

Segundo os autores Demirel, Yaras, Elçiçek (2011), o PET apresenta T<sub>g</sub> entre 67°C e 81°C, este intervalo está correlacionado ao estado cristalino do polímero, polímeros amorfos apresentam T<sub>g</sub> em 67 °C e PET com auto grau de cristalinidade revelam T<sub>g</sub> em 81°C. As amostras caracterizadas por DSC simultânea, vide tabela 5, mostram que as amostra ensaiadas sofrem a transição vítrea em temperaturas compreendidas entre 64°C e 76,3 °C, indicando que o grau de cristalinidade é diferente para cada material. Os resultados demonstram que o PETG apresenta ser estável em situações que imprimam carregamentos mecânicos sob aplicação de calor. Os

resultados também mostraram concordância com os valores reportados na literatura (BILAL; ALI; ELÇIÇEK, 2011).

### 3.3. Propriedades Mecânicas

O comportamento mecânico dos materiais são indicadores tecnológicos aplicados na análise e seleção de materiais, principalmente, quando os mesmos são solicitados por carregamentos e/ou aplicação de forças capaz de produzir deformações nas peças estruturais. Essa investigação procurou determinar os índices mecânicos para Poli(etileno tereftalato glicol), aplicados na confecção de telhas leves com características termoacústicas.

Foi conduzida uma avaliação mecânica, visando delinear se o polímero atende aos índices mecânicos requisitados na produção de telhas denominadas termoacústicas, aplicadas em coberturas leves que apresentem conforto ambiental térmico. A tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos universais. As propriedades de interesses foram aquelas associadas aos comportamentos elástico e plástico, e seus valores correspondem a média amostral e o desvio padrão experimental, com confiabilidade de 68 %.

**Tabela 6 - Módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, limite de resistência à ruptura e deformação na ruptura, para amostras comerciais.**

Sistema	E <sub>b</sub> (MPa)	LRT (MPa)	LRR (MPa)	Deformação (%)
PETG A [3,0 mm]	1891,54 ±111,83 (4 cps)	29,94 ±5,37 (5 cps)	17,48 ±4,92 (5 cps)	2,63 ±0,54 (7 cps)
PETG B [2,0 mm]	2055,62 ±144,86 (4 cps)	27,76 ±6,80 (5 cps)	22,73 ±7,78 (5 cps)	2,37 ±0,34 (7 cps)

E<sub>b</sub> = Módulo de elasticidade – LRT = Limite de resistência à tração – LRR = Limite de resistência à ruptura - cps = números de corpos de prova considerados na avaliação da propriedade.

Nota:

Valores de E<sub>b</sub> obtidos em ensaio de tração a 5 mm/min; LRT, LRR e deformação na ruptura a 50 mm/min, conforme ASTM D638-14.

Os valores após o sinal ± corresponde ao desvio padrão experimental das amostras.

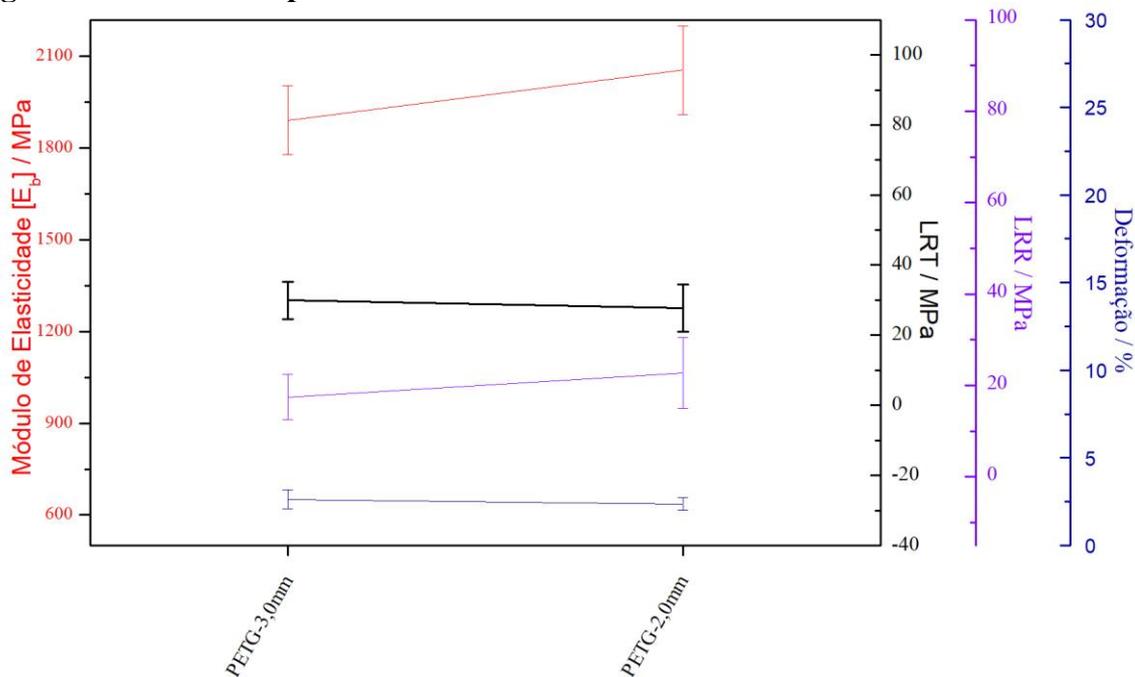
Fonte: Autor (2018).

Para uma melhor avaliação das propriedades reportadas na tabela 6, vide a figura 3. A figura retrata o comportamento médio com seus respectivos desvios padrões. Houve variações significativas nas análises estatísticas aplicadas nos resultados e essas flutuações se devem às dificuldades impostas pelos ensaios delineados pela norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014).

Neste sentido, foi conduzida uma avaliação para indicar os comportamentos mecânicos das amostras e seus resultados qualitativos e semiquantitativos.

Os módulos elásticos evidenciados para as placas, foram ligeiramente menores que os informados pelo fabricante, vide tabela 3. O fabricante reporta que o módulo elástico ensaiado em tração para a placa de PETG A [3 mm] atingiu 2 GPa. O valor obtido nesta avaliação mecânica foi de  $1,89 \pm 0,11$  GPa, gerando uma diferença entre os valores informados pelo fabricante e o determinado de 14 %. Para a placa de PETG B de 2 mm, o fabricante não informou o  $E_b$  tirado na tração, contudo, é informado o  $E_b$  na flexão sob as premissas da norma ASTM D790-17 (ASTM, 2017), o valor indicado pelo fabricante foi de 2 GPa. Para esse trabalho o módulo  $E_b$  foi tirado em tração e atingiu a quantia de  $2,06 \pm 0,14$  GPa (tabela 7), embora uma comparação direta dos valores dos  $E_b$  ensaiados em tração e flexão não seja recomendável, pode-se inferir que os ensaios reproduzem os indicadores mecânicos informados pelo fabricante. Observa-se que o módulo elástico do PETG é sensível à variação de espessura das placas. A placa de 2 mm reportou um ganho 7 %, quando comparada a placa de 3 mm.

**Figura 3 - Gráfico comparativo dos resultados mecânicos das amostras deste trabalho.**



Fonte: Autor (2018).

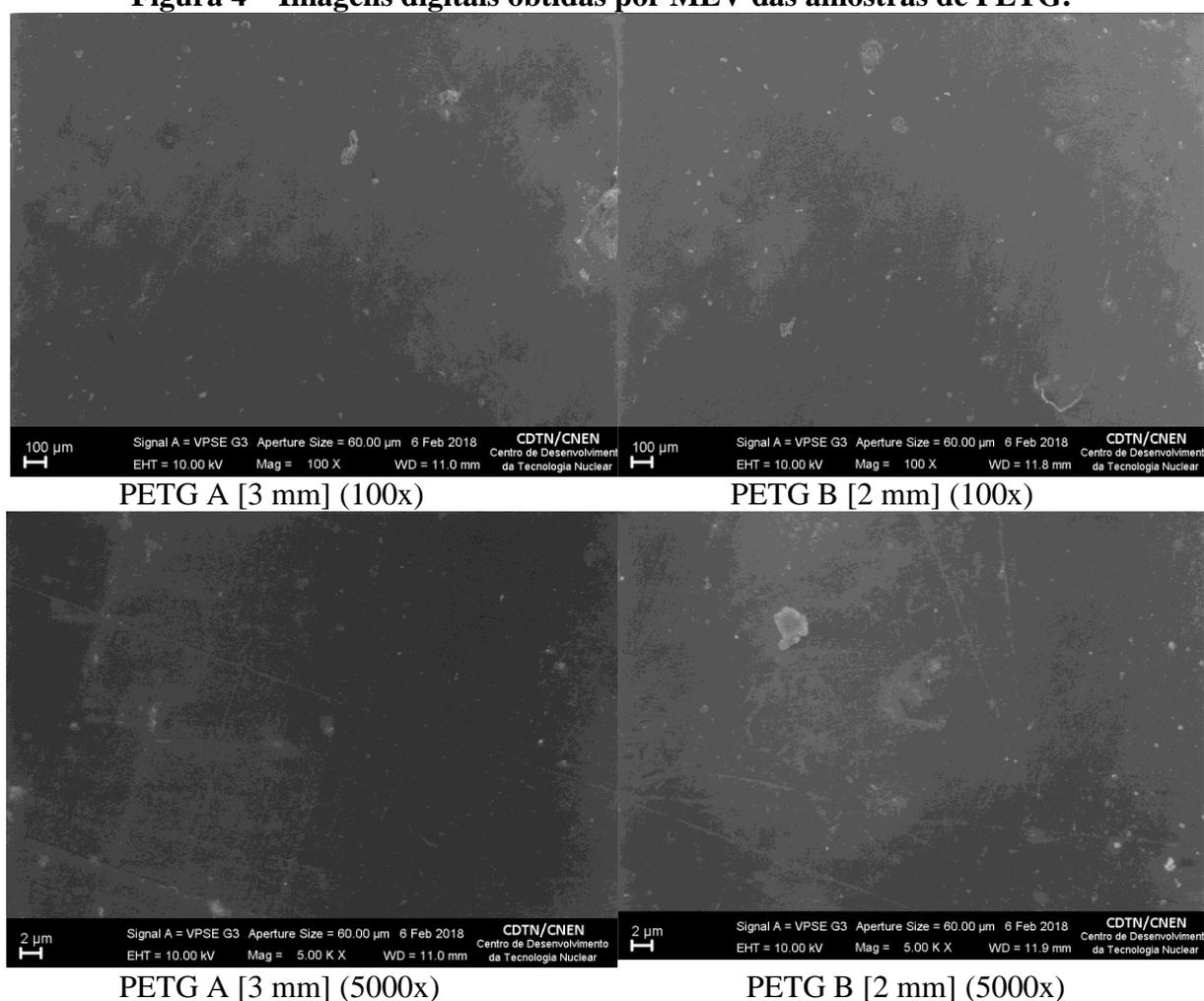
Observa-se que o limite de resistência à tração do PETG é sensível à variação de espessura das placas, sendo as amostras retiradas na placa de 2 mm, 8 % menor que a placa de

3 mm. No obstante, limite de resistência à ruptura na tração do PETG também é sensível à variação de espessura das placas, sendo a de 2 mm com valor de 30 % maior do que a placa de 3 mm.

### 3.4. Caracterização Morfológica PETG.

As imagens digitais obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de PETG são mostradas na figura 4. As imagens revelaram um polímero homogêneo, sem a formação de blendas, esse resulta confirma a que o PETG é um copolímero sintetizado através dos meros que compõem seu nome: etileno, terifalato e glicol.

**Figura 4 – Imagens digitais obtidas por MEV das amostras de PETG.**



Fonte: Autor (2018).

Outra aspecto analisado é ausência de aditivos ou impurezas, que não foram vistos nas análises química (FTIR), físico-químicas (TG/DTA/DSC). Por fim, as placas revelaram uma superfície bem acabada sem marcas de ferramentas, evitando assim defeitos nucleadores de tensão mecânicas ou térmicas.

### 3.5. Caracterização Termofísica PETG.

A densidade dos materiais foram determinadas para serem aplicadas nos métodos e técnicas empenhados na caracterização termofísica, que contribuíram para as avaliações do conforto térmico. Os valores de densidade foi determinado pelo método do empuxo (MONTANHEIRO, 2004) para ambas as amostras foram de  $1272 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Observa-se que os valores obtidos para as amostras de PETG são da mesma ordem de grandeza do valor informado pelo fabricante igual a  $1270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (tabela 3).

A tabela 7 mostra os valores médios obtidos para a difusividade térmica e condutividade térmica, assim como o número de amostras ensaiadas. A máxima incerteza expandida para uma probabilidade de aproximadamente 95 % ( $k=2$ ) foi estimada em 7,5 % para difusividade térmica e 8,5 % para a condutividade térmica. O valor da difusividade térmica variou de  $0,12 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$  a  $0,16 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$  e da condutividade térmica variou de  $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $0,22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Verifica-se que há uma diferença entre os resultados das amostras de PETG B e PETG A igual a  $0,04 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$  para a difusividade térmica e  $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  para a condutividade térmica.

**Tabela 7- Difusividade térmica e condutividade térmica das amostras ensaiadas à temperatura de 23 °C.**

Material	Nº de amostras	Difusividade Térmica ( $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	Condutividade Térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
PETG A [3 mm]	10	0,16	0,22
PETG B [2 mm]	10	0,12	0,17

Fonte: Autor (2018).

A explicação para esta diferença observada pode ser devido a maior eficiência no processo de extrusão das amostras de espessura de 3 mm quando comparado com a de menor espessura, implicando em áreas mais cristalinas que favoreceriam a condutividade térmica, e como consequência, a difusividade térmica conforme relatada por Santos, W. N. et al (2003).

Entretanto, observa-se que esses valores são de mesma ordem de grandeza do valor declarado pelo fabricante igual a  $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (tabela 3).

### 3.6. Avaliação do desempenho térmico da cobertura – Transmitância térmica.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos da transmitância térmica das amostras investigadas considerando como referência a tipologia e materiais (telha de fibrocimento e forro de pinus) do exemplo C.6 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005), juntamente com o valor da espessura adotada e da resistência térmica total (EQUAÇÃO 3). Os resultados da avaliação do desempenho térmico das amostras investigadas pelo método simplificado foram comparados os valores estabelecidos como referência.

**Tabela 8 – Comparativo da transmitância térmica.**

Material	Espessura (m)	Resistência térmica total ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ )	Transmitância térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Fibrocimento ABNT NBR 15220-2:2005	0,008	0,90	1,11
PETG B [2 mm]	0,003	0,92	1,11
PETG A [3 mm]	0,002	0,93	1,12

Fonte: Autor (2018)

Como pode ser observado na tabela 8, praticamente não houve alteração no valor da transmitância térmica total para os diferentes tipos de materiais, variando de  $1,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , quando comparado com o valor da referência ( $1,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Este resultado é devido ao fato de que o maior contribuinte no cálculo da resistência térmica total é devido à resistência da camada ar entre a telha e forro ( $R_{\text{ar}} = 0,61 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) que é função da espessura da camada de ar, da emissividade superfície e da direção de fluxo de calor (horizontal, ascendente ou descendente), conforme apresentado na tabela B.1 ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005).

Verifica-se também que os materiais ensaiados atendem ao critério quanto ao valor máximo admissível para a transmitância térmica pois são inferiores aos valores especificados para as zonas climáticas (1, 2, 3, 6, 7 e 8), de acordo com a tabela 1, considerando um fluxo de calor descendente. Estes resultados confirmam que as telhas de PETG são materiais potenciais,

podendo ser utilizadas em coberturas de edificações como uma solução de engenharia para o conforto térmico e, como consequência, diminuindo o impacto ambiental.

A tabela 9 apresenta a avaliação com relação ao nível do desempenho térmico da cobertura com relação critério de aceitação (mínimo, M; intermediário, I e superior, S) conforme a ABNT NBR 15575:2013 (ABNT, 2013) de acordo com a zona climática. Os resultados obtidos para todos os materiais ensaios atendem os requisitos mínimos obrigatórios de desempenho térmico para qualquer que seja a zona bioclimática e similar quando comparamos com o exemplo de referência. Novamente, estes resultados confirmam que as telhas de PETG reciclado são materiais potenciais que podem ser utilizadas em coberturas de edificações.

**Tabela 9 – Desempenho térmico.**

Material	Nível de desempenho térmico				
	Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 6		Zonas bioclimáticas 7 e 8	
		$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
Fibrocimento ABNT NBR 15220-2:2005	I	I	M	I	I
PETG B [2 mm]	I	I	M	I	I
PETG A [3 mm]	I	I	M	I	I

Legendas: M – Mínimo; I – Intermediário

Fonte: Autor (2018)

Analisando a tabela 9, nota-se que o desempenho das amostras quando inseridas nas zonas bioclimáticas 3, 4, 5 e 6 são os únicos que atingem o requisito mínimo estabelecido pela ABNT NBR 15575:2013 (ABNT, 2013). Estas zonas bioclimáticas são críticas e necessitam de desempenho térmico superior das edificações, pois estão compreendidas principalmente nas regiões sudeste e centro-oeste, onde ocorre transições entre climas quentes de baixas latitudes e climas amenos do tipo temperado de latitudes médias, com variações de temperatura do ar, tanto sazonais quanto diárias. Com grande período seco sem chuvas e curto período úmido de chuvas, com radiação solar intensa e baixos índices de umidade relativa do ar (MARTINS, BITTENCOURT, KRAUSE; 2012). Essas características requerem níveis de desempenho térmico superiores às demais regiões, principalmente quando se utiliza na superfície externa da cobertura, materiais com altos níveis de absorvância, superiores a 0,6.

#### 4. CONCLUSÕES

A investigação em tela teve como proposta avaliar uma solução de engenharia para a montagem de coberturas definidas como leves e que apresentasse conforto ambiental termoacústico. Uma investigação das soluções construtivas para projetos de coberturas foi conduzida, e reportou que há soluções convencionais com materiais clássicos à base de cerâmicas e metais. Essas soluções oferecem os parâmetros térmico e/ou acústicos definidos como indicadores de conforto ambiental, juntos ou isoladamente. Contudo, somente as soluções que envolve a conformação chapas metálicas que podem atender aos três preceitos da proposta; ser leve, e apresentar conforto ambiental no controle térmico e de ruído. Essas soluções com materiais compostos de chapas metálicas longitudinais são revestidas com materiais cerâmicos e poliméricos: como as lãs de rochas; ou polímeros como EPS e PU, sendo essas telhas denominadas de “telhas sanduiches” ou telhas termoacústicas.

Pautados por essa visão global investigou os materiais de matriz polimérica como solução adequada a demanda objetivada. Promovendo uma redução massa significativa, quando comparados com as soluções de matriz metálica, mantendo seus índices tecnológicos e construtivos dentro das especificações das normas construtivas das coberturas. O polímero de interesse foi o PETG, por mostrar propriedades mecânicas e térmicas adequadas as soluções construtivas de coberturas. Esse mercado está desenvolvido em vários setores como o de embalagem, têxtil e também no de produtos para construção Civil, com telhas translúcidas para iluminação Zenital em coberturas montadas com telhas de pequenos formatos (como as telhas: francesa, romana, americana, portuguesa, italiana e colonial). Contudo, a proposta vislumbra no futuro a implementação de telhas de grandes formatos (como as telhas em chapas de aço e alumínio).

As caracterizações químicas (FTIR), físico-químicas (TG/TA/DSC), revelaram a composição dos materiais comerciais, indicando principalmente que os materiais trabalhados eram polietileno tereftalato com glicerol, não havendo formação de blendas com outros polímeros, aditivos ou contaminantes. No que tange a estabilidade térmica os materiais responderam conforme suas inerentes propriedades, apresentando degradação térmica de 80 % a 95 % na faixa de temperatura compreendida entre 430°C e 440°C. Os materiais mostraram uma Tg dependente do grau de cristalinidade, com a transição em temperaturas compreendidas entre 64°C, para a amostra com menor fração cristalina, e 76,3°C para a amostra de maior cristalinidade (PETG A [3 mm]).

Estes resultados confirmam que o PETG é um material promissor a ser utilizado em coberturas de edificações como uma solução de engenharia em substituição aos materiais tradicionais, possuindo características que podem melhorar o desempenho térmico e mecânico de acordo com o projeto arquitetônico, inclusive em termos de inovação. Adicionalmente, pode implicar também em uma melhoria no processo de produção industrial devido a facilidade para padronização e racionalização de produção; na diminuição da massa das coberturas e de conformação com formas e dimensões inovadoras.

## REFERÊNCIAS

AI-HOMOUD, Mohammad S. **Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials.** Building and Environment. Vol. 40. Nº 3. 2005.

AIST - National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. **Spectral Database for Organic Compounds, SDBS.** Disponível em: [http://sdbs.db.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre\\_index.cgi](http://sdbs.db.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/cre_index.cgi). Acessado em 10/04/2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** Philadelphia. 2014.

\_\_\_\_\_. **ASTM D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** Philadelphia. 2017

\_\_\_\_\_. **ASTM D1505 – 18. Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.** Philadelphia. 2018.

\_\_\_\_\_. **ASTM D2766-95 –Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.** Philadelphia. 1995.

\_\_\_\_\_. **ASTM E1131-14 - Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.** Philadelphia. 2014.

ARANTES, B.; CÓSTOLA, D; LABAKI, L. C. **The improvement potential on building performance using seasonal adaptable facades - The context of residential buildings with high thermal load in humid subtropical climates.** In: 33th International Conference on Passive and Low Energy Architecture - Design to Thrive - PLEA 2017, 2017, Edinburgh. Proceedings of the 33th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Edinburgh: Plea 2017 - Edinburgh, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15220-2:2005. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** 2005.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-5:2013. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas.** 2013.

CHEN, Z. **The Crystallization of Poly (ethylene terephthalate) Studied by Thermal Analysis and FTIR Spectroscopy.** University of Birmingham, 2012.

CONTENCO INDUSTRIA E COMERCIO LTDA. **Catálogo comercial.** Disponível em <https://www.contenco.com.br/index.php>. Acessado em 13/09/2017.

CORREA, C. B. **Arquitetura bioclimática: Adequação do projeto da arquitetura ao meio ambiente natural.** Artigo. Portal Vitruvius, 2001. Disponível em: <[http://www.vitruvius.com.br/drops/drops04\\_07.asp](http://www.vitruvius.com.br/drops/drops04_07.asp)>. Acesso em: 03/05/18.

DAGRAÇA, V ; KOWALTOWSKI, D ; PETRECHE, J ; KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimization of aspects of environmental comfort for the school system of the State São Paulo in Brazil.** Building and Environment, UK, v. 42, n.2, p. 984-999, 2007.

DEGIOVANNI, A., MAILLET, D., ANDRÉ, S., BATSALE, J. C., MOYNE, C. **Thermal Quadrupoles. Solving the Heat Equation Through Integral Transforms.** John Wiley & Sons, Ltd, 2000.

DEMIREL, Bilal, ALI, Yaras, ELÇİÇEK, Hüseyin. **Crystallization Behavior of PET Materials.** BAÜ Fen Bil. Enst. DergisiCilt, v. 13, n. 1, p. 26-35, 2011.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 52612-1. **Testing of thermal insulating materials; determination of thermal conductivity by means of the guarded hot plate apparatus; conversion of the measured values for building applications.** German, 1979.

EASTMAN CHEMICAL COMPANY. **Catálogo comercial.** Disponível em <http://www.eastman.com>, 2017. Acessado em: 03/04/2017.

FILHO, P. R; RAFAEL, i; BARTELS, J; LACERDA, M. **Coberturas: os diversos tipos e suas características.** Revista Saberes. UNIJIPA. 4ª ed. Jul. 2016.

FRANCHETTI, Sandra Mara M; MARCONATO, José Carlos. **A Importância das Propriedades Físicas na Reciclagem.** Química Nova na Escola. Propriedades físicas dos polímeros na reciclagem. n 18. Nov. 2003.

GUTIÉRREZ Soto, Marco Vinicio; BARRANTES, Néstor Chaves, FONSECA, Juan Carlos Hernández, VILALALOBOS, Rodolfo Araya, SÓLIS, Diego Ureña. **Ambientes protegidos para el almacenamiento temporal y el secado del frijol (phaseolus vulgaris l.) en el campo.**

Sistema de Información Científica. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. AGRONOMÍA MESOAMERICANA 20(2):255-262. 2009. ISSN: 1021-7444.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** 2005.

\_\_\_\_\_. **ISO 6946:2017. Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation methods.** 2017.

LAMBERTS, R; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. **Eficiência energética na arquitetura.** 3ª Edição. Eletrobrás. PROCEL. São Paulo, PW, 1997.

LENGEN, Johan Van. **Manual do arquiteto descalço.** Rio de Janeiro, Instituto TIBA, 1997.

LOPES, W. A, FASCIO, M. **Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho.** Química Nova, v. 27, n. 4, p. 670-673. 2004.

MARTINS, TATHIANE, A. L; BITTENCOURT, LEONARDO, S; KRAUSE, CLÁUDIA, M. L. B. **Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 59-75, abr./jun. 2012. ISSN 1678-8621. 2005.

MICHELS, Cáren; LAMBERTS, Roberto ; GÜTHS, Saulo. **Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs.** Energy and Buildings, v. 40, p. 445-451, 2008.

MONTANHEIRO, Maria Nazareth Stolf. **Determinação da densidade de sólidos e líquidos pelo princípio de Arquimedes.** Artigo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Departamento de Física – Universidade Federal de Santa Catarina. V 21.n especial. Nov. 2004.

PASZKIEWICZ, S. **Synthesis and Characterization of Polyethylene terephthalate-co-cyclohexane dimethylene terephthalate-block-poly (tetramethylene oxide).** Copolymers. Journal - The Royal Society of Chemical, n7, p. 41745-41754. 2017.

SILVA, D. G. M; VASCONCELOS, W. L. **Isolante térmico fibroso: motivos de sua utilização como revestimentos de trabalho em equipamentos industriais que operam em altas temperaturas - revisão da literatura - parte I.** Cerâmica. Vol.63. N.367. São Paulo. Julho/setembro. 2017.