

UNIVERSIDADE FUMEC
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - FEA

André Ricardo de Souza

**PROPOSTA PARA O USO DO POLI(ETILENO TEREFALATO) - PET
RECICLADO EM COBERTURAS DE EDIFICAÇÕES COMO SOLUÇÃO DE
ENGENHARIA PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO AMBIENTAL NO INTERIOR
DAS EDIFICAÇÕES: Análise térmica e mecânica.**

Orientador: Dr. Kássio André Lacerda

Belo Horizonte / MG
Julho / 2018

André Ricardo de Souza

**PROPOSTA PARA O USO DO POLI (ETILENO TEREFTALATO) - PET
RECICLADO EM COBERTURAS DE EDIFICAÇÕES COMO SOLUÇÃO DE
ENGENHARIA PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO AMBIENTAL NO INTERIOR
DAS EDIFICAÇÕES: Análise térmica e mecânica.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação Mestrado Profissional em Processos Construtivos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de construção civil

Orientador: Dr. Kássio André Lacerda

Belo Horizonte / MG

Julho / 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Souza, André Ricardo de, 1980 -

Proposta para o uso do poli(etileno tereftalato) - pet reciclado em coberturas de edificações como solução de engenharia para otimização do conforto ambiental no interior das edificações: análise térmica e mecânica. / André Ricardo de Souza. – Belo Horizonte, 2018.

99 f. : il. ; 29,7 cm

Orientador: Kássio André Lacerda

Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos), Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Belo Horizonte, 2018.

1. Polietileno - Brasil. 2. Telhas - Brasil. 3. Construção civil - Brasil. I. Título. II. Lacerda, Kássio André. III. Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura.

CDU: 69



ATA DA REUNIÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO ANDRÉ RICARDO DE SOUZA

Aos vinte e cinco dias do mês de julho de dois mil e dezoito (2018) às 14:00 horas, sob a presidência do Prof. Dr. Kássio André Lacerda (FUMEC), realizou-se a reunião da Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos para examinar a Dissertação intitulada: "**PROPOSTA PARA USO DO POLI(ETILENO TEREFALATO) RECICLADO EM COBERTURA DE EDIFICAÇÕES COMO SOLUÇÃO DE ENGENHARIA PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR DAS EDIFICAÇÕES: Análise térmica e mecânica**", proposto pelo aluno **ANDRÉ RICARDO DE SOUZA** e seu orientador Prof. Dr. Kássio André Lacerda. Compareceram o aluno e os professores Kássio André Lacerda, Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco e Anderson Maia Peres que compuseram a banca juntamente com o orientador. O Senhor Presidente declarou aberta a sessão e em seguida o aluno fez a apresentação da Dissertação. Após a apresentação, procedeu-se à discussão da mesma. Ao final a dissertação foi considerada (aprovada/reprovada) aprovada por unanimidade. Belo Horizonte, 25 de julho de 2018.
XX

A comissão examinadora teve a seguinte composição:

Prof. Dr. Kássio André Lacerda (orientador) – FEA/FUMEC

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco – FEA/FUMEC

Prof. Dr. Anderson Maia Peres – UFMG

REITORIA

Av. Afonso Pena, 3680 - Cruzeiro
30130-009 - Belo Horizonte, MG
Tel. 0800 0300 200
www.fumec.br

CAMPUS

Rua Cobre, 200 - Cruzeiro
30310-190 - Belo Horizonte, MG
Tel. (31) 3228-3000
www.fumec.br

AGRADECIMENTOS

Desafio tão grande quanto escrever esta dissertação, foi utilizar apenas uma página para agradecer as pessoas que fizeram parte desta trajetória. Início os agradecimentos a Deus, por guiar meu caminho e iluminar minha alma. Aos meus pais, que sempre me apoiaram e me ofereceram a oportunidade de estudar, sou eternamente grato. Tenho que agradecer ao professor e sempre amigo, Dr. Kássio André Lacerda, meu orientador e inspirador, que me mostrou o caminho do conhecimento e do crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço ao excelente corpo docente da Universidade Fumec, com o qual obtive maturidade e muito conhecimento. Obrigado pelo exemplo e pela competência com a qual praticam arte de ensinar.

Não posso deixar de agradecer também aos pesquisadores, técnicos e bolsistas do Centro de Desenvolvimento de Energia Nuclear - CDTN, em especial à Denise das Mercês Camarano e ao Fábio Abud Mansur do Laboratório de Termofísica, pela excelência no trabalho, ensino e estrutura disponibilizada. Graças ao empenho de vocês que a realização deste trabalho foi possível. Agradeço profundamente todo o esforço e consideração que tiveram comigo.

Meu agradecimento final só poderia ser dedicado a uma pessoa: minha esposa Luciana. O tempo todo ao meu lado, incondicionalmente. Nos momentos mais difíceis, que não foram poucos, sempre me fazendo acreditar que chegaria ao final desta batalha. Cumplice e paciente; um presente de Deus em minha vida. Obrigado Luciana, te amo.

RESUMO

A cobertura é um elemento construtivo importante para o controle térmico no interior das edificações, sob essas demandas os empreendimentos que apresentam conforto térmico e utilizam a iluminação natural mostram-se mais eficientes no consumo dos recursos e promovem reduções em consumo de energia e insumos, aumentando a proteção ambiental. Neste trabalho buscou-se avaliar uma solução de engenharia para confecção de telhas termoacústicas à base de PET reciclado. O trabalho foi dividido em duas linhas de investigação: (i) foram avaliadas amostras de produtos comerciais, como amostras de PET reciclado provenientes de telhas translúcidas; (ii) a produção de uma blenda de PET reciclado com Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com característica que atenda a produção de telhas termoacústica. O PET reciclado utilizados nas blendas foi obtido na reciclagem de garrafas transparentes utilizadas no envase de refrigerante. Somado ao ganho no sistema construtivo de coberturas, o trabalho foi orientado objetivando também minimizar impactos ambientais, bem como ampliar o consumo do PET reciclado. A metodologia adotada neste trabalho foi dividida em cinco etapas: na primeira, foi conduzido um levantamento bibliográfico sobre conforto térmico e sistemas construtivos para coberturas termoacústicas, na segunda etapa se prospectou sobre o uso de polímeros à base de PET na fabricação de telhas termoacústicas, e na terceira etapa, foram obtidas amostras de PET e de blendas PET reciclado. Para a quarta etapa foi conduzido um arranjo experimental que contemplou o processamento polimérico por rotas produtivas, pautadas por ciclos de extrusão e injeção dos polímeros e suas blendas (PET reciclado com adição de 10% e 30% em massa de PEAD). Na sequência, primou por etapas de caracterizações: física (densidade), físico-química (análise térmica), químicas (espectroscopia) e micro e nanoestruturais (imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura) das amostras de PET reciclado (PET-R) e das blendas de PET-R/PEAD.

Palavras-chave: Polietileno Tereftalato. PET. Coberturas termoacústicas. Conforto Ambiental. Conforto Térmico.

ABSTRACT

The roof is an important constructive element for the thermal control inside buildings, under these demands the projects that present thermal comfort and use the natural light show to be more efficient in the consumption of resources and promote reductions in consumption of energy and inputs, increasing environmental protection. This work aimed to evaluate an engineering solution for the production of thermo-acoustic tiles based on recycled PET. The work was divided into two lines of research: (i) samples of commercial products were evaluated, PET-R samples from translucent tiles; (ii) the production of a recycled PET blend with High Density Polyethylene (HDPE) with characteristic that meets the production of thermoacoustic tiles. The recycled PET used in the blends originated in the recycling of transparent bottles used in refrigerant packaging. Added to the gain in the constructive system of roofing, the work was oriented with the objective of minimizing environmental impacts as well as increasing recycled PET consumption. The methodology adopted in this work was divided into five stages: in the first, a bibliographic survey was conducted on thermal comfort and constructive systems for thermoacoustic coverings, in the second stage it was prospected on the use of PET based polymers in the manufacture of thermoacoustic tiles, and in the third step, samples of PET and recycled PET blends were obtained. For the fourth step, an experimental arrangement was carried out, which contemplated the polymer processing by productive routes, guided by cycles of extrusion and injection of the polymers and their blends (recycled PET with addition of 10% and 30% by mass of HDPE). In the sequence, the characterization of recycled PET (PET-R) and PET-R / HDPE blends was characterized by physical (density), physical-chemical (thermal analysis), chemical (spectroscopy) and micro- and nanostructural (images obtained by electron microscopy).

Keywords: Polyethylene Terephthalate. PET. Thermoacoustic coverings. Environmental comfort. Thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Casa experimental Même Meadows – Escritório de arquitetura Kengo Kuma e associados.	22
Figura 2 - Esquema dos principais mecanismos de transferência de calor em coberturas.	23
Figura 3 - Exemplos de edificações com engradamento metálico.	26
Figura 4 - Exemplos de engradamento metálico.	26
Figura 5 - Perfil transversal das telhas de aço revestidas de seção ondulada.	27
Figura 6 - Perfil transversal das telhas de aço revestidas de seção trapezoidal	28
Figura 7 - Residência com cobertura metálica – Rio de Janeiro/Brasil.	28
Figura 8 - Perfil e montagem da telha termoacústica com Poliestireno Expandido (EPS).	29
Figura 9 - Condutividade térmica global de telhas termoacústicas com os principais núcleos isolantes em comparação com telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas. .	30
Figura 10 - Panorama das aplicações dos polímeros por tipo de resina no Brasil. ...	33
Figura 11 - Fluxograma das atividades do trabalho.	42
Figura 12 - Plano de corte das amostras telhas comerciais de PET-R; (a) telha conformada por processo de injeção: (b) telha conformada por processo de termoformagem.	43
Figura 13 - Grânulos de PET-R de garrafa.	45
Figura 14 - Equipamentos aplicados na determinação das propriedades termofísicas.	50
Figura 15 - Tipologia da cobertura de referência.	52
Figura 16 - Corpo de prova das blendas PET-R/PEAD, aplicados nos ensaios mecânicos e termofísicos.	55
Figura 17 - Valores médios de densidade obtidos pelo método do empuxo à temperatura de 23 °C.	57

Figura 18 - Espectros de FTIR para amostras de polímeros e blendas a base de PET	58
Figura 19 - Curvas da análise termogravimétrica das amostras de polímeros e blendas a base de PET.....	60
Figura 20 - Curvas da análise de calorimetria diferencial exploratória das amostras de polímeros e blendas a base de PET	61
Figura 21 - Gráfico comparativo dos resultados mecânicos das amostras deste trabalho.	63
Figura 22 - Imagens digitais obtidas por MEV das amostras de PET-R das telhas comerciais.....	67
Figura 23 - Imagens digitais das amostras de PET-R das telhas comerciais conformadas pelo processo de injeção adquiridas em MEV.....	68
Figura 24 - Micrografias por MEV da superfície da fratura das blendas de PET-R/PEAD-0% e PET-R/PEAD com 10 % e 30 % m/m.	69
Figura 25 - Difusividade térmica e condutividade térmica das amostras ensaiadas à temperatura de 23°C.	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Propriedades típicas das resinas PET da empresa M&G Chemicals.....	34
Quadro 2 - Propriedades típicas das resinas PET da empresa PQS-PETROBRÁS.	35
Quadro 3 - Parâmetros de injeção utilizados.....	46
Quadro 4 - Dados da tipologia de referência de cobertura conforme ABNT NBR 15220-2:2005.	52
Quadro 5 - Dados do projeto.	52
Quadro 6 - Parâmetros de extrusão usados na tentativa de processamento das amostras das blendas poliméricas.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica.	41
Tabela 2 - Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica.	41
Tabela 3 - Valores médios das medidas da densidade das amostras de PET-R e blendas de PET-R/PEAD tomadas à temperatura de 23 °C.....	56
Tabela 4 - Caracterização das bandas de absorção das amostras de PET-R e das blendas de PET-R/PEAD	59
Tabela 5 - Resultados das análises térmicas.....	60
Tabela 6 - Módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, limite de resistência à ruptura e deformação na ruptura, para amostras comerciais e processadas, avaliadas no escopo desse trabalho.	63
Tabela 7 - Valores típicos do calor específico de PET, PEAD e das amostras de PET-R ensaiadas.	70
Tabela 8 - Difusividade térmica e condutividade térmica das amostras ensaiadas à temperatura de 23 °C.	71
Tabela 9 - Comparativo da transmitância térmica.....	73
Tabela 10 - Desempenho térmico	74

LISTA DE SIMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDAS

A – Área

C_p – Calor Específico

CT - Capacidade Térmica

Dt- Diferença de temperatura do ar externo e interno

e – Espessura da camada

E – Módulo de elasticidade

F – Força

g – Grama

Hz – Hertz

j - Atraso térmico

J – Joule

K – Kelvin

L – Comprimento

M - Massa

m/m – Fração massa/massa

Q - Carga térmica

R_T – Resistencia térmica total

T – Temperatura

t - Tempo

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_m – Temperatura de fusão

U – Transmitância térmica

V – Volume

α – Difusividade térmica

ε - Deformação

λ - Condutividade térmica

ρ - Densidade do material

σ - Tensão

φ_r - Densidade de fluxo de calor

LISTA DE SIGLAS E REDUÇÕES

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CDTN - Centro de Desenvolvimento de Energia Nuclear

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

EPS - Poliestireno Expandido

EVA - Etileno-Vinil-Acetato

FEA - Faculdade de Engenharia e Arquitetura

FTIR – Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier

FUMEC - Fundação Mineira de Educação e Cultura

ISO – International Organization for Standardization

LMPT - Laboratório de Propriedades Termofísicas

MEG - Monoetileno Glicol

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira Aprovada pela ABNT

PB - Polibutilenos

PE - Polietileno

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PEBDL - Polietileno de Baixa Densidade Linear

PET - Polietileno Tereftalato

PET-R - Poli (tereftalato de etileno) - Reciclado

PET-R/PEAD-0% - Amostra de PET reciclado sem adição de PEAD

PET-R/PEAD-10% - Amostra de PET reciclado com 10% de adição de PEAD em massa

PET-R/PEAD-30%- Amostra de PET reciclado com 30% de adição de PEAD em massa

PET-R/tl – Amostra de PET reciclado retirada de telha translúcida injetada

PET-R/tT – Amostra de PET reciclado retirada de telha translúcida termoformada

PIB - Poli-isobutilenos

PP - Polipropileno

Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PS - Poliestireno

PTA - Ácido Tereftálico Purificado

PU - Poliuretano

PVC - Policloreto de Vinila

TG – Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVO.....	18
3 JUSTIFICATIVA.....	19
4 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES.....	21
4.1. Coberturas.....	25
4.1.1. <i>Engradamento de coberturas.....</i>	25
4.1.2. <i>Telhas metálicas.....</i>	27
4.1.3. <i>Telhas termoacústicas.....</i>	29
4.1.4. <i>Telhas poliméricas produzidas com PET e suas blendas.....</i>	31
4.2. Desempenho térmico de coberturas.....	38
4.3. Transmitância térmica.....	39
5 METODOLOGIA.....	42
5.1 Materiais.....	43
5.3 Caracterização.....	46
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
6.1 Processamento do PET e suas blendas de PET/PEAD.....	53
6.2 Caracterização das amostras à base de PET.....	55
6.2.3 <i>Análise termogravimétrica.....</i>	60
6.2.4 <i>Propriedades mecânicas.....</i>	62
6.3 Caracterização morfológica dos materiais.....	67
6.4 Caracterização das propriedades termofísicas.....	70
6.5 Avaliação do desempenho térmico da cobertura – Transmitância térmica.....	73
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS.....	81

APÊNDICES	89
ANEXO A	93
ANEXO B	94
ANEXO C	95
ANEXO D	96

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. As coberturas são destinadas 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.

A morfologia das estruturas, define: coberturas são estruturas que se definem pela forma, observando as características de função e estilo arquitetônico das edificações. As coberturas têm como função principal a proteção das edificações, contra a ação das intempéries, atendendo às funções utilitárias, estéticas e econômicas (AZEREDO, 1997, p. 182).

Podendo ser de materiais diversos, desde que impermeáveis às águas pluviais e resistentes à ação do vento e intempéries. A cobertura pode ser de telhas cerâmicas, telhas de concreto (planas ou capa e canal) ou de chapas onduladas de fibrocimento, aço galvanizado, manta aluminizada, PVC e "fiberglass". As telhas de ardósia e chapas de cobre foram praticamente banidas da nossa arquitetura (MOLITERNO, 2015, p. 116).

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 (ISO, 2005, p.10) é uma "...condição da mente que expressa a satisfação com o ambiente térmico". Já Lengen (1997) define 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.

Segundo Caldeira, Sposto e Caldas (2016), no Brasil, o sistema de cobertura mais utilizado nas habitações é composto por telhas cerâmicas. No entanto, vem surgindo, no mercado, novos componentes, como, por exemplo, a telha metálica termoacústica com núcleo isolante, que proporciona uma diminuição no consumo de energia na fase operacional da habitação, diminuindo a temperatura interna, implicando até mesmo na inexistência de sistemas de condicionamento de ar. Porém, há necessidade de se analisar com critério o ciclo de vida da cobertura para avaliar o seu uso racional. Segundo Blumenschein e Miller *apud* Inmetro (2011), o ciclo de vida de um produto é o conjunto de todas as etapas da cadeia produtiva, desde a extração e processamento da matéria-prima, até o descarte final, passando pelas fases de transformação, produção, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção e reciclagem. Assim, as telhas metálicas termoacústicas são consideradas ainda como um sistema de alto custo inicial, mas a economia em termos de energia elétrica pode ser um bom atrativo para ambientes propícios a grandes variações térmicas, resultando, assim, em uma boa relação entre o custo e benefício. Além disso, no caso de telhas metálicas termoacústicas, deve ainda ser levado em conta os impactos e custos de sua matéria-prima não renovável, o processo de conformação (metalurgia e a montagem do sistema), logística de transporte e armazenamento (acessórios para montagem, massa, volume e mão de obra), vida útil (ataque de intempéries), custos de manutenção e potencial de reciclagem.

A proposição do uso de uma matriz polimérica em telhas visa proporcionar uma redução na massa da cobertura e, como consequência, no carregamento da edificação, implicando diretamente no custo de construção, do transporte e no tempo

de execução da obra; bem como propiciar uma maior liberdade arquitetônica (ou mesmo o uso de concepções inovadoras), com a possibilidade de produção de peças singulares, adaptativas, e/ou com geometrias complexas; além de sistemas de montagens sem a necessidade de subterfúgios de fixação, facilitando a instalação e a substituição de peças danificadas.

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, seja em uma nova concepção ou em mecanismos de reforço de estruturas existentes, 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, como a padronização geométrica das peças. Ainda mais, a proposição do uso de uma matriz polimérica reciclada corrobora para a diminuição dos impactos ambientais, sendo de consenso que os processos tradicionais de incineração e descarte dos materiais convencionais na natureza são causadores de enormes danos aos ecossistemas, provocando prejuízos imensuráveis ao planeta. Assim, a reciclagem de polímeros é extremamente viável, seja do ponto de vista econômico ou de preservação do meio ambiente (FRANCHETTI, 2003).

Este trabalho foi desenvolvido visando uma avaliação comparativa entre soluções comerciais a base de Polietileno Tereftalato (PET) e blendas de PET-R com poliolefinas, o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Foram adquiridas telhas translúcidas comerciais à base polietileno Tereftalato Reciclado (PET-R). Concomitante, foram obtidas blendas de PET-R, provenientes de garrafas de refrigerante com adição de 10% e 30% em massa de PEAD. Essa investigação buscou responder questões relacionadas ao desempenho térmico e mecânico das coberturas que utilizem telhas poliméricas à base de PET e suas derivações, visando a melhoria no conforto térmico.

O arranjo experimental proposto foi possível com uma forte colaboração entre a Universidade Fumec, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais – DEMET e o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. Desta forma, os Laboratórios de Ensaio e Sistemas Construtivos (LESC) e de Nanoestruturas Multifuncionais (LNM) lotados na Universidade Fumec, juntamente o Laboratório de Engenharia de Polímeros e

Compósitos (LEPCom) do DEMET/UFMG e por fim, com os Laboratórios do CDTN/CNEN de Medição de Propriedades Termofísicas (LMPT), Química de Nanoestruturas (LQN) e de Microscopia Eletrônica, que disponibilizaram suas infraestruturas para o processamento do polímero e suas blendas, assim como para a caracterização das amostras ensaiadas de PET-R e suas blendas PET-R/PEAD, respectivamente.

Este trabalho está organizado em 8 capítulos. Nos capítulos 1 e 2 apresentam uma breve introdução do trabalho e os objetivos. No capítulo 3 encontra-se a justificativa do trabalho. O capítulo 4 é composto pela revisão bibliográfica sobre conforto térmico, sistemas de coberturas, e o uso de polímeros na confecção de telhas. Primou-se na seção 4, apresentar os principais conceitos e propriedades que embasam o trabalho desenvolvido. A revisão bibliográfica foi direcionada a prover uma justaposição entre o conforto térmico e o desempenho térmico das coberturas, esses dois conteúdos foram condicionantes na condução deste trabalho. O capítulo 5, foi reservado aos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desta investigação. A seção de resultados e discussões foram tratadas no capítulo 6. A seção apresenta os resultados das caracterizações físicas, físico-químicas, químicas e micro e nanoestruturais das amostras de PET e suas blendas, bem como a avaliação de desempenho termofísico e mecânico dos materiais. Uma análise comparativa dos materiais alvos dessa investigação com outros materiais comercialmente utilizados foi realizada e apresentada, mostrando a eficiências dos mesmos. Foi usado um modelo referenciado na norma técnica ABNT NBR 15220:2015 tipologia de referência, exemplo C.6. As considerações e as conclusões são objeto do capítulo 7. Ao final, no capítulo 8, estão grafadas sugestões para trabalhos futuros ligados ao tema como oportunidades para novas pesquisas e enriquecimento do tema.

2 OBJETIVO.

Investigar o uso das blendas poliméricas à base de PET-R/PEAD como uma solução de engenharia para produção de telhas que apresente conforto ambiental e redução do índice de massa, aplicado a telhados leves em coberturas de edificações.

Os objetivos específicos foram:

Investigação bibliográfica das principais soluções construtivas para coberturas com requisitos de conforto ambiental.

Prospectar polímeros à base de PET disponíveis no mercado com indicações construtivas para coberturas.

Processar blendas poliméricas de PET-R (provenientes de garrafas de refrigerantes transparentes) com adição de 10% e 30% em massa de PEAD.

Caracterizar as propriedades física (densidade), físico-químicas (análise Térmica), química (espectroscopia no IR), micro e nanoestrutura (imagens digitais obtidas por MEV) dos materiais utilizados: telhas comerciais confeccionadas em PET-R, pré-formas das blendas PET-R/PEAD (10% e 30% m/m).

Conduzir uma avaliação das propriedades mecânicas no modo tração (módulo de elasticidade, resistência à tração, resistência à ruptura e deformação), e nas propriedades termofísicas (calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica) das amostras de PET-R comerciais e blendas de de PET-R com PEAD.

Simular o desempenho térmico por meio da determinação da transmitância térmica, comparando os resultados obtidos dos materiais utilizados neste trabalho, utilizando como cobertura de referência o exemplo C.6, ABNT NBR 15220-2:2015 (ABNT, 2015).

3 JUSTIFICATIVA.

A humanidade tem assistido modificações sistemáticas nos modos de geração, extração, beneficiamento, produção e consumo dos recursos energéticos e materiais. É notório que a escala de consumo de energia, bens duráveis, e de consumo cresçam em ritmos acelerados demandando de recursos e processos tecnológicos capazes de produzir sinergia e harmonia entre os modos de vida da humanidade e do planeta terra. Setores industriais têm demandado por soluções científicas, tecnológica que alinhava o desenvolvimento econômico, social e ambiental de tal maneira que agregue valor aos seus negócios. Ao passo que iniciativas públicas e privadas, tem produzido: legislações, programas, controles que visem a sustentabilidade pautados pelo equilíbrio social e proteção dos ecossistemas do planeta (CARVALHO, 2014).

Setores industriais como a construção, tem experimentado uma profunda mudança nos seus modos operantes. Muito dependentes do consumo dos recursos materiais e energia, a construção civil e de infraestrutura tem atentado para a reengenharia de processos, ou até mesmo, a substituição de materiais construtivos tradicionais, por outros de maior eficiência tecnologia, energética, econômica e ambiental (BASSO, NOGUEIRA E SILVA, 2015).

Provocados por essa necessidade de avançar nos processos e materiais de construção, que apresente eficiência energética, e no consumo de materiais mais sustentáveis, que se vislumbrou uma proposta de substituir os materiais tradicionais, metálicos e cerâmicos, aplicados na confecção de telhas utilizadas na montagem de coberturas em edificações. A proposta é utilizar materiais que apresentem redução nos índices de massa, maior facilidade no controle dos processos produtivos, disponibilidade, baixo custo, e com ciclos de vida longos, com etapas de reutilização e/ou reciclagem. Essas características apontam para candidatos como os polímeros e compósitos. Mas por se tratar da produção de telhas que apresentam requisitos de formas geométricas, dimensões variadas, controles de iluminação, transferência de calor, estanqueidade, acabamentos superficiais, e parâmetros estéticos, os polímeros podem se mostrar adequados e vantajosos.

O trabalho desenvolvido teve como meta o processamento de PET-R blendado com PEAD, seguido da caracterização física, físico-química, química e micro e nanoestrutural do arranjo molecular do material, bem como, a avaliação do

comportamento mecânico e termofísico dos materiais produzidos. Esse arranjo experimental primou por dimensionar sua capacidade em atender os requisitos básicos para aplicações como telhas, peças básicas para montagem de coberturas de edificações. As coberturas leves com peças de recobrimento em polímero oferecem vantagens construtivas como a redução das massas dos telhados, gerando reduções significativas no dimensionamento estrutural, outro ponto relevante para essa tipologia construtiva está associado ao conforto ambiental (controle da troca de calor e blindagem de ruído) e iluminação zenital. Todas essas vantagens somam-se para reduzir custos: construtivos, manutenção e operação na utilização das edificações. O controle do conforto térmico produzido pelas coberturas termoacústicas irão minimizar ou até mesmo eliminar o uso de climatização mecanizada que consomem equipamentos e energia elétrica. A blindagem do ruído entre os ambientes internos e externos ajudam na redução da poluição sonora que afetam o bem-estar dos usuários do edifício. E por fim, a iluminação natural sendo aproveitada no interior dos edifícios, que mostram se adequadas as todas as destinações: comerciais e residenciais, além de produzir reduções no consumo de energia durante os dias de sol.

Por fim, a investigação analisou o desempenho das amostras sob a ABNT NBR 15575:2013 (ABNT, 2013) e respondeu há várias questões relevante para o setor construtivo. Mostrou que existe viabilidade tecnologia, econômica e construtiva. O material tem características melhores que as dos materiais tradicionais e adequadas ao controle do conforto térmico, e responde prontamente aos requisitos estruturais para concepção, e montagem de telhados leves para edificações horizontalizadas e com grandes áreas de exposição a irradiação solar.

4 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES.

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.

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).

Como exemplo de uso inovador de materiais, tem-se Lima (2016), que avaliou o uso do Poliestireno Expandido Reciclado – EPSR incorporado à concretos aplicados na fabricação de blocos de alvenaria. Devido à baixa densidade do EPSR, essa aplicação indicou uma redução de 25% na densidade dos blocos cerâmicos, criando um elemento de vedação de menor condutividade térmica se comparado com os blocos de concreto tradicionais. Neste trabalho, foi constatada a viabilidade técnica da utilização do EPSR como agregado alternativo, resultando num produto potencialmente utilizável na composição de concreto leve para várias aplicações na construção.

Já o uso de parâmetros arquitetônicos bioclimáticos pode ser exemplificado no projeto criado pelo escritório de arquitetura *Kengo Kuma & Associates*, inspirada nas habitações tradicionais do grupo indígena *Ainus* (habitantes das ilhas do extremo

oriental da Rússia), que preza pelo conforto térmico de suas residências. O projeto experimental, apresentado na figura 1, foi concebido com uma escolha de materiais modernos, mas não menos natural. Seu aquecimento é mantido através de correntes de convecção e circulação do ar. A estrutura de madeira externa é envolta por uma membrana polimérica à base de Politetrafluoretileno (PTFE). Já a parte interna foi coberta por uma camada de tecido de fibra de vidro, que pode ser removida, proporcionando diversas configurações e ajuste para atender às necessidades para o conforto ambiental dos usuários. Entre as partes interna e externa, há um isolamento feito a partir de garrafas descartáveis à base de PET recicladas, que deixam a luz natural entrar no ambiente (HOMETEKA, 2013).

Figura 1 - Casa experimental Même Meadows – Escritório de arquitetura Kengo Kuma e associados.



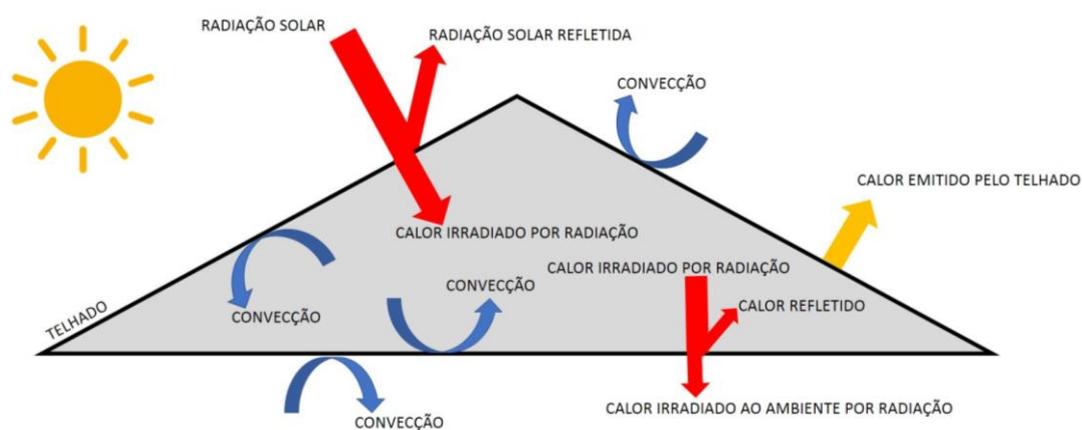
Fonte: Hometeka (2013).

Outro exemplo de sistemas construtivos dessa natureza é o projeto desenvolvido pela empresa Smart Glass, com o uso dos chamados “vidros inteligentes”, em que vidros eletrocromicos permitem controlar o grau de transparência e, conseqüentemente, o grau de transmissão que determinadas radiações do espectro eletromagnético terão através do material, pela modificação da tensão elétrica aplicada sobre eles, podendo gerar, assim, uma economia em energia elétrica pois melhora a iluminação do ambiente, e diminui o uso de condicionadores de ar (SMARTGLASS, 2017).

A figura 2 apresenta esquematicamente os principais mecanismos de transferência de energia (calor) através das coberturas para o interior das edificações, que acontece, principalmente, por conta da radiação solar, que, ao incidir sobre a

superfície da cobertura, a aquece. Uma parcela desta radiação é refletida, outra é absorvida e o restante é transmitida. Somado a essa radiação térmica, tem-se ainda presente, os mecanismos de transferência de calor devido à convecção e a condução de calor. A parcela de calor transmitida para o espaço correspondente ao ático, ou o chamado entreferro, que é transmitida para o espaço interno da residência, causando o aquecimento interno da edificação (MICHELS, 2008; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

Figura 2 - Esquema dos principais mecanismos de transferência de calor em coberturas.



Fonte: Adaptado de Michels (2008).

Isolar termicamente uma cobertura sempre esteve relacionado com a utilização de materiais conhecidos como resistivos ou isolantes. A resistência térmica destes materiais é explicada, sobretudo, pela grande quantidade de ar e/ou descontinuidades presentes em sua estrutura, tais como fissuras, porosidades e vazios. Os materiais recorrentes aplicados ao isolamento térmico, na atualidade, têm uma arquitetura microestrutural fibrosa ou esponjosa, permitindo a geração de volumes livres em seus arranjos cristalinos. De acordo com Vittorino, Sato e Akutsu (2003), a resistência térmica destes materiais é justificada pela grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas porosidades abertas e fechadas, formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares, podendo, ainda, algumas espumas conter, nos seus poros, outros gases com condutividade térmica menor do que a do ar. Cunha e Neumann (1979) relatam que esses tipos de isolantes térmicos formados por células que armazenam gases na sua estrutura se tornam bons

isolantes por serem maus condutores térmicos. Outra maneira de reduzir o ganho térmico de uma cobertura é a utilização de materiais com baixa emissividade, como os metálicos, pois refletem a maior parte da radiação incidente para o ambiente externo, e como consequência, transmitindo pouco calor para o interior da edificação (BYNUM 2001).

Materiais que apresentem isolamento térmico total são incomuns. Desta forma, a busca sempre perpassa por um material com condutividade térmica menor em relação aos demais materiais usuais. Esse material isolante deve minimizar a transferência de calor entre dois sistemas, onde coexistam níveis diferentes de temperatura. Os resultados práticos da aplicação desses materiais são: manter um ambiente termicamente adequado ao usuário; produzir economia de energia elétrica mitigando o uso de equipamentos climatizadores; em casos mais localizados, impedir a condensação de vapores e/ou gases dispersos no meio ambiente; por fim, soma-se aos demais uma proteção extra às estruturas das edificações, evitando grandes gradientes térmicos e, assim a deteriorização dos componentes da edificação (RIVERO, 1986; TORREIRA, 1980).

Existem muitos isolantes térmicos para o uso em coberturas residências disponíveis no mercado e os materiais usualmente encontrados são de três tipos: materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos (AI-HOMOUUD 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; (iv) cimentícios (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.

4.1. Coberturas.

De acordo com a ABNT NBR 15575-5:2013 (ABNT, 2013), os sistemas de coberturas são conjuntos de elementos e ou componentes, dispostos no topo da construção, com as funções de assegurar a estanqueidade às águas pluviais e salubridade, proteger os demais sistemas da edificação habitacional ou elementos e componentes da deterioração por agentes naturais e contribuir positivamente para o conforto termoacústico da edificação habitacional.

4.1.1. Engradamento de coberturas.

Entende-se por engradamento o conjunto de elementos estruturais responsáveis pela sustentação das telhas de uma cobertura (SUDECAP, 2008), que, segundo Hellmeister (1977), é constituído pelas peças que recebem as telhas, quer sejam cerâmicas, de fibrocimento, de alumínio, ferro galvanizado, madeira, dentre outros.

O tipo de engradamento mais convencional e usado no Brasil é o de madeira, que exige um grande volume de peças, gerando um alto índice de desperdício. Sua montagem é realizada na sua maioria das vezes de forma artesanal, acarretando em grandes períodos de execução. Além disso, estruturas convencionais, ao serem demolidas, geram rejeitos que correspondem a uma parte significativa dos materiais presentes nos aterros sanitários (PORTAL MET@LICA, 2010).

As coberturas com engradamento metálico possuem vantagens significativas em relação à tradicional de madeira. A figura 3 apresenta exemplos de edificações com engradamento metálico, que se destacam pela imunidade ao ataque de pragas e por possuírem um sistema de montagem eficiente, além da capacidade de se adaptar a quaisquer projetos e tipos de telha, como por exemplo, de cerâmica,

concreto, fibrocimento ou “shingles” (telha de manta asfáltica com pigmento cerâmico).

Figura 3 - Exemplos de edificações com engradamento metálico.



a) Em edificação popular
Fonte: MGM Produtos Siderúrgicos (2016).



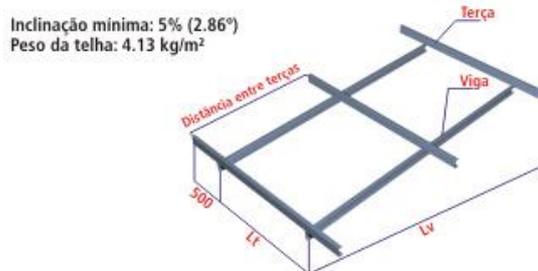
b) Com vigas treliçadas e telhas de alumínio
Fonte: Metalúrgica Universo (2014).

O dimensionamento dos engradamentos metálicos é conduzido em função do tipo de telha especificada no projeto, do número de apoios das ripas e terças, da resistência das peças e da inclinação (FIGURA 4).

Figura 4 - Exemplos de engradamento metálico.



a) Para telhas do tipo cerâmica ou concreto
Fonte: Portal Met@lica (2010).



b) Para telhas metálicas
Fonte: Portal Met@lica (2010).

O aço é o material mais utilizado nos engradamentos das coberturas metálicas. Geralmente é revestido com filmes poliméricos, tintas ou com uma camada protetora de zinco pelo processo de galvanização, tornando-o resistente à corrosão e incêndio.

O sistema de engradamento com perfis de aço se destaca pela resistência estrutural de seus componentes e por possuir uma longa vida útil (mais de 30 anos quando respeitado os princípios de manutenção). Além disso, apresenta baixos

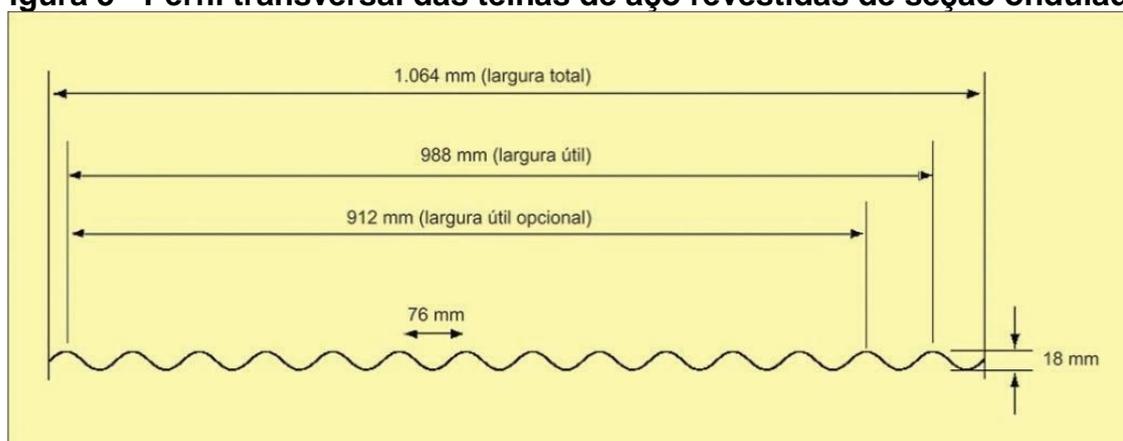
índices de desperdícios, são 100% recicláveis e ainda possuem a opção de acabamento sem laje ou forro.

4.1.2. Telhas metálicas.

O uso de telhas metálicas tem ocupado cada vez mais espaço no mercado de coberturas leves para edificações com grandes áreas e vãos; o que provocou uma mudança de construções maciças para construções leves, devido principalmente a uma diminuição da massa específica dos telhados (ABCEN, 2009).

As telhas metálicas são caracterizadas e divididas em dois grupos distintos, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas: telhas de aço revestido de seção ondulada – ABNT NBR 14513:2008 (ABNT, 2008) e telhas de aço revestido de seção trapezoidal - ABNT NBR 14514:2008 (ABNT, 2008), apresentadas nas figuras 5 e 6. As telhas onduladas são as fabricadas a partir de chapas de aço pelo processo de conformação mecânica, cuja seção transversal é similar a uma sequência de ondas senoidais, com dimensões nominais estabelecidas na norma técnica ABNT NBR 14513:2005 (ABNT, 2005). Já as telhas de aço trapezoidais, a seção transversal é similar a uma sequência de trapézios, com dimensões nominais conforme estabelecido também na ABNT NBR 14514:2008 (ABNT, 2008).

Figura 5 - Perfil transversal das telhas de aço revestidas de seção ondulada.



Fonte: ABCEN (2009)

Em geral, as telhas de aço são revestidas em função de requisitos, como durabilidade, estética desejada e do ambiente onde as telhas estarão inseridas, sendo

os principais tipos: zincados por imersão a quente, “Galvalume” ou “Aluzinc”, pré-pintados e inoxidáveis (PORTAL MET@LICA 2017).

Figura 6 - Perfil transversal das telhas de aço revestidas de seção trapezoidal



Fonte: ABCEM (2009)

As telhas metálicas também se destacam por suas propriedades mecânicas, (tais como: resistência à tração, resistência ao impacto, resistência à torção, etc.), resistindo a solicitações extremas de ordem natural, como terremotos e fortes ventos. Outro ponto de destaque está ligado ao projeto arquitetônico pois permite designs variáveis, apresentando aspecto visual agradável. A figura 7 apresenta um exemplo de uma residência com telha metálica (ABCCEM, 2009) sendo uma excelente solução para fechamentos laterais das mais variadas tipologias de edificações.

Figura 7 - Residência com cobertura metálica – Rio de Janeiro/Brasil.

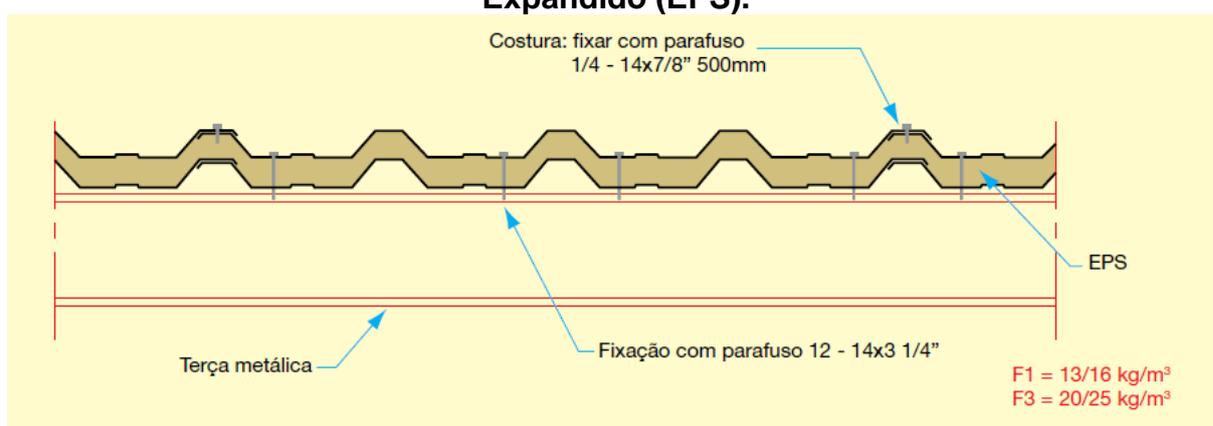


Fonte: Revista AU (2011).

4.1.3. Telhas termoacústicas.

As telhas termoacústicas, conhecidas popularmente como telhas “sanduíche”, são constituídas por duas chapas metálicas de aço ou alumínio preenchidas por um núcleo de material isolante (FIGURA 8). De acordo com a ABNT NBR 16373:2015 (ABNT, 2015), as telhas termoacústicas podem ser normalmente preenchidas em seu núcleo com lã de vidro, lã de rocha, espuma de Poliuretano (PU) ou Poliestireno Expandido (EPS), sendo que cada material do preenchimento possui propriedades distintas e compõe, junto com as chapas de aço ou alumínio, uma solução mais leve quando comparada com as telhas de concreto, reduzindo a massa dos telhados e resultando em um sistema de isolamento térmico tão eficiente ou até melhor que as telhas convencionais de cerâmica (CICHINELLI, 2014).

Figura 8 - Perfil e montagem da telha termoacústica com Poliestireno Expandido (EPS).



Fonte: ABCEM (2009).

A finalidade das telhas termoacústicas das edificações é proporcionar a redução do ruído externo e melhorar o isolamento térmico das coberturas e fechamentos. O coeficiente global de transmissão de calor (transmitância térmica) permite mensurar o desempenho dos diversos materiais quanto ao isolamento térmico. Para o seu cálculo, é utilizado, entre outros fatores, a condutividade térmica que é função do material, sendo que, quanto menor o valor do coeficiente global de transmissão de calor, melhor será o isolamento térmico (ABCEM, 2009).

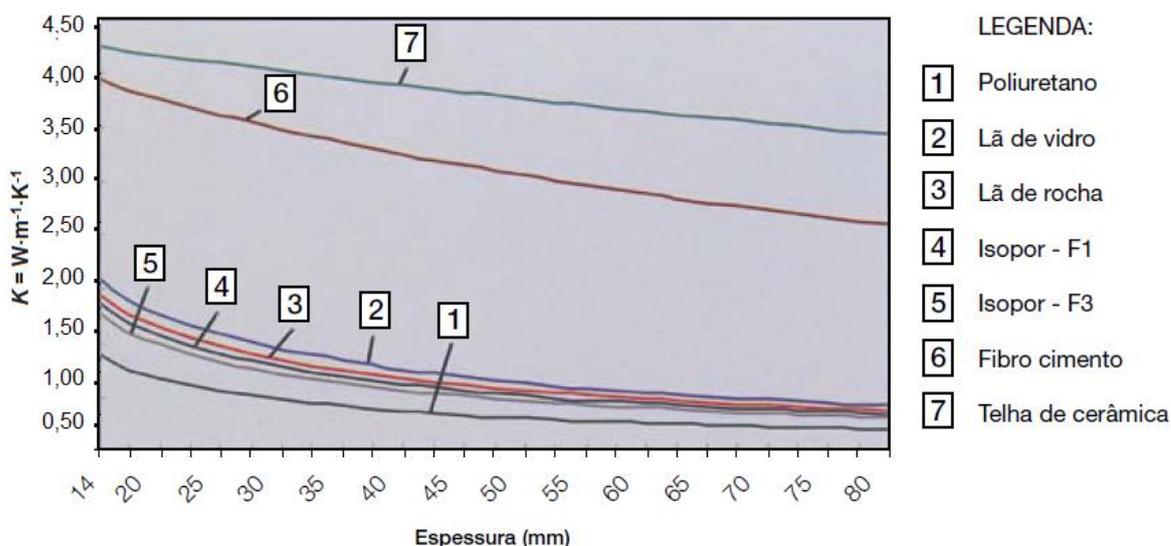
Os materiais de isolamento térmico usados nas telhas termoacústicas apresentam diferentes comportamentos – temperatura de trabalho, rigidez, resistência

à umidade, etc., que, dependendo das peculiaridades do seu uso, podem causar ou não variações de desempenho no sistema. Sendo assim, sua especificação não pode se resumir a simplesmente qualquer material que seja normatizado. As diversas opções de materiais possuem várias normas e inúmeras variações de desempenho que tornam sua escolha um processo que deve ser tratado de forma criteriosa e técnica.

As temperaturas de trabalho limites de cada material é um requisito dos mais importantes a serem observados na especificação de um isolante térmico. A temperatura de trabalho limite do poliestireno expandido e do poliuretano é de 80 °C a 90 °C (ABCCEM, 2009). Já as lãs de rocha ou de vidro podem ser aplicadas sem qualquer restrição em situações de até 200 °C (ABCCEM, 2009).

A rigidez do material isolante também é um fator limitante na especificação do sistema de preenchimento das telhas termoacústicas. As espumas de poliuretano ou placas de EPS possuem maior rigidez quando comparadas com as lãs de vidro ou rocha, podendo ser tanto maleáveis como rígidas, dependendo das necessidades do projeto. Na figura 9, são apresentados os valores de condutividade térmica global das telhas termoacústicas com os principais materiais isolantes usados comercialmente.

Figura 9 - Condutividade térmica global de telhas termoacústicas com os principais núcleos isolantes em comparação com telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas.



Fonte: Adaptado de ABCCEM (2009).

Geralmente, em telhas termoacústicas são produzidas com a lã de vidro com espessura de 50 mm, densidade de $12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e condutividade térmica de $0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $0,050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Este sistema é mais econômico devido ao menor custo do material de preenchimento, aliado ao seu bom desempenho termoacústico. Outro fator diferencial das lãs de vidro ou de rocha é a possibilidade da montagem no próprio canteiro de obra (ABCCEM 2009).

O uso de materiais poliméricos como o Poliuretano Expandido (PU), quando injetado entre as duas chapas de telhas, formam um conjunto com grande rigidez, com densidade de $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e condutividade térmica $0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Consegue-se, desta maneira, uma telha com alta resistência térmica e grande redução do ruído externo, sem a necessidade de subterfúgios de colagem ou fixação, o próprio material proporciona a fixação entre os dois componentes de telhas (ABCCEM, 2009).

Também, ao se utilizar o Poliestireno Expandido (EPS) no arranjo das telhas sanduiches, tem-se uma melhoria na resistência térmica e redução do ruído externo. Este material possui uma densidade de $13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e condutividade térmica de $0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. As telhas termoacústicas com este núcleo são leves e não sobrecarregam as estruturas de sustentação, possuem um custo unitário um pouco mais baixo, se comparado com os outros tipos de enchimento, mas apresentam a desvantagem de necessitarem de um sistema para fixação da junção, que em alguns casos, são frágeis e provocam deslocamento durante a montagem do telhado (ABCCEM, 2009).

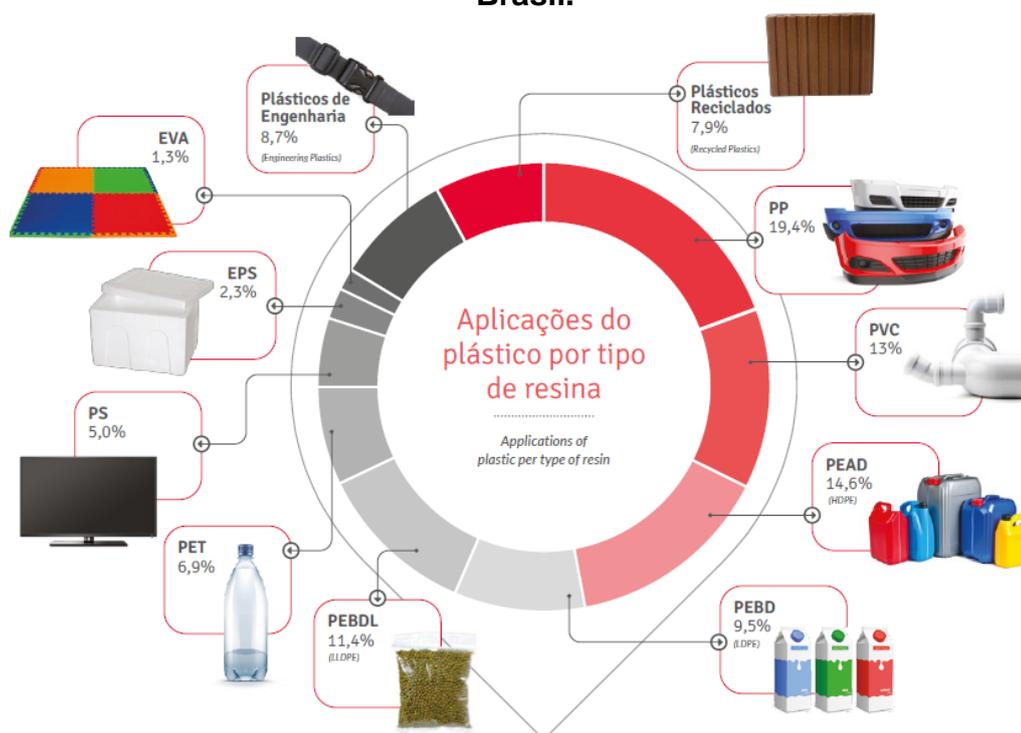
4.1.4. Telhas poliméricas produzidas com PET e suas blendas.

O poli(etileno tereftalato) (PET) é um polímero termoplástico da família dos poliésteres, produzido industrialmente por esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG). Onde dois elementos (PTA e MEG) combinados formam um conjunto que, durante o processo reagem entre si, cristalizando-se e formando o PET em forma de grânulos nas cores branca e opaca (PEREIRA, 2009).

ABIPET (2012) relata que a morfologia do PET depende principalmente das condições do processamento. Wiebeck e Harada (2005) mostram que as propriedades do PET estão diretamente ligadas ao seu grau de cristalinidade, atingindo o grau máximo de 60%, e que, em somente algumas situações muito específicas, o PET pode chegar a 95% de cristalinidade. Enfatiza que seu grau de cristalinidade varia de acordo com o arranjo molecular, ramificações e regularidade das moléculas e que todas estas variáveis dependem dos parâmetros ao qual o polímero foi processado e resfriado, sendo que o amorfo ou com baixo grau de cristalização é obtido após rápido resfriamento do polímero fundido, tal como acontece com o extrudado do reator de polimerização e com as pré-formas injetadas. Ainda relata que o PET amorfo se torna um sólido transparente com baixas propriedades físicas (baixa barreira a gases) e mecânicas (baixa resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade). Wiebeck e Harada (2005), também explicam que a morfologia do PET semicristalino varia conforme o processo de obtenção, existindo basicamente duas cristalizações bem distintas: cristalização térmica e cristalização induzida por tensão, correlacionando o maior o grau de cristalinidade do PET, a maiores resistências térmicas e rigidez, com redução da transparência e da resistência ao impacto. Concluindo que o grau de cristalinidade é o ponto-chave das propriedades do PET, pois todas as características do mesmo estão diretamente ligadas a este fator.

O PET é recorrente nos mais diversos produtos, de embalagens a tecidos, passando por peças automotivas e, mais recentemente, como parte de coberturas translúcidas de edificações, e recentemente vem sendo conformadas pela indústria para se adaptarem em conjunto com os diversos modelos de telhas cerâmicas (ABIPET, 2012). O PET é o oitavo produto mais aplicado nos diversos seguimentos industriais brasileiros respondendo por 6,9% das aplicações do mercado, conforme apresentado na figura 10 (IBGE, 2013; adaptado por ABIPLAST, 2016) sendo muito utilizado principalmente para embalagens de líquidos (ex.: refrigerantes, água, óleo comestível, leite, sucos, chás, maionese, ketchup, fármacos, higiene/limpeza, isotônicos, etc. (M&G CHEMICALS, 2018; PQS-PETROBRAS, 2017).

Figura 10 - Panorama das aplicações dos polímeros por tipo de resina no Brasil.



Fonte: IBGE 2013 – Adaptado por ABIPLAST (2016).

Outra vantagem do PET é a eficiência no envase de bebidas carbonatadas, pois este polímero possui as propriedades necessárias, como: permeabilidade ao gás carbônico, resistência mecânica, transparência e barreira a gases e ao vapor. O quadro 1 apresenta algumas especificações e propriedades típicas das resinas de PET fabricadas no Brasil pela empresa M&G Chemicals (Cleartuf Turbo e Cleartuf Max).

De acordo com M&G (2018), a resina de poliéster Cleartuf® Max foi desenvolvida com capacidade aprimorada de absorver energia das lâmpadas de infravermelho, presentes na maioria das máquinas de moldagem por sopro de alta velocidade, com o intuito de melhorar a absorção de energia, resultando em melhor controle de temperatura do processo, o que, por sua vez, pode levar a uma melhor homogeneidade do material e propriedades do produto final. Esta melhoria pode, também, melhorar o fluxo de saída da máquina e reduzir o consumo de energia elétrica do processo. De acordo ainda com a M&G (2018), a resina Cleartuf® Max possui característica para projetos que necessitam de alta transparência, brilho, alta resistência e tenacidade, e boas propriedades de barreira. O segundo tipo de resina

de poliéster da M&G Chemicals produzida no Brasil é a intitulada Turbo® II, que é uma resina de copolímero de tereftalato de polietileno – PET, à base de TPA (ácido tereftálico), especialmente projetada para uso na produção de garrafas para o mercado de água mineral. É um polímero de baixa massa molar, projetado para fornecer altos desempenhos de propriedades de recipiente, incluindo transparência, brilho e cor. Esse polímero pode ser utilizado com catalisador apropriado que estabiliza a resina, melhorando as propriedades dos polímeros durante os ciclos de processamento. Esta estabilidade superior também permite que o processo de secagem não afete a cor ou a massa molecular do material. Ela também pode ser processada a temperaturas mais baixas em comparação com outros tipos tradicionais de resinas para garrafas.

Quadro 1- Propriedades típicas das resinas PET da empresa M&G Chemicals.

Parâmetro	Unidade	Especificação		Método
		Resinas M&G		
		Cleartuf Turbo II	Cleartuf Max	
Viscosidade Intrínseca	dL/g	0,74	0,84	PVS - Lauda
Cor L	-----	Min. 70	Min. 70	HunterLabColorímetro
Cor B	-----	Max. -1,5	Max. -0,5	
Ponto de fusão	°C	250	250	DSC
Acetaldeído	ppm	Max. 1,0	Max. 1,6	GC

Nota: Cor L indica a luminosidade e numericamente varia de 0 (preto) até +100 (branco) e cor B que varia de -60 (azul) até +60 (amarelo).

Fonte: M&G – 2018.

A segunda empresa fabricante de resinas de PET virgem no Brasil, a PQS – Petrobrás, fornece quatro classes distintas de resinas. A primeira, denominada PQS-CSD, é formulada com aditivo de rápido aquecimento (*faster-heat*) para proporcionar economia de energia, minimizando o tempo de aquecimento em fornos e lâmpadas de infravermelho. A PQS-CSD foi concebida para resultar em um balanço entre processabilidade e desempenho das embalagens. Já a segunda variante desta classe, denominada PQS-CSD Plus, é uma resina com viscosidade mais elevada, que possibilita projetos de embalagens mais leves para garantir uma resistência apropriada à pressão interna, *stress cracking* (degradação por meio de agente químico quando sob tensão mecânica) e com maior barreira a gases que as resinas

convencionais. A terceira variante PQS-MW foi concebida para atender o mercado de embalagens de águas ou para produtos que precisem de brilho e transparência superiores, sendo uma resina com baixo nível de acetaldeído (volátil e tóxico) e desempenho superior na produção de pré-formas e garrafas. Por fim, a quarta variante, denominada PQS-HF, foi desenvolvida para bebidas e alimentos envasados a quente ou produtos que precisem de uma embalagem que utiliza a tecnologia *heat set* no sopro. Foi formulada para fornecer alta taxa de cristalização com maior estabilidade dimensional e estrutural (PQS 2017). O quadro 2 apresenta algumas especificações e propriedades típicas das resinas de PET fabricadas no Brasil pela empresa PQS-Petrobrás (CSD, CSD Plus, MW e HF).

Quadro 2 - Propriedades típicas das resinas PET da empresa PQS-PETROBRÁS.

Parâmetro	Unidade	Especificação				Método
		Resinas PQS				
		CSD	CSD Plus	MW	HF	
Viscosidade Intrínseca	dL/g	0,82	0,85	0,80	0,82	M&G/QC-01
Cor L	-----	Min. 81	Min. 87		Min. 87,5	M&G/QC-02
Cor B	-----	Max. 0				
Ponto de fusão	°C	250		253		M&G/QC-03
Acetaldeído	ppm	Max. 1,0				M&G/QC-01
Finos	ppm	Max. 100				

Nota: Cor L indica a luminosidade e numericamente varia de 0 (preto) até +100 (branco) e cor B que varia de - 60 (azul) até + 60 (amarelo).

Fonte: PQS – 2017.

Segundo Spinacé e Paoli (2005), apesar da existência de uma grande variedade de termoplásticos, somente cinco deles, o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Policloreto de Vinila (PVC) e o Polietileno Tereftalato (PET), representam cerca de quase 90% do consumo brasileiro. Cerca de 89% dos polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos, são o Polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), além do PET, PVC e o PP. A reciclagem do PET, em conjunto com o papelão, é o carro-chefe da maior parte das cooperativas no país, mantidas por mais de 800 mil catadores de materiais recicláveis (ABIPET, 2016). Auri Marçon, presidente da Abipet, vê um grande potencial para o setor. "O Brasil é líder em aplicação para PET reciclado" (ABIPET, 2016). Esse plástico reaparece como resina usada em carpetes e forrações de veículos (28,6%), fibra têxtil (25,7%) e em novas embalagens (25,7%), segundo o censo da associação (ABIPET, 2016).

Como é um material termoplástico, o PET pode ser reciclado várias vezes, destacando-se, assim, no mercado das resinas recicláveis, pois proporciona uma economia de energia do petróleo, evita a agressão ao meio ambiente, gera empregos, e viabiliza pequenas empresas e cooperativas de reciclagem (MANCINI, BEZERRA, ZANIM, 1998).

O tipo de processamento para reciclagem do PET mais utilizado é a mecânica, que consiste, resumidamente, em preparar o material pós-consumo e usá-lo como matéria-prima no processo de fabricação de novos produtos, sendo este processo normalmente realizado por injeção, extrusão ou termoformagem. Esta forma de reciclagem, no entanto, apresenta limitações no sentido de que, quanto maior o número de vezes que um mesmo material é reciclado, mais suas propriedades são alteradas (ROMÃO; SPINACÉ e PAOLI, 2009).

O Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é um polímero altamente linear e com estrutura compacta, com densidade de $0,95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $0,97 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (BRYDSON, 1999). É obtido a partir do monômero de eteno sob uma rota de polimerização por adição via rota catalítica, o polímero resultante revela alta resistência ao impacto e boa resistência a solventes químicos (GONÇALVES, 2014).

Dentre os termoplásticos, o PEAD é o quarto polímero mais consumido e a segunda resina mais reciclada no mundo (BARBOSA *et al*, 2005). É utilizado em diversos segmentos da indústria de transformação de plásticos, abrangendo os processamentos de moldagem por sopro, extrusão, moldagem por injeção dentre outros (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003). Empregado na confecção de engradados para bebidas, garrafas de álcool e de produtos químicos; baldes, tambores, tubulações para líquidos e gás, tanques de combustível, embalagens de leites, de sucos, de óleos lubrificantes, de agrotóxicos, etc., esse polímero mostra-se eficiente em aplicações que requisitam resistência à queda, ao fissuramento, ao empilhamento e inercia química (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003). Cowie *apud* Monteiro *et al* (2014) destaca que o PEAD é relativamente resistente ao calor e ligeiramente permeável a compostos orgânicos, tanto em fase líquida como gasosa, sendo sua permeabilidade à água e gases inorgânicos baixa. Caraschi *apud* Dalfre *et al* (2007) descreve que o PEAD vem se tornando um dos plásticos mais reciclados dentre os termoplásticos rígidos devido às suas propriedades mecânicas e à significativa

disponibilidade nos resíduos sólidos urbanos, cerca de 30% do total de resíduos plásticos rígidos.

Blendas poliméricas são definidas como misturas físicas de dois ou mais polímeros sem que haja reação química entre eles, apresentando efeitos cooperativos decorrentes da mistura e proporcionando em alguns casos uma melhoria das propriedades em relação às propriedades dos homopolímeros e copolímeros (GONÇALVES, 2014).

Sendo uma alternativa sob o ponto de vista ambiental, além do fato de agregar valor aos resíduos, possibilita a criação de materiais com propriedades intermediárias entre os constituintes puros. Blendas poliméricas são materiais que se destacam pela variedade de aplicações, pois suas propriedades físicas, químicas e mecânicas podem ser alteradas com concentração dos constituintes, visando um desempenho desejável para o produto final. Nesse contexto, o PEAD pode modificar as propriedades do PET, pois apresenta alta resistência ao impacto e boa resistência aos solventes químicos. Por outro lado, o PET pode melhorar as propriedades térmicas do PEAD (GONÇALVES, 2014).

Contudo, de acordo com Marconcini e Filho (2006), as blendas de PET com poliolefinas (PEAD, PEBD, PP, EVA, PB e PIB) podem propiciar um balanço atrativo de propriedades mecânicas, de barreira e de processabilidade. Porém, a imiscibilidade entre estas duas categorias de polímeros, poliésteres e poliolefinas, pode levar à formação de blendas com pobre adesão e alta tensão interfacial, com uma grosseira separação de fases, resultando em perdas de propriedades mecânicas e de barreira.

Iñiguez *et al.* (2000) avaliaram a morfologia e as propriedades mecânicas das blendas PET/PEAD, ambos reciclados com e sem a utilização de compatibilizante, processando os materiais em misturador de câmara interna e em extrusora dupla rosca. Os autores concluem que o compatibilizante reduz a tensão interfacial, melhorando a dispersão e a estabilidade da morfologia, sendo a propriedade mecânica mais afetada a deformação na ruptura.

Já Ávila *et al.* (2003) estudaram as blendas de materiais reciclados de PET com 40% de PEAD sem a adição de qualquer tipo de compatibilizante, processando os materiais abaixo da temperatura de fusão (T_m) do PET, denominando o sistema como

material compósito particulado. Foi avaliado o efeito de vários reprocessamentos nas propriedades mecânicas da blenda. Os autores propõem uma forma de cálculo do módulo elástico em função do número de reprocessamentos. As curvas resultantes dos ensaios mecânicos de tração apontam para um material frágil com valores de deformação na ruptura entre 4% e 8% em função do número de reprocessamentos.

Em função do estado da técnica apresentado, o objetivo deste trabalho é a contribuição com uma abordagem de processamento simplificada e de baixo custo, de forma a gerar blendas que possuam propriedades térmicas e mecânicas aplicadas ao uso em telhas termoacústicas. De forma a viabilizar o uso da matriz polimérica reciclada sem gerar custos adicionais com aditivos ou mesmo processos complexos de processamento.

4.2. Desempenho térmico de coberturas.

Dentre os componentes de uma edificação horizontalizada, a cobertura é o elemento mais importante em relação ao ganho de temperatura interna, pois é a parte da edificação mais exposta à radiação direta do sol, influenciando diretamente no conforto térmico e no consumo de energia devido ao condicionamento forçado de ar no interior das edificações. Para o bom desempenho de uma cobertura, são necessários projetos detalhados que englobem todos os aspectos que relacionem propriedades estruturais alinhadas com parâmetros termofísicos dos materiais, bem como, com a capacidade térmica do sistema de cobertura, em relação às condições climáticas locais (RIVERO 1986). Portanto, é essencial o conhecimento da condutividade térmica, calor específico, densidade, emissividade e absorvância à radiação solar dos materiais utilizados na edificação, incluindo dos elementos da cobertura e da ventilação existente na camada de ar correspondente ao ático.

Os sistemas de coberturas devem atender às exigências aplicáveis que se encontram estabelecidas na ABNT NBR 15575-1:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais (ABNT, 2013), além das discriminadas na ABNT NBR 15575-5:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas (ABNT, 2013). A partir do conhecimento da transmitância térmica (U), da absorvância (α) à radiação solar, e do fator de

ventilação (FT), é possível avaliar o desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática (ANEXO A). A norma ABNT NBR 15575-1:2013 estabelece dois métodos distintos para avaliação do desempenho térmico das edificações, sendo um simplificado e um mais detalhado (ABNT, 2013). O método simplificado consiste na determinação de valores limite para a transmitância térmica e capacidade térmica da envoltória. No método detalhado, são utilizadas simulações numéricas do comportamento térmico do edifício considerando as estações do ano (verão e inverno). Contudo, o desempenho térmico da edificação dependerá da interação térmica entre fachada, cobertura, piso e o meio externo. Assim estas normas sugerem valores máximos e mínimos diários de temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada, para os dias típicos de verão e de inverno, respectivamente (DIAS, 2010).

4.3. Transmitância térmica.

A transmitância térmica (U) ou coeficiente global de transferência de calor é o inverso da resistência térmica total (R_T) e corresponde ao fluxo de calor transmitido por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura, expressa na ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005):

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

A resistência térmica total é definida como o somatório de todas as resistências térmicas dos elementos ou componentes presentes e varia de acordo com vários fatores, tais como emissividade, velocidade das massas de ar sobre a superfície, direção do fluxo de calor (descendente ou ascendente), temperatura da superfície das massas ar e da temperatura de superfícies próximas, determinada pela seguinte expressão da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005):

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si}. \quad (2).$$

Sendo R_t é a resistência térmica da superfície de um componente constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, R_{se} e R_{si} correspondem às resistências superficiais interna e externa, respectivamente, obtidas da tabela A1 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005). A resistência térmica de superfície a superfície, R_t , é dada pela ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005) como:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn}. \quad (3),$$

o termo $R_{t1,n}$ da equação correspondente a resistência das “n” camadas homogêneas e $R_{ar,n}$ a resistência térmica das “n” câmaras das massas de ar, obtidas da tabela B.1 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005). A resistência térmica, $R_{t1,n}$, de uma camada homogênea de material sólido é determinada pela seguinte equação:

$$R_{t1,n} = \frac{e}{\lambda} \quad (4),$$

onde e corresponde à espessura da camada e λ a condutividade térmica de cada elemento que compõe o sistema. No anexo B são apresentados alguns valores da condutividade térmica de alguns materiais de uso corrente, de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005).

A tabela 1 apresenta o critério para 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

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

^aNa 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.

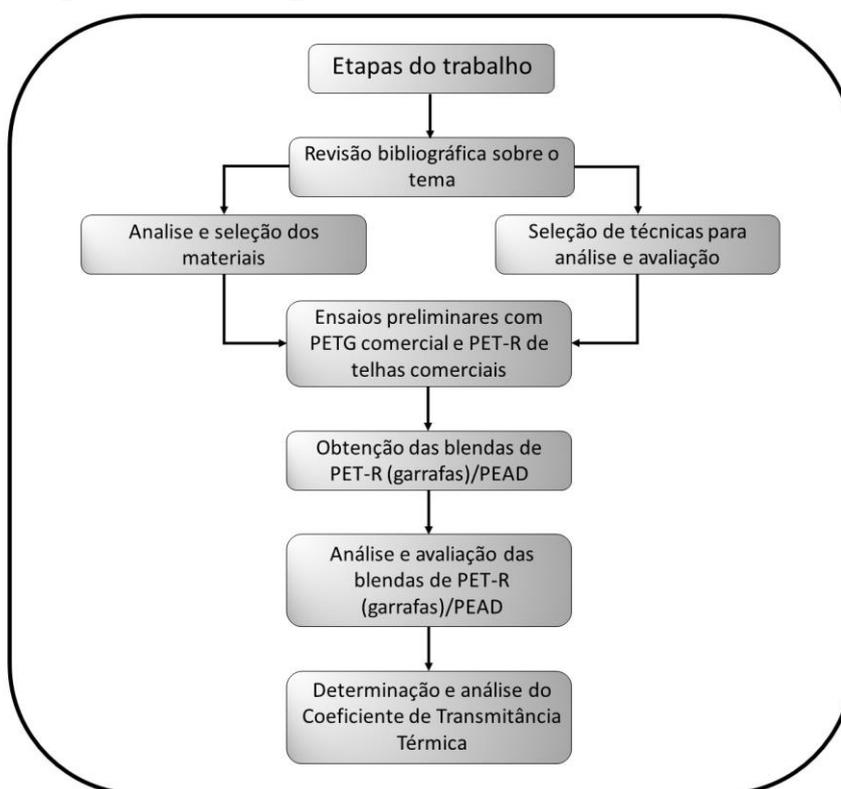
(2) A sigla FV na presente tabela não consta na ABNT NBR 15220-2. NA NBR 15220-3 a sigla adotada é FT (fator de correção da transmitância).

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

5 METODOLOGIA

O conjunto de métodos adotados no desenvolvimento deste trabalho foi dividido em três etapas. Na primeira etapa, foi conduzido um levantamento bibliográfico de dados sobre os sistemas e processos construtivos das estruturas classificadas como coberturas, bem como soluções construtivas com conforto ambiental termoacústico aplicadas em coberturas. Na segunda etapa, investigou-se algumas soluções construtivas, mas foi dado um destaque para as soluções em coberturas com telhas à base de polímeros termoplásticos confeccionadas em PET. Na terceira etapa, foi realizado um arranjo produtivo, pautado por processamento de polímeros e blendas, sequenciada por métodos e técnicas de caracterização físicas, físico químicas, químicas e micro e nanoestrutural. Adicionalmente, foram avaliados os comportamentos dos materiais sob a luz das propriedades mecânicas e termofísicas. Por fim, promoveu-se uma simulação do conforto térmico de uma cobertura hipotética utilizando como o referencial o exemplo C6 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005). A figura 11 apresenta o fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho.

Figura 11 - Fluxograma das atividades do trabalho.



Fonte: Autor (2018).

5.1 Materiais

Essa investigação sistematizou uma avaliação sobre a concepção de telhas termoacústicas produzidas com polímeros termoplásticos como o PET. Foram avaliados materiais já comerciais (telhas com matriz polimérica em PET reciclado) e também foram produzidas blendas com PET reciclado oriundos de garrafas de refrigerantes, adicionando 10% e 30% em massa de PEAD.

5.1.1 Amostras de PET-R obtidas de telhas comerciais

Para os ensaios iniciais, foram adquiridas três amostras comerciais de telhas translúcidas à base PET-R (FIGURA 12), para investigar o efeito do processo de fabricação nas propriedades termofísicas e mecânicas, sendo uma conformada por injeção e duas por termoformagem, de fabricantes diferentes.

Figura 12 - Plano de corte das amostras telhas comerciais de PET-R; (a) telha conformada por processo de injeção; (b) telha conformada por processo de termoformagem.



Fonte: Autor (2018).

Este material foi selecionado, pois são comumente utilizados para substituir unidades de telhas cerâmicas para melhorar a iluminação natural no interior dos ambientes. Geralmente, estas telhas são encontradas em vários modelos para facilitar a substituição das peças de forma congruente e sem maiores adaptações ao engradamento da cobertura. Para o plano de corte, foi utilizado o programa

AutoCAD®, versão “Student Version”, da empresa Autodesk (AUTODESK, 2018). As amostras foram cortadas por jateamento de água de alta pressão com equipamento Mach2 da Flow International Corporation pela empresa Opermak Suprimentos Industriais (OPERMAK, 2018), para retirada dos corpos de prova para análise física, físico-química, química, termofísica, mecânica e microestrutural das amostras. Para estes ensaios, foram obtidas oito amostras para as telhas conformadas por termoformagem (fabricante 1, código PET-R/Tt1) e por injeção (fabricante 2, código PET-R/Ti2). Para a telha conformada por termoformagem (fabricante 2, código PET-R/Tt2), foram selecionadas apenas seis amostras.

5.1.2 Amostras de PET-R obtidos de garrafas de refrigerantes e PEAD

Para a obtenção das blendas de PET-R (100%) e de PET-R/PEAD foram utilizadas garrafas de refrigerante translúcidas de um único fabricante e resinas de PEAD virgem. O PEAD proveniente das empresas SABIC e Braskem foi doado pelo LEPCom/DEMET/UFMG na forma de grânulos e pó com as propriedades típicas apresentadas, respectivamente, nos Anexos D e E. As etapas para o processamento do PET-R das garrafas foram as seguintes:

- 1) captação e seleção de garrafas de 2 L utilizadas no acondicionamento de refrigerante de um único fabricante;
- 2) limpeza e lavagem para eliminação de contaminantes;
- 3) obtenção de grânulos do PET (corte e moagem);
- 4) medição da granulometria por meio de peneiramento em peneira número 5 (malha 4mm);
- 5) secagem do PET-R moído em estufa da marca Solotest, modelo 150 L, a temperatura de 135°C por 3h.

A figura 13 apresenta os grânulos de PET-R de garrafa obtido após a secagem em estufa.

Figura 13 - Grânulos de PET-R de garrafa.



Fonte: Autor (2018).

5.2 Obtenção das blendas de PET-R/PEAD

O processamento das amostras de PET-R e suas blendas foi realizado no Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos – LEPCOM, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – DEMET, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

- 1) as blendas poliméricas de PET-R/PEAD foram obtidas nas proporções em massa de 10% e 30% de PEAD, codificadas neste trabalho por PET-R/PEAD-10% e PET-R/PEAD-30%. Para o processo de conformação das blendas, optou-se pelo seguinte roteiro: preparo da mistura por dispersão do PET-R com o PEAD por meio de agitador mecânico Tradelab 713D por 10 min;
- 2) conformação dos corpos de prova das blendas PET-R/PEAD em injetora Jetmaster modelo JN35-E (35 t) em molde do tipo gravata, conforme a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014) para os ensaios de tração, com parâmetros conforme quadro 3;
- 3) termoformagem em placas de 120 mm x 70 mm x 5 mm à pressão de 15 toneladas e à temperatura de 190 °C, utilizando uma prensa hidráulica

térmica da marca Sagec. Para o controle da temperatura, foi utilizada uma câmera térmica da marca FLIR, modelo TG165;

- 4) corte dos corpos de prova cilíndricos com 35 mm de diâmetro e 3 mm de espessura utilizando uma Moto Esmeril Ferrari 6", modelo ME-6^a.

O quadro 3 apresenta os parâmetros de injeção utilizados para a conformação dos corpos de prova para os ensaios à tração, para obtenção do limite de resistência à tração, limite de resistência à ruptura e módulo de elasticidade, conforme preconiza a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014).

Quadro 3 - Parâmetros de injeção utilizados.

Parâmetro de processo	Unidade	Valor
Pressão de injeção	bar	350
Tempo de carga	s	5,0
Rotação da Rosca	rpm	50
Temperatura zona 01	°C	190
Temperatura zona 02	°C	260
Temperatura zona 03	°C	270
Temperatura do bico de injeção	°C	230
Tempo de resfriamento	s	10

Fonte: Autor (2018).

5.3 Caracterização

Os experimentos para determinação da densidade e das propriedades termofísicas (calor específico, difusividade térmica) das amostras ensaiadas foram realizados no Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas (LMPT) do CDTN. Os ensaios de FTIR e termogravimetria, bem como, para avaliação da micro e nanoestrutura por microscopia eletrônica de varredura foram realizados no Laboratório de Química de Nanoestruturas de Carbono (LQN) e no Laboratório de Microscopia também do CDTN. Já os experimentos para caracterização mecânica das amostras foram realizados no Laboratório de Ensaios de Sistemas Construtivos – LESC da Universidade FUMEC.

5.3.1 Densidade

A densidade foi determinada pelo método do empuxo que se baseia no princípio de Arquimedes (Montanheiro, 2004). Para a medição da massa das amostras foi utilizada uma balança calibrada com resolução de 0,1 mg (Ohaus, AV264CP). Para secagem das amostras na temperatura de 100 °C por 1 h foi utilizada uma estufa da marca Solotest, modelo 150. A densidade da amostra pelo método do empuxo é dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{m - m_{EM}} \cdot \rho_A \quad (5)$$

onde (m) é a massa da amostra, (ρ_A) corresponde a densidade da água e (m_{EM}) é a massa da amostra sob empuxo.

5.3.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

As análises de infravermelho no modo refletância total atenuada (ATR) foram realizadas em um espectrofotômetro da marca Thermo NICOLET, modelo Nexus 470, na região espectral do IR compreendida de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} , com acumulação de 64 espectros. As análises de FTIR contribuíram para uma avaliação química composicional das amostras poliméricas à base de PET e suas blendas com PEAD. Além disso, permitiram detectar possíveis alterações dos compostos orgânicos, como nas blendas à base de PET-R/PEAD, bem como a formação de blendas durante o processamento da mistura de PET-R com PEAD durante a injeção dos corpos de prova.

5.3.3 Análise termogravimétrica.

A estabilidade térmica e as movimentações moleculares recorrentes a partir da temperatura de transição vítrea (T_g) das amostras ensaiadas foram avaliadas a partir da análise termogravimétrica realizada no LQN do CDTN/CNEN, no equipamento TA

Instruments, modelo STD 2960, e permitiu a análise simultânea TGA/DTA (*Diferencial Thermal Analysis*) e TGA/DSC (*Diferencial Scanning Calorimetry*), de acordo com ASTM E1131-14 (ASTM, 2014). Foram selecionadas aleatoriamente amostras retiradas dos corpos de provas dos materiais ensaiados. As análises foram realizadas em atmosfera de nitrogênio de alta pureza, com fluxo de 25 mL/min e taxa de aquecimento de 10°C/min de 25°C até decomposição do material, limitando o intervalo de temperatura a 1000 °C. As amostras de aproximadamente 11,01 mg e 11,50 mg, foram acondicionadas em cadinhos de alumínio e alumina para os ensaios de TGA/DSC e TGA/DTA, respectivamente.

5.3.4 Propriedades mecânicas.

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. A aquisição e processamento do sinal foi realizado utilizando o *software* do próprio equipamento.

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. Para as medições de deslocamento foi utilizado o próprio sensor de movimento da máquina, ao qual foi transformado em valores de deformação dos corpos de prova.

As propriedades E, LRT, LRR são todas extraídas no gráfico σ versus ϵ dos corpos de prova ensaiados, conforme os procedimentos preconizados na norma ASTM D638:2014, seção 5 (ASTM, 2014).

5.3.5 Propriedades termofísicas.

a) Calor específico.

Para as amostras ensaiadas de PET-R o calor específico foi obtido experimentalmente por calorimetria exploratória diferencial (DSC), segundo a ASTM E1269-11 (ASTM, 2011). Foi utilizado equipamento da marca TA Instruments, modelo Q10 (FIGURA 14 (a)). Antes de iniciar o ensaio, o equipamento foi calibrado utilizando um padrão de safira para a linha da base, com a correção automática. As amostras de aproximadamente 6 mg foram colocadas no cadinho de alumínio hermeticamente fechado. O ensaio foi realizado utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera de N₂ (50mL/min). Para medição da massa, foi utilizada uma balança analítica com resolução de 0,1 mg (Ohaus, AV246CP). O calor específico (C_p) das blendas de PET-R/PEAD foi calculado de acordo com a regra da mistura (OLIVEIRA; CABRAL, 1997) conforme equação 9, em função do conhecimento da fração em massa (W) e do valor C_p de PET-R e de PEAD (BRASKEN, 2014).

$$C_p = W_{PET-R} \cdot C_{pPET-R} + W_{PEAD} \cdot C_{pPEAD}. \quad (6)$$

onde: (C_p) é o calor específico, (W) fração em massa da amostra

b) 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:

$$\frac{\delta T^2}{\delta x^2} = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{\delta T}{\delta t} \right) - \nabla(\varphi_r) \quad (7),$$

cujo o termo φ_r é a densidade de fluxo de calor, T a temperatura, t o tempo e a a difusividade térmica.

A figura 14 (b) 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 14 - Equipamentos aplicados na determinação das propriedades termofísicas.



(a) Calorímetro Exploratório Diferencial TA Q10



(b) Difusímetro QuadruFlash 1200

Fonte: Autor (2018).

A condutividade térmica λ foi determinada pelo produto do valor da difusividade térmica a , do calor específico C_p e da densidade ρ , expressa pela seguinte equação:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot C_p. \quad (8).$$

5.3.6 Análise microestrutural.

A morfologia das amostras ensaiadas, 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). Para a obtenção das imagens utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura da marca Karl Zeiss Microscopy GmbH, modelo Sigma VP, com detector de elétrons secundários de pressão variável do laboratório de microscopia do CDTN 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.

5.4 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 1) das amostras obtidas com o valor do referencial teórico apresentado no exemplo C.6 da ABNT NBR 15220-2:2005 (ABNT, 2005), figura 15, somente para a condição de verão em virtude de ser a condição predominante do Brasil.

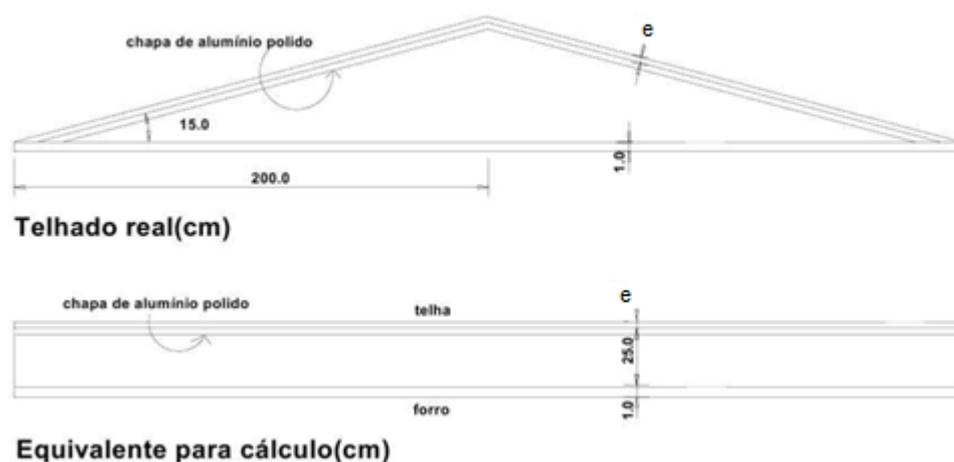
Neste exemplo, é considerado uma cobertura de duas águas, conforme dimensões apresentadas no quadro 4, telha de fibrocimento com forro de pinus, câmara muito ventilada, lâminas de alumínio polido com câmara de ar de emissividade baixa ($\varepsilon < 0,2$); direção do fluxo de calor descendente para a resistência térmica da câmara de ar (R_{ar}) e para a resistências térmicas superficiais interna (R_{si}) e externa (R_{se}).

Quadro 4 - Dados da tipologia de referência de cobertura conforme ABNT NBR 15220-2:2005.

Item	Valor
Comprimento do telhado	7 m
Altura da abertura de ventilação (em cada beiral)	0,05 m
Comprimento da abertura de ventilação (em cada beiral)	7 m

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

Figura 15 - Tipologia da cobertura de referência.



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

O quadro 5 apresenta os valores da condutividade térmica dos materiais utilizados, assim como os valores das resistências térmicas adotados considerando as condições do projeto.

Quadro 5 - Dados do projeto.

Grandeza	Valor	Unidade
Condutividade térmica da telha de fibrocimento	0,65	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Condutividade térmica do forro de pinus	0,15	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Resistência térmica da câmara de ar	0,61	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Resistência térmica superficial interna (R_{Si})	0,17	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Resistência térmica superficial externa R_{Se}	0,04	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

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

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o arranjo experimental adotado, e nas condições descritas no capítulo 5 estabeleceu-se o desenvolvimento dos resultados de forma a apresentar os parâmetros de processamento, condições de ensaio e resultados de cada amostra obtida, de forma a possibilitar uma análise comparativa e qualitativa dos materiais estudados.

6.1 Processamento do PET e suas blendas de PET/PEAD

As amostras de PET-R foram originadas de garrafas de refrigerantes transparentes fabricadas em PET translúcido cristal. Foram empregadas garrafas de um mesmo fabricante de refrigerantes visando a homogeneidade das mostras. Os peletes foram obtidos por cortes manuais com tesouras comuns, com granulometria igual 5, conforme classificação definida na norma técnica ABNT NBR NM ISO 3310-2:2010 (ABNT, 2010).

Os peletes de PET-R experimentaram uma mistura mecânica num moinho de bolas, visando homogeneizar as amostras de PET-R/PEAD com adição de 10 % e 30 % em massas. Os tempos de mistura para ambas formulações foram de 10 min, na velocidade máxima do equipamento, que segue uma escala de 1 a 10.

Foram realizadas etapas de homogeneização do PET-R puro e misturas de PET-R/PEAD através do processamento por extrusão. Com auxílio de uma extrusora monorosca foram conduzidos alguns ciclos de processamentos com variação de parâmetros de extrusão, conforme apresentado no quadro 6, tentou-se obter um produto adequado para a injeção de corpos de prova, segundo a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014). Contudo, os resultados foram um extrudado de baixa qualidade, com filamentos quebradiços com alterações na coloração de cristal a marrom escuro, indicando que, durante o processamento, o material sofreu degradação termomecânica. Processo semelhante ao observado por Pacheco *et al.* (2009), que relata que, durante a extrusão do PET, foram observadas liberação de gás juntamente com o produto extrudado e uma saída intermitente do produto final, apesar da alimentação contínua da mistura na extrusora. Pacheco *et al.* (2009) atribuiu a liberação de gás como sendo a uma possível degradação do polímero, tanto térmica

quanto oxidativa, gerando perda de massa com conseqüente formação e liberação de gás; relatando, também, que a saída intermitente de produto se deve, possivelmente, à formação de gás no interior da extrusora.

Quadro 6 - Parâmetros de extrusão usados na tentativa de processamento das amostras das blendas poliméricas.

Zonas de aquecimento	Temperatura (°C)		Velocidade da rosca (rpm)	
	De	Até	De	Até
Zona 1	140	210	10	70
Zona 2	160	230		
Zona 3	180	265		
Zona 4	200	240		

Fonte: Autor (2018)

Pietrasanta *et al.* (1999) apontaram que a compatibilização de blendas de PET com PEAD pode ser obtida em processamento de etapa única. As propriedades mecânicas das misturas preparadas por moldagem por injeção apresentam melhores que as das misturas preparadas por extrusão seguida de moldagem na injetora. A taxa de cisalhamento no processo de moldagem por injeção foi suficiente para garantir uma dispersão da fase segregada e uma redução da tensão interfacial. Kalfoglou *et al.* (1995) investigaram a eficácia do compatibilizante para misturas de PET/PEAD; com base na evidência morfológica e nos ensaios de tração, o melhor efeito compatibilizante foi obtido com copolímeros contendo funções epoxídicas, pois poderiam reagir com os grupos finais hidroxila e carbonila do PET.

Em face aos resultados, optou-se pela técnica de processamento com conformação direta. Com o emprego de uma injetora da marca Jetmaster, modelo JN35-E (35 t), com molde do tipo gravata (FIGURA 16 (a)), definido na norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014). Neste processo, o PET-R passou por uma pré-secagem a 135°C, por períodos de 3 h, e homogeneizado no moinho de bola por 10 min e submetido a injeção. Neste processo, o PET-R passou por uma pré-secagem a 135°C, por períodos de 3 h, e homogeneizado no moinho de bola por 10 min e submetido a injeção.

Um segundo método de conformação mecânica aplicados sob os polímeros puros e suas blendas foi o método produtivo da termoformagem. Utilizando-se de uma

prensa hidráulica aquecida por sistemas resistivos, foi possível obter discos a base de PET-R e blendas de PET-R/PEAD (FIGURA 16 (b)). A prensa utilizada foi um equipamento que atinge 15t de força, e 300°C durante o movimento de prensagem.

Figura 16 - Corpo de prova das blendas PET-R/PEAD, aplicados nos ensaios mecânicos e termofísicos.



(a) Corpos de provas confeccionados sob as indicações da norma ASTM D638:2014.



(b) Corpos de prova utilizados nos ensaios termofísicos.

Fonte: Autor (2018)

As dificuldades no controle de temperatura do processamento devido a não homogeneidade de aquecimento das placas da prensa, a falta de fôrmas específicas para moldagem dos corpos de prova e a má dispersão das fases no processo de conformação das blendas prejudicaram o processo de termoformagem utilizado para a produção das blendas de PET/PEAD para os ensaios térmicos, isto possivelmente afetou os resultados destas propriedades, gerando amostras anisotrópicas e a necessidade de realização de medidas adicionais.

6.2 Caracterização das amostras à base de PET

6.2.1 Densidade

A tabela 3 e a figura 17 apresentam os valores médios sob condições de repetibilidade ($n = 5$) dos resultados obtidos para a densidade das amostras.

Tabela 3 - Valores médios das medidas da densidade das amostras de PET-R e blendas de PET-R/PEAD tomadas à temperatura de 23 °C.

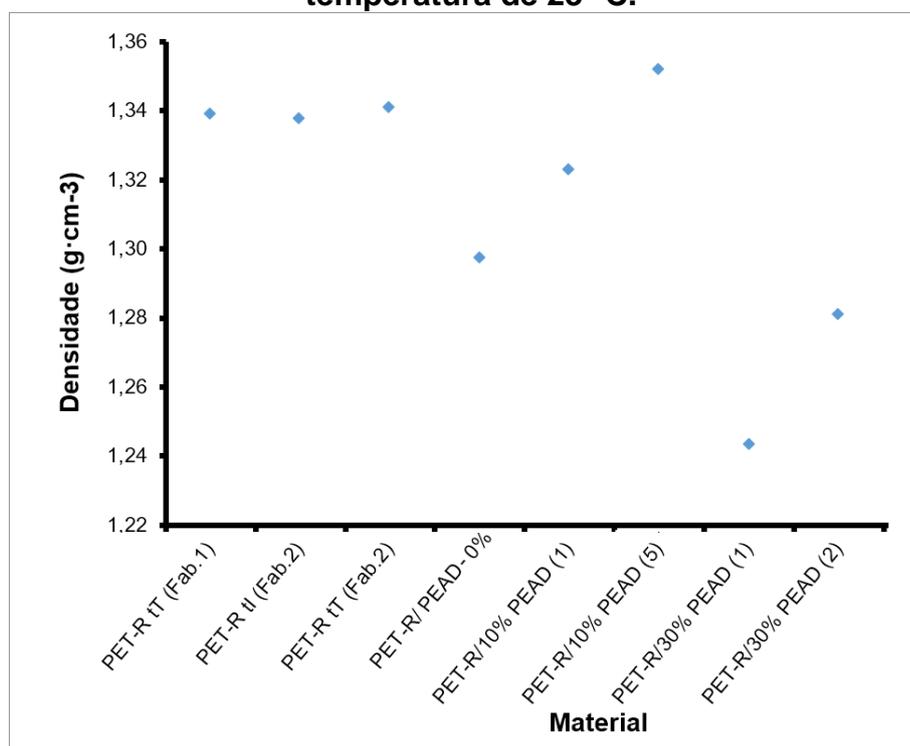
Material	Densidade Método do empuxo (kg·m ⁻³)
PET-R/tT1	1339
PET-R/tT2	1338
PET-R/tI2	1341
PET-R/PEAD-0%	1297
PET-R/PEAD-10% (1)	1323
PET-R/PEAD-10% (5)	1352
PET-R/PEAD-30% (1)	1243
PET-R/PEAD-30% (2)	1281

Nota: (n) número da amostra
 PET-R/PEAD-0% - Amostra de PET reciclado sem adição de PEAD
 PET-R/PEAD-10% - Amostra de PET reciclado com 10 % de adição de PEAD em massa
 PET-R/PEAD-30%- Amostra de PET reciclado com 30 % de adição de PEAD em massa
 PET-R/tI – Amostra de PET reciclado retirada de telha translúcida injetada
 PET-R/tT – Amostra de PET reciclado retirada de telha translúcida termoformada

Fonte: Autor (2018)

Somente para as blendas de PET-R/PEAD os resultados são apresentados individualmente para verificar a reprodutibilidade do processo de conformação e para efeitos de comparação. O maior desvio padrão obtido foi igual a 1 %, inferior a máxima incerteza expandida de medição da densidade iguala 3 %, para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 % (k=2).

Figura 17 - Valores médios de densidade obtidos pelo método do empuxo à temperatura de 23 °C.



Fonte: Autor (2018)

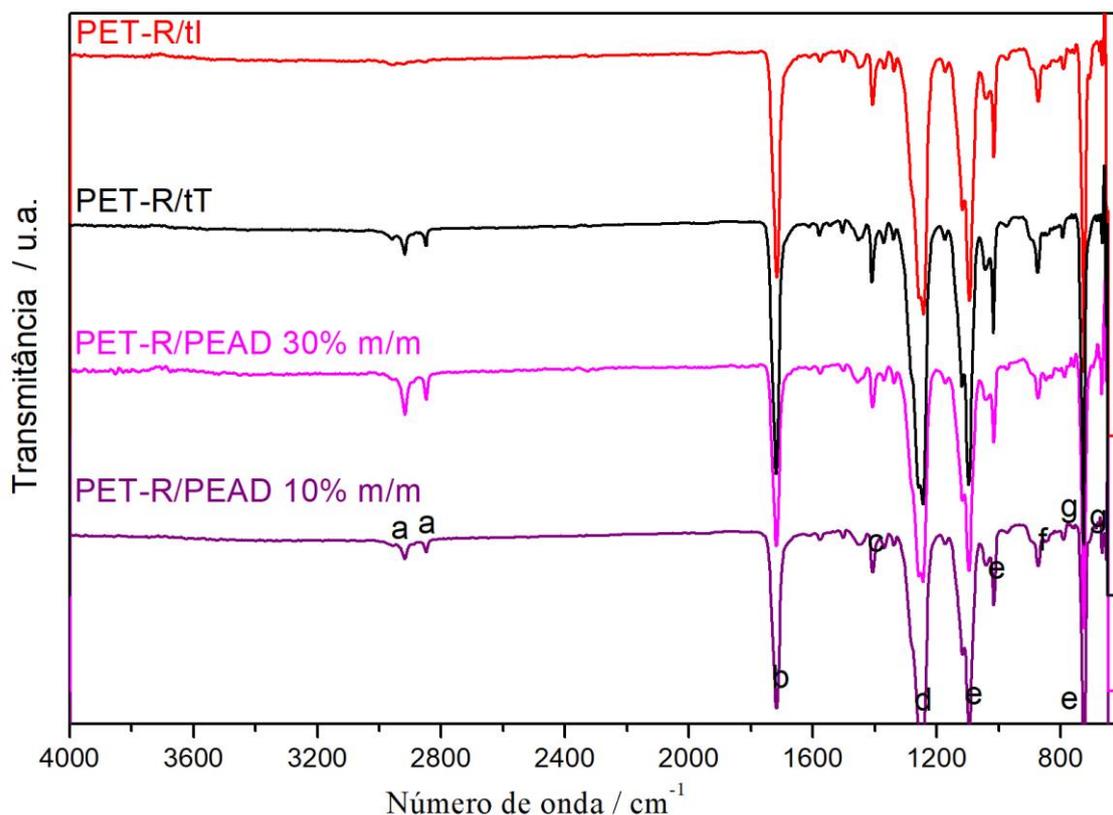
Verifica-se uma diminuição no valor da amostra de PET-R quando comparado com o valor de uma amostra de PET virgem $1340 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $1390 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (DEAN, 1999). O valor da densidade para as blends PET-R/PEAD-10% variou de $1323 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $1352 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e de $1243 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $1281 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para as blends de PET-R/PEAD-30%, sendo a diferença entre as amostras de mesma composição igual a 2 % e 3 % com relação à de menor valor, respectivamente. Este resultado indica uma heterogeneidade na mistura polimérica devido principalmente as dificuldades no processo de conformação das blends. Como pode ser observado, os maiores valores obtidos são das amostras de PET-R (telhas) comercialmente disponíveis que variaram de $1339 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $1341 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e da amostra de PET-R/PEAD-10% (5).

6.2.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Os espectros de infravermelho obtidos na região espectral de 4000 a 650 cm^{-1} são mostrados na figura 18, 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 18 - Espectros de FTIR para amostras de polímeros e blendas a base de PET



Fonte: Autor (2017)

Essa assinatura comprova a composição química dos polímeros e suas modificações, absorções de grupamentos alifáticos (C-H), recorrentes em PEAD nas blendas PET-R/PEAD. Para os análises de PET-R, verificou-se a absorção recorrentes em espectros de IR para amostras puras de PET. Nota-se as bandas de absorção em 1780-1650 cm⁻¹, e em 920-820 cm⁻¹, bem como, o pico em 1235 cm⁻¹, são característicos do grupamento carbonila (-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 18. As absorções indicadas em “a” 2.924 cm⁻¹ e 2.852 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 18, e os números de ondas das referidas absorções são $1090 - 1016\text{cm}^{-1}$ e 725 cm^{-1} (PASZKIEWICZ, 2017); (CHEN, 2012); (LOPEZ 2004).

Tabela 4 - Caracterização das bandas de absorção das amostras de PET-R e das blendas de PET-R/PEAD

Código	Número de onda (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 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	1235	Estiramento da ligação $-\text{C}(\text{O})-\text{O}$ 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 $-\text{O}-\text{C}-(\text{CH}_2)_2-$.
g	790-720	Deformação angular do grupamento C-H da etila do PEAD (essa absorção está presente somente nas blendas de PET-R/PEAD).

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

No que tange a inclusão de PEAD na obtenção de blendas de PET-R/PEAD, verifica-se a absorção nas regiões de IR das ligações nas C-H de alifáticos, a saber: “a” (2924 cm^{-1} e 2852 cm^{-1}); “d” (1090 cm^{-1} – 1016 cm^{-1} e 725 cm^{-1}) e “g” (790 cm^{-1} e 720 cm^{-1}). Para as blendas de PET-R/PEAD, há um aumento das intensidades relativas das absorções indicadas na região espectral marcado pela letra “a”. As absorções na região indicada pelo marcador “d” conservou-se inalterada mostrando que essa assinatura é própria do PET, e por fim a confirmação da inclusão de PEAD nas amostras de PET-R/PEAD, obtendo-se blenda marcadas na posição espectral indicada pela letra “g”, que recorrente de grupamentos metila de estruturas alifáticas, que por sua vez marca os seguimentos moleculares à base PEAD (Paszkiewicz, 2017; Chen, 2012; Lopez, 2004).

6.2.3 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 E FIGURA 19).

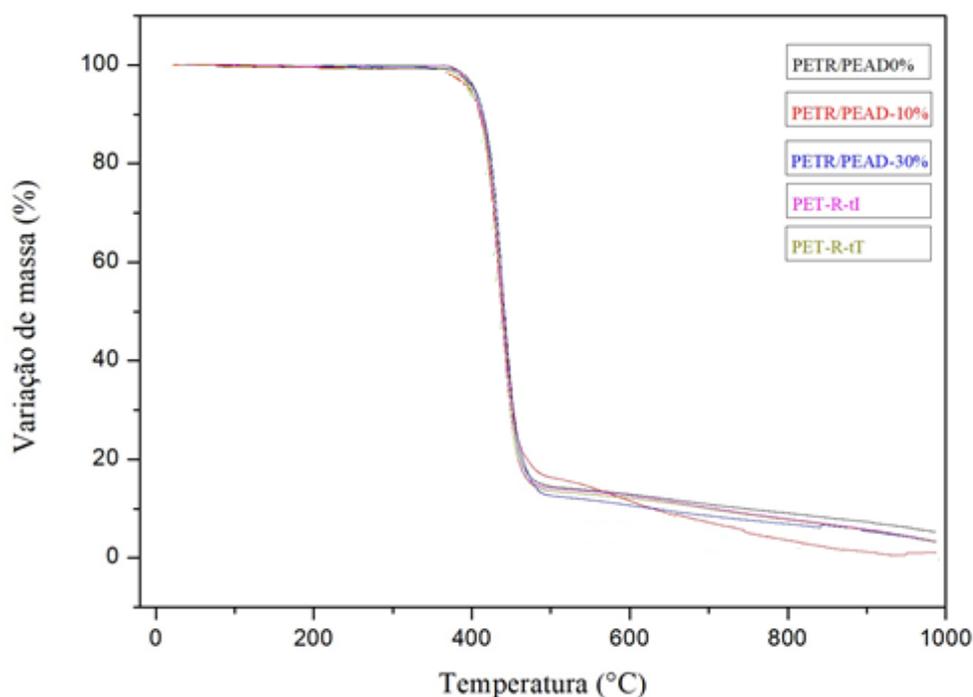
Tabela 5 - Resultados das análises térmicas.

Amostras	Evento Térmico (°C)	Varição de massa (%)	Resíduo em, 600°C (%)	T _g (°C)
PET-R/tl	435,4	85,7	9,4	67,1
PET-R/tT	73,1	0,4	12,1	68,8
	436,8	85,7	-	
PET-R/PEAD-0%	439,9	85,2	13,0	71,9
PET-R/PEAD-10%	437,6	83,0	11,6	75,0
PET-R/PEAD-30%	439,2	87,1	10,7	75,0

Fonte: Autor (2017).

Uma amostra mostrou um perfil de degradação térmica diferente, PET-R/tT, mostrando dois picos de decomposição, um deles em baixa temperatura entre 70 °C e 80 °C, com redução da massa em menos de 1 %.

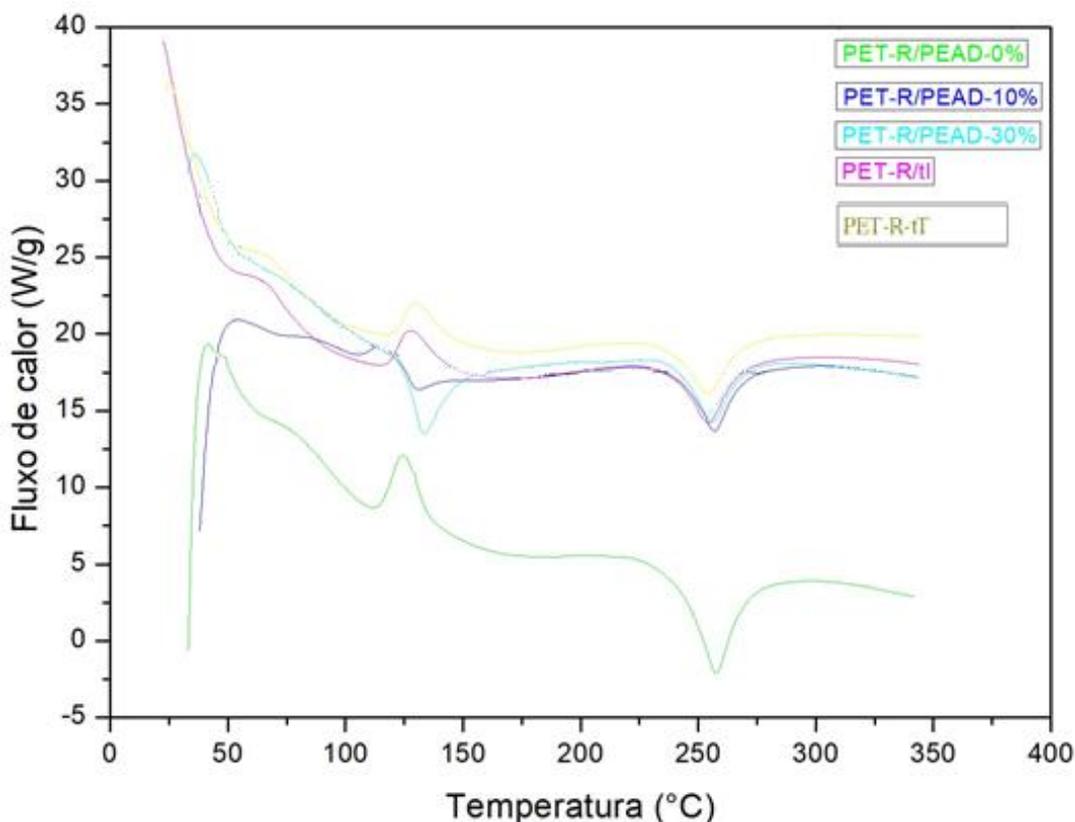
Figura 19 - Curvas da análise termogravimétrica das amostras de polímeros e blends a base de PET



Fonte: Autor (2017).

O segundo estágio de decomposição ocorreu em temperaturas entre 430 °C e 435 °C com redução significativa da massa em 85 % para a amostra PET-R/Ti. As demais amostras mostraram um evento de decomposição em temperaturas na faixa de 434,5 °C até 439, 9°C com redução na massa de 83 % até 94,6 %. Em análise geral as amostras comerciais e processadas mostraram-se estáveis termicamente, com perda de massa próximo as temperaturas de decomposição do material. Segundo os autores Demirel, Yaras, Elçiçek (2011), o PET apresenta T_g entre 67 ° C e 81 °C, este intervalo está correlacionado ao estado cristalino do polímero, polímeros amorfos apresentam T_g em 67 °C e PET com auto grau de cristalinidade revelam T_g em 81°C.As amostras caracterizadas por DSC simultânea, vide tabela 5 e figura 20, 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.

Figura 20 - Curvas da análise de calorimetria diferencial exploratória das amostras de polímeros e blendas a base de PET



Fonte: Autor (2017).

Uma análise sobre as blendas produzidas mostrou que a cristalinidade atingida foi superior as das telhas comerciais produzidas com PET-R. Os resultados demonstram que as blendas PET-R/PEAD apresentam ser estáveis em situações que imprimam carregamentos mecânicos sob aplicação de calor. Os resultados também mostraram concordância com os valores reportados na literatura (DEMIREL; ALI; ELÇIÇEK, 2011).

6.2.4 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 os materiais comerciais e reciclados à base de PET e suas blendas, aplicados na confecção de telhas leves com características termoacústicas.

Foi conduzida uma avaliação mecânica, visando delinear se os polímeros e suas blendas, derivados do PET, atendem 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 e processadas, avaliadas no escopo desse trabalho.

SISTEMA	E_b (MPa) (7 cps)	LRT (MPa) (7 cps)	LRR (MPa) (5 cps)	Deformação (%) (6 cps)
PET-R/PEAD-0%	1443,84 ±144,40	15,49 ±1,74	15,10 ±1,29	2,60 ±0,14
PET-R/PEAD-10%	1628,89±130,36	17,64 ±3,14	16,62 ±3,64	2,43 ±0,07
PET-R/PEAD-30%	1410,43 ±179,45	18,22 ±2,82	16,12 ±1,64	2,38 ±0,34
PET-R-tI2	1892,31 ± 83,53	39,77 ±6,15	21,52 ±8,27	4,85 ±0,70
PET-R-tT2	1642,57 ± 78,82	31,15 ±3,06	13,75 ±8,58	3,87 ±0,37

E_b = 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.

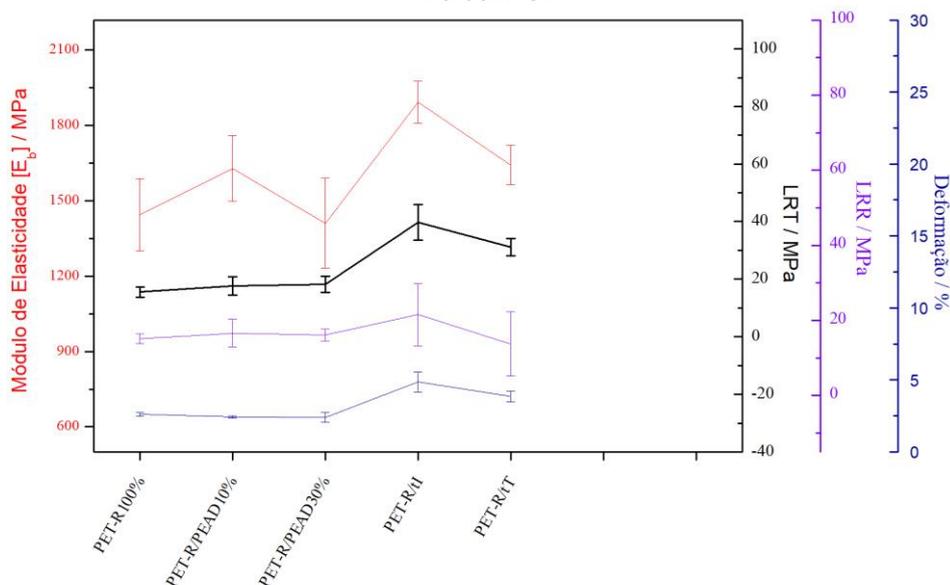
Nota:

- 1) Valores de E_b obtidos em ensaio de tração a 5 mm/min; LRT, LRR e deformação na ruptura a 50 mm/min, conforme ASTM D638-14.
- 2) 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 21 A figura retrata o comportamento médio com seus respectivos desvios padrões.

Figura 21 - Gráfico comparativo dos resultados mecânicos das amostras deste trabalho.



Fonte: Autor (2018).

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), bem como aos ciclos de processamento das misturas dos polímeros na formação das blendas e sua conformação final em corpos de prova. Neste sentido, foi conduzida uma avaliação para indicar os comportamentos mecânicos das amostras e seus resultados qualitativos e semiquantitativos.

As amostras retiradas das telhas comerciais de PET-R (injetadas e termoformadas) mostraram-se com maior módulo de E_b que os materiais processados nesse trabalho (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD). Ainda visto que o processo de conformação influencia o E_b , a telha injetada responde com ganho de 13 % com relação ao mesmo produto à base de PET-R obtido por termoformagem, vide figura 21. Uma comparação com outros trabalhos reportados na literatura, mostram que os valores esperados dos módulos de elasticidades para PET-R, obtidos por reciclagem de garrafas estão no intervalo de 2 GPa a 3 GPa (MANCINI, BEZERRA, ZANIN, 1998; MONDADORI, 2008). Considerando outras fontes de PET-R originados nas indústrias têxteis o valor para E_b está contido na faixa encontrada de PET-R de garrafas, contudo os valores estão próximos de 3 GPa (OROMIEHIE, MANIZATEH, 2004; BIMESTRA, 2010; MOURA *et al*, 2011). Essas comparações mostraram que é variável os valores dos E_b do PET-R; muito dependente do processamento polimérico; do número de ciclos de reprocessamento (MANCINI, BEZERRA, ZANIN, 1998), do grau de cristalinidade atingida em cada ciclo de extrusão e/ou injeção (MONDADORI, 2008).

Ainda que as amostras das blendas de PET-R/PEAD-30% tenham registrado os piores resultados entre os materiais avaliados, vale destacar que a inclusão de 10 % em massa de PEAD revelou aumentos no E_b . Os ganhos relativos da blenda de PET-R/PEAD-10% foram de 13 % e 16 % em relação ao módulo elástico do PET-R puro, e a blendas de PET-R/PEAD-30%, respectivamente. Esses resultados mostram que inclusão de 10 % m/m de PEAD produziu ganhos moderados no E_b do material, superando os valores dos materiais obtidos com PET-R/PEAD-0% e PET-R/PEAD-30% processados nessa avaliação. Contudo, a adição de grandes quantidades (30% em massa) saturou a mistura, indicando uma redução no módulo elástico da blenda PET-R/PEAD-30%. Desta forma, é possível repetir um arranjo de experimento para

otimizar essa adição de PEAD de forma a maximizar os ganhos mecânicos no módulo elástico, que é uma importante propriedade de projeto.

No tocante às comparações entre os polímeros PET-R, oriundos das garrafas de refrigerantes, bem como, suas blendas de PET-R/PEAD, com materiais à base de PET-R (de origem desconhecida) utilizados em fabricação de telhas, é pertinente, observar que a blenda de PET-R/PEAD-10% tem indicações mecânicas semelhantes ao PET-R utilizado na confecção das telhas termoformadas, com uma leve diminuição do E_b de 1 %. Para o mesmo sistema polimérico, mas aplicado ao processamento de telhas por injeção, a redução é mais significativa, atingindo 16 %. Assim, pode-se averiguar que a redução do E_b de telha PET-R injetada para o PET-R de garrafas injetado foi de 31 %.

Ganhos no LRT são contabilizados para as amostras de PET-R oriundas de garrafas e das blendas de PET-R/PEAD, quando comparados com amostras de telhas comerciais de PET-R processadas por termoformagem. As telhas comerciais de PET-R (injetadas e termoformadas) mostraram-se com maior limite de resistência à tração que todos os materiais ensaiados nesse trabalho (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD), demonstrando o potencial dos materiais reciclados para uso em sistemas que requerem desempenho mecânico. O LRT avaliado nos ensaios mecânicos em tração conforme norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014), indicou uma redução considerável nesta propriedade, quando comparados com trabalho de Moura *et al* (2011), que utilizou resíduos de PET da indústria têxtil, as amostras diferem das amostras utilizadas nesse trabalho que são oriundas de garrafas de bebidas carbonatadas. Moura *et al* (2011), mensurou o LRT de suas amostras em 44 MPa, para as amostras comerciais investigadas, reduções de 8,5 % para a telha de PET-R injetada. Para as amostras processadas os decréscimos são ainda maiores, 59 % (blenda de PET-R/PEAD-30%) até 65 % (PET-R de garrafas). Esses valores mostram como é significativo a influência dos processos de degradação nas respostas dos polímeros. Principalmente a reciclagem contínua e sucessivas, que materiais à base de PET podem sofrer.

Os materiais processados neste trabalho (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD) apresentaram limite de resistência à tração inferior aos materiais das telhas de PET-R. No entanto, registrou-se ganhos de 14 % com a adição de 10 % de PEAD ao PET-R (garrafas) e 18 % na adição de 30 % de PEAD ao PET-R, tendo

como referência a amostra PET-R/PEAD-0%. Para as análises no LRT, entre as telhas comerciais e os materiais reciclados produzidos nesse trabalho, é significativa a diferença encontrada. No tocante às comparações do PET-R garrafas e blendas de PET-R/PEAD, comparados com materiais de PET-R utilizados em fabricação de telhas, observa-se que as condições de processamento aplicadas neste trabalho foram diferentes, às utilizadas nas amostras comerciais de PET-R das telhas injetadas e termoformadas, resultando em reduções de 201 % quando se compara as amostras de telhas termoformadas com o PET-R, e 257 % para as amostras de telhas injetadas. Estabelecendo essa mesma comparação do LRT das telhas de PET-R injetadas e termoformadas, contra o LRT das amostras de PET-R/PEAD-10%, as diferenças diminuem para 226 % e 177 % respectivamente. Mostrando que adição de PEAD melhorou o rendimento na força máxima em tração. Com base nestes resultados, ilustra-se a necessidade de melhorar o processamento de injeção das blendas para se alcançar melhores índices mecânicos, compatíveis com os produtos já disponíveis no mercado.

Com relação às telhas comerciais de PET-R, somente as conformadas por injeção mostraram-se com maior LRR que os materiais processados nesse trabalho (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD). Já as telhas processadas por termoformagem tiveram o pior desempenho entre todas as amostras ensaiadas deste trabalho. Esclarecendo que o processo de termoformagem acarreta em desvantagens consideráveis de desempenho mecânico quando se comparado com o processo de injeção (PETTERSEN, 2004).

A adição de 10% em massa de PEAD às blendas de PET-R provocou um acréscimo de 10% no valor de limite de resistência à ruptura, contudo, quando da adição de 30%, esse acréscimo resultou em somente 7%, fragilizando o comportamento do polímero após o limite de resistência à tração. Valores reportados nos trabalhos Mondadori (2008) e Oromiehie e Mamizadeh (2004), revelaram LRR para PET-R reciclados de garrafas em um intervalo de 25 MPa até 60 MPa. Os valores determinados por essa avaliação foram próximos do limite mínimo do trabalho Mondadori (2008), que indicou limites de rupturas entre 25 MPa a 45 MPa. Sumarizando uma comparação entre os melhores resultados avaliados no trabalho em tela contra os limites mínimos relatados de 25 MPa (MONDADORI, 2008), verifica-

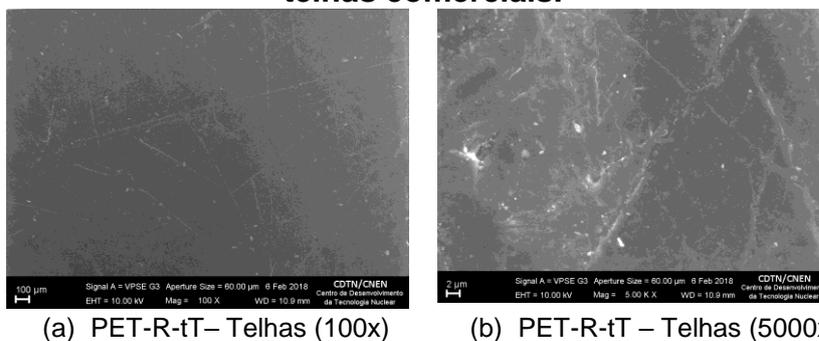
se que mesmo os produtos comerciais apresentaram reduções de 14 % para telha injetada (PET-R) e 34 % para a blenda PET-R/10%PEAD-10%.

As telhas comerciais de PET-R (injetadas e termoformadas) mostraram-se com maior deformação que todos os materiais analisados nesse trabalho (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD), com valor de 187 % maior quando se comparado com as blendas de PET-R. Comparando os processos de termoformagem e de injeção das telhas comerciais, verifica-se que as telhas injetadas possuem maior deformação, 25% quando se comparada às amostras conformadas por termoformagem. A adição de PEAD às blendas de PET-R provocou um decréscimo nos valores de deformação, 7% quando da adição de 10% em massa de PEAD e 9% quando da adição de 30% em massa de PEAD. Esclarecendo que tal adição provoca um comportamento mais frágil do polímero. Uma investigação na literatura demonstrou que os trabalhos de Moura *et al* (2011) revelaram que o processamento de PET-R apresentou 2 % de rendimento em deformação, resultado este menor que todos os materiais testados neste trabalho. Contudo dentro da mesma ordem de grandeza encontrada nos ensaios mecânicos realizados nesta avaliação, a saber: amostras comerciais de telhas PET-R 4 % e 5 %; amostras processadas PET-R e blendas de PET-R/PEAD 2 % até 3 % (vide TABELA 6).

6.3 Caracterização morfológica dos materiais.

As imagens digitais obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de PET-R provenientes de telhas comerciais são mostradas na figura 22.

Figura 22 - Imagens digitais obtidas por MEV das amostras de PET-R das telhas comerciais.



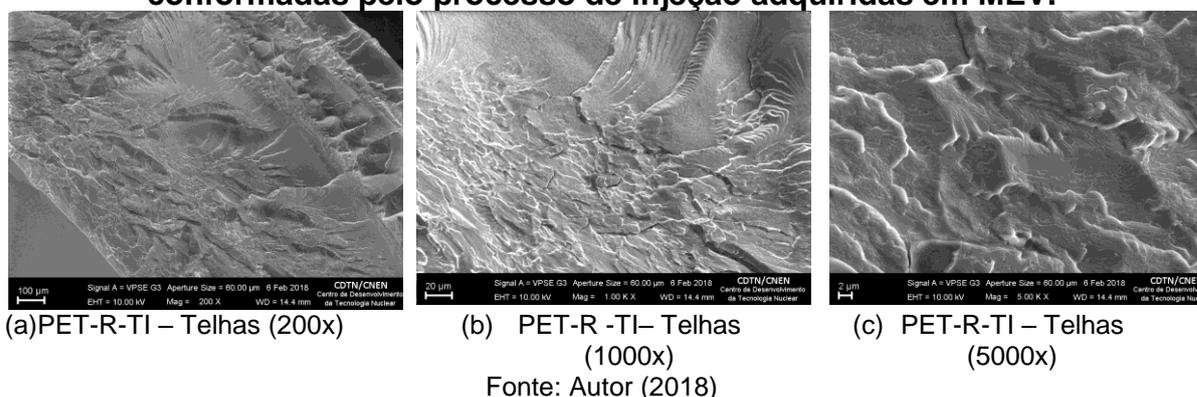
(a) PET-R-tT– Telhas (100x)

(b) PET-R-tT – Telhas (5000x)

Fonte: Autor (2018).

As amostras de PET-R utilizados na fabricação das telhas à base de PET revelaram não haver adições de outros polímeros ou aditivos que formassem blendas ou fases segregadas nas matrizes poliméricas, seus aspectos morfológicos superficiais são homogêneos, com bom acabamento superficial, corroborando com as caracterizações apresentadas no FTIR (FIGURA 18). As imagens digitais das amostras de PET-R (FIGURA 23 (a) e (b)) das telhas comerciais revelam superfícies rugosas com acabamentos superficiais dependente da técnica de processamento, se por injeção ou por termoformagem. As amostras de telhas obtidas pelo processo de termoformagem apresentam superfícies mais rugosas quando comparadas com as amostras retiradas das telhas conformadas por injeção.

Figura 23 - Imagens digitais das amostras de PET-R das telhas comerciais conformadas pelo processo de injeção adquiridas em MEV.

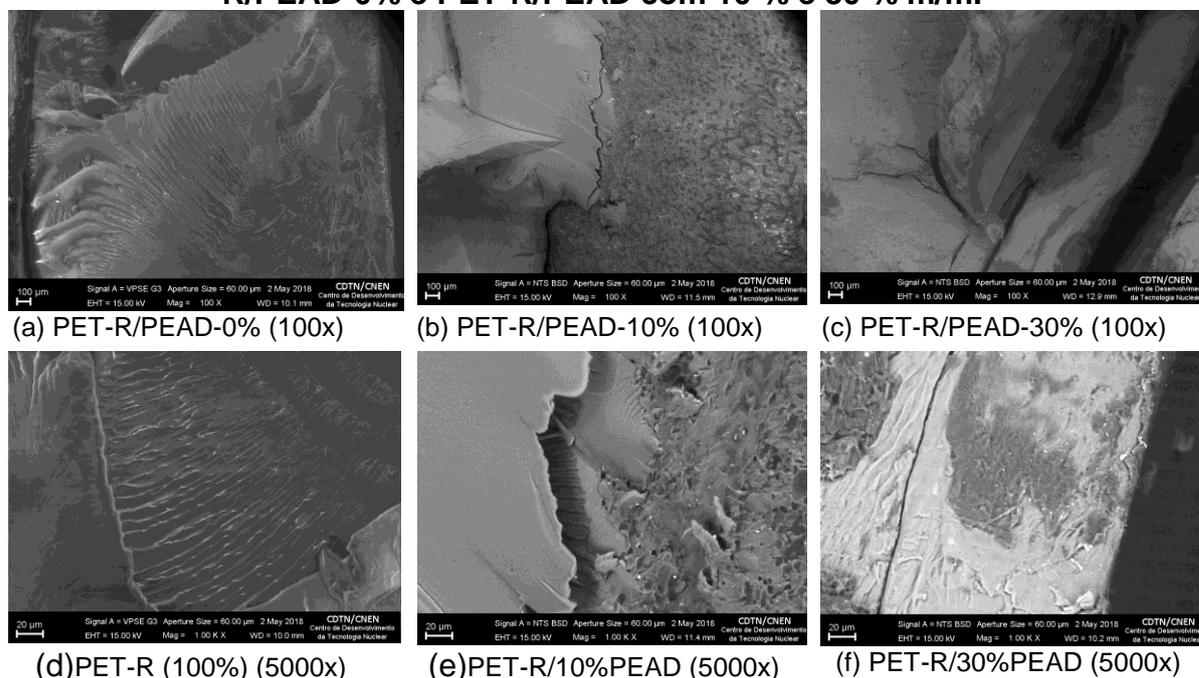


A figura 24 apresenta as imagens digitais adquiridas por MEV das amostras na região da fratura criogênica que pronuncia o comportamento mecânico sensível a fratura frágil. Os aspectos da fratura mostram uma clivagem unidirecional irradiada a partir de um ponto nucleador de tensão. Esse comportamento reportado é esperado para uma fratura criogênica, em decorrência da baixa dinâmica molecular durante o processo de fratura, em virtude da redução drástica da temperatura, momentos antes da ruptura dos corpos de prova para o exame de microscopia por MEV. Para as amostras PET-R e blendas de PET-R/PEAD processadas nesse trabalho tiveram suas morfologias das superfícies da fratura investigadas, sob os aspectos, do contraste de fases para as blendas de PET-R/PEAD com 10% e 30% em massa de PEAD.

As amostras de PET-R oriundas de garrafas processadas por injeção revelaram uma fratura similar as amostras de telhas à base de PET-R comerciais, uma fratura dúctil uniforme e irradiada a partir de um ponto que nucleou tensão durante o processo

de deformação do corpo de prova. Os aspectos morfológicos se conservaram homogêneo indicando a presença somente do PET (FIGURA 24 (a) e (d)). Para as amostras das blendas de PET-R/PEAD, foram identificadas mudanças significativas (FIGURA 24 (b), (c), (e) e (f)), as imagens revelaram contraste de fases segregadas, podendo atribuir a fase mais lisa ao PET-R e a fase mais rugosa ao PEAD, essas constatações confirmam a formação de blenda física entre os polímeros PET-R e PEAD. Os aspectos das fraturas das blendas PET-R/PEAD com 10% e 30% de adição em massa de PEAD revelaram um comportamento mais frágil, quando comparados as amostras comerciais de PET-R de telhas, essas indicações são confirmadas pelas análises mecânicas conduzidas anteriormente, que confirmaram a perdas significativas nas seguintes propriedades mecânicas E_b , LRT e LRR (TABELA 6). Esse mesmo comportamento pode ser constatado para amostra de PET-R de garrafas conformadas por injeção, contudo, essa amostra demonstrou perdas nos seus índices mecânicos superiores aos das blendas PET-R/PEAD, evidenciando que adição PEAD melhorou o processamento de PET-R oriundos de garrafas de refrigerantes.

Figura 24 - Micrografias por MEV da superfície da fratura das blendas de PET-R/PEAD-0% e PET-R/PEAD com 10 % e 30 % m/m.



Fonte: Autor (2018).

6.4 Caracterização das propriedades termofísicas.

A tabela 7 apresenta os valores mensurados para o calor específico à temperatura ambiente, e os métodos aplicados na obtenção dos valores, para fins de comparação. Para os resultados obtidos experimentalmente por calorimetria exploratória diferencial, a máxima incerteza expandida para uma probabilidade de aproximadamente 95% ($k=2$) foi estimada em 8%.

Em geral, verifica-se que houve uma diminuição no valor do calor específico das amostras de PET-R provenientes de telhas comercialmente disponíveis e da blenda de PET-R quando comparado com o valor típico do PET virgem igual $1130 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (DEAN, 1999), com exceção apenas da amostra de telha comercial PET-R/tT (fabricante 1) em que o valor é ligeiramente maior ($1187 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Como esperado, também houve uma diminuição nos valores das blendas de PET-R/PEAD quando comparamos com valores típicos para o PEAD $1926 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $2300 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (DEAN, 1999). Observa-se, também, que houve um aumento no valor do calor específico para as blendas de PET-R/PEAD com adição do PEAD quando comparamos com o valor da blenda de PET-R.

Tabela 7 - Valores típicos do calor específico de PET, PEAD e das amostras de PET-R ensaiadas.

MATERIAL	CALOR ESPECÍFICO ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	MÉTODO
PET	1130	Dean, 1999
PEAD	1926 a 2300	Dean, 1999
PET-R tT (1)	1187	Experimental
PET-R tI (2)	1071	Experimental
PET-R tT (2)	1092	Experimental
PET-R/PEAD-0%	955	Experimental
PET-R/PEAD-10% (1)	1008	Regra da mistura (eq.1)
PET-R/PEAD-10% (5)	1007	Regra da mistura (eq.1)
PET-R/PEAD-30% (1)	1207	Regra da mistura (eq.1)
PET-R/PEAD-30% (2)	1207	Regra da mistura (eq.1)

Nota: (n) número da amostra

Fonte: Autor (2018)

É importante observar que os valores obtidos para as blendas de PET-R ($955 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e PET-R/PEAD ($1007 \text{ a } 1207 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e para as amostras de telhas de

PET-R (1071 a 1187) $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ sugerem uma similaridade entre os materiais a base de PET.

A tabela 8 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 $0,10 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,53 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ e da condutividade térmica variou de $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $0,77 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tabela 8 - 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 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
PET-R/tT (1)	8	0,21	0,34
PET-R/tI (2)	8	0,10	0,14
PET-R/tT (2)	6	0,13	0,19
PET-R/PEAD-0%	3	0,29	0,34
PET-R/PEAD-10% (1)	1	0,53	0,71
PET-R/PEAD-10% (5)	1	0,48	0,66
PET-R/PEAD-30% (1)	1	0,52	0,77
PET-R/PEAD30% (2)	1	0,46	0,71

Fonte: Autor (2018)

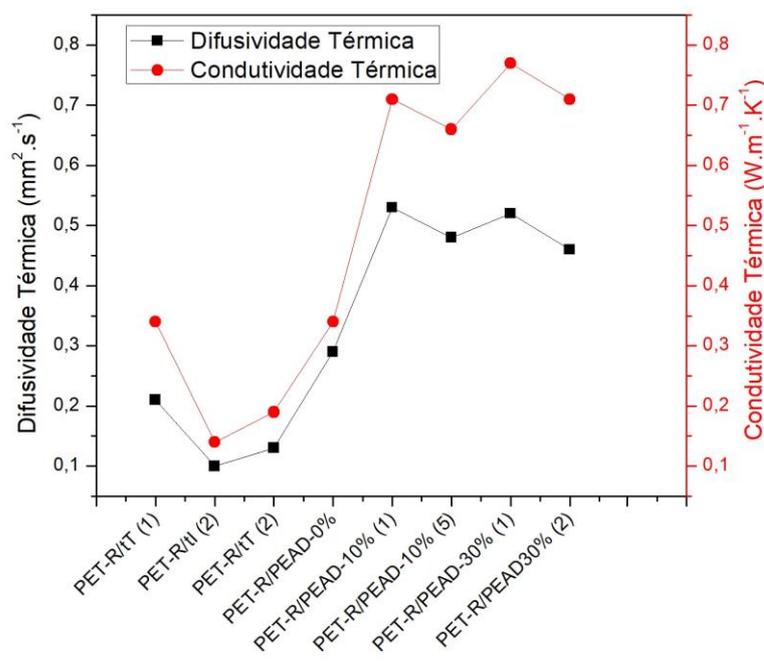
O menor valor encontrado para a difusividade térmica e condutividade térmica foi da amostra de PET-R proveniente da telha comercial obtida pelo processo de injeção igual a, respectivamente, $0,10 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Verifica-se também que há uma diferença entre os valores obtidos para as telhas de PET-R disponíveis comercialmente de fabricantes diferentes. Os resultados obtidos para o fabricante 2 é sistematicamente menor do que os obtidos para o fabricante 1, independentemente do tipo processo de fabricação se por injeção ou por termoformagem, para ambas propriedades (difusividade térmica e condutividade térmica). A provável explicação para esta diferença se deve ao uso de aditivos diferentes utilizados pelos fabricantes, mais do que pelo processo de fabricação (termoformagem ou injeção), quando comparamos com os resultados obtidos para o fabricante 2. Segundo Machado M. L. C. *et al*, 2009, o uso de aditivos plastificantes afeta o índice de cristalização dos polímeros, aumentando as áreas amorfas do

polímero e diminuindo por consequência, os valores de condutividade térmica e difusividade térmica das amostras.

Verifica-se da figura 25 que o valor da condutividade térmica das blendas PET-R/PEAD obtidas é superior aos valores típicos para PEAD $0,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $0,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (DEAN, 1999), assim como para o PET virgem ($0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (DEAN, 1999). Segundo Torres, Robin e Boutevin (2001) e Lei *et al* (2009) a adição de PEAD ao PET aumenta a cristalinidade do material e por consequência um aumento também nos valores de condutividade térmica e difusividade térmica das blendas com estes polímeros.

Figura 25 - Difusividade térmica e condutividade térmica das amostras ensaiadas à temperatura de 23°C.



Fonte: Autor (2018).

Observa-se também, que há um aumento expressivo no valor da difusividade térmica e da condutividade térmica quando comparados com o resultado da blenda de PET-R. Contudo, não é possível observar uma diferença significativa na difusividade térmica e condutividade térmica entre as blendas com a adição de 10% e 30% em massa de PEAD. Esse resultado pode ser explicado pela dificuldade no controle da temperatura no processo de termoformagem utilizado para a conformação das blendas de PET/PEAD e a falta de fôrmas específicas para moldagem dos corpos

de prova para os ensaios térmicos possivelmente afetou a mistura, gerando amostras anisotrópicas e a necessidade de realização de medidas adicionais. Este comportamento corrobora com o relatado por Santos *et al* (2003), em que cita que a condutividade térmica de um material plástico sólido depende de sua história térmica prévia e, portanto, dos parâmetros do processamento dos polímeros sendo causadores de grandes influências na condutividade térmica.

6.5 Avaliação do desempenho térmico da cobertura – Transmitância térmica

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos da transmitância térmica das amostras investigadas neste trabalho 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 1). Os resultados da avaliação do desempenho térmico das amostras investigadas pelo método simplificado foram comparados os valores estabelecidos como referência.

Tabela 9 - Comparativo da transmitância térmica

Material	Espessura (m)	Resistência térmica total ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)	Transmitância térmica ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Fibrocimento ABNT NBR 15220-2:2005	0,008	0,90	1,11
PET-R tT (Fabricante 1)	0,003	0,91	1,10
PET-R tI (Fabricante 2)	0,003	0,94	1,11
PET-R tT (Fabricante 2)	0,003	0,93	1,12
PET-R/PEAD-0%	0,003	0,90	1,12
PET-R/10% PEAD (1)	0,003	0,90	1,12
PET-R/10% PEAD (5)	0,003	0,90	1,12
PET-R/30% PEAD (1)	0,004	0,90	1,12
PET-R/30% PEAD (2)	0,003	0,90	1,12

Fonte: Autor (2018)

Como pode ser observado na tabela 9, praticamente não houve alteração no valor da transmitância térmica total para os diferentes tipos de materiais, variando de $1,10 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a $1,12 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, quando comparado com o valor da referência ($1,11 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). 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 ($R_{ar} = 0,61 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$) 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 PET reciclado 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 10 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 PET reciclado são materiais potenciais que podem ser utilizadas em coberturas de edificações.

Tabela 10 - 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
PET-R/tT (1)	I	I	M	I	I
PET-R/tI (2)	I	I	M	I	I
PET-R/tT (2)	I	I	M	I	I
PET-R/PEAD-0%	I	I	M	I	I
PET-R/PEAD-10% (1)	I	I	M	I	I
PET-R/PEAD-10% (5)	I	I	M	I	I
PET-R/PEAD-30% (1)	I	I	M	I	I
PET-R/PEAD-30% (2)	I	I	M	I	I

Legendas: M – Mínimo; I – Intermediário

Fonte: Autor (2018)

Analisando a tabela 10, 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 (ANEXO A), 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.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação em tela teve como proposta investigar 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 como as lâs 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 PET, por mostrar propriedades mecânicas e térmicas adequadas as soluções construtivas de coberturas. Por ser de grande utilização em outros seguimentos (embalagens, têxteis, automotivos, etc.) esse polímero revela disponibilidades mercadológicas, e também um negócio rentável no que tange a utilização de PET pós-consumo. 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).

Foram avaliadas amostras de produtos à base de PET com disponibilidade de mercado. Nesta condição foram adquiridas telhas de PET-R, onde foram avaliadas em ensaios físicos, químicos, físico-químicos, termofísicos, mecânicos e micro e nanoestrutural. Em comparação foram processados por injeção e termoformagem

amostras de PET-R e blendas de PET-R com adição de PEAD em 10% e 30 % m/m. Esse material também foi avaliado sob o mesmo arsenal analítico das amostras comerciais, de forma a resultar uma ampla comparação dos materiais.

As caracterizações químicas (FTIR), físico-químicas (TG/DTG-DSC), revelaram a composição dos materiais comerciais e reciclados indicando principalmente que os materiais trabalhados eram polietileno tereftalato, não havendo misturas de outros polímeros, aditivos ou contaminantes, por se tratar de materiais reciclados. 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. As blendas mostraram estrutura mais cristalina com Tg em 75°C.

Em geral, as amostras comerciais utilizadas neste trabalho (PET-R-telhas) alcançaram índices mecânicos superiores quando comparadas com a amostras das blendas à base de PET-R com adições de 0%, 10% e 30% m/m de PEAD, conformadas no laboratório. As amostras extraídas de telhas translúcidas de PET-R, que experimentou um processamento polimérico já bem consolidado, atingiu os melhores resultados mecânicos, essas amostras mostram-se melhores em todas as propriedades mecânicas avaliadas (E_b , LRT, LRR e % de deformação), quando comparadas as amostras de PET-R obtidos de garrafas, e suas blendas com PEAD 10% e 30% em massa. Essa constatação corrobora com o desenvolvimento de produtos com PET-R, principalmente em setores como os da construção civil, que apresentam alta demandas de consumo de materiais.

Os resultados dos ensaios mecânicos das amostras das telhas comerciais de PET-R mostraram o potencial do uso da matéria prima reciclada, com desempenho superior às blendas conformadas. Resultado que ilustra, também, as vantagens do uso da conformação do PET-R por injeção, com valores médios superiores de resistência mecânica em todas as propriedades analisadas, quando se comparado às amostras de PET-R termoformadas. A adição de 10% e 30% em massa de PEAD nas blendas de PET-R provocou aumento de desempenho mecânico, especialmente na adição de 10%, resultando em ganhos consideráveis em todas as propriedades mensuradas. Já a adição de 30% de PEAD ao PET-R se mostrou demasiada,

saturando a mistura e prejudicando o módulo de elasticidade – fragilizando o material e não agregando desempenho consideráveis nas demais propriedades mecânicas.

As imagens digitais de MEV, mostraram que as amostras de PET têm comportamento similares, são homogêneas e apresentam fraturas com comportamento dúcteis, irradiadas uniformemente de um ponto concentrador de tensão, esse comportamento acometeu nas amostras de PET-R provenientes de telhas, mostrando que os ciclos de reprocessamento não alteram muito os arranjos moleculares, e as micro e nanoestruturas dos polímeros, essas constatações concordam com os resultados mecânicos. Para materiais à base de PET-R com adição de PEAD, houve segregação de fases relevadas por imagens de contraste de fases. A superfícies de fraturas das blendas PET-R/PEAD mostraram uma fratura com aspectos frágeis com propagação uniforme. Esse comportamento revelado pelas imagens de MEV, corroboram com os resultados e as análises mecânicas.

A incorporação de 10% e 30% em massa de PEAD na matriz de PET-R implicou em um aumento na condutividade térmica quando comparado com a blenda de PET-R/PEAD-0%. Os resultados também indicaram que não houve uma diferença significativa em termos de condutividade térmica entre as blendas de PET-R/PEAD. Por outro lado, o aumento na condutividade termina não implicou em um aumento na transmitância térmica, considerando a tipologia de referência adotada. Neste exemplo específico, o principal fator que afetou a resistência térmica total e, como consequência, a transmitância térmica é à resistência da camada ar entre a telha e forro que é função da espessura da camada de ar, da emissividade superfície e da direção de fluxo de calor (horizontal, ascendente ou descendente).

Estes resultados confirmam que o PET-R 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, incluísse 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.

As técnicas de processamento utilizadas neste trabalho indicaram necessidades de otimização e adequação. Com o uso de processos de injeção e

termoformagem específicos para o PET, com sistemas a vácuo, atmosfera artificial de alimentação e controles avançados de temperatura de molde e resfriamento, que já são usadas nos produtos comerciais, pode-se potencializar os resultados experimentais e evoluir o conhecimento sobre a blenda proposta de PET-R/PEAD para o uso em coberturas termoacústicas em edificações.

8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Ampliar a investigação, e diversificar os métodos e técnicas de caracterização capazes de determinar o desempenho térmico considerando: a capacidade térmica, o atraso térmico, e o fator de calor solar das blindas de PET-R.

Desenvolver um protocolo de processamento do PET reciclado e as blindas com PEAD. Explorar novos polímeros para produção de blindas que apresente vantagens na produção de telhas de grandes formatos, leves e termoacústicas.

Aprofundar as investigações, realizando ensaios de conformação para prototipagem de telhas à base de PET-R. Conduzir os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas, acústicos e de desempenho térmico conforme ABNT NBR 14513:2008 (ABNT, 2008) e ABNT NBR 16373:2015 (ABNT, 2015).

Promover testes de transparência a luz natural através de ensaios espectrofotométricos para cálculo de transmitância de luz visível conforme norma D1003–13: (ASTM, 2013), com o intuito de promover o uso do material em coberturas translúcidas que gerem economia de energia para iluminação interna dos ambientes.

Aplicar os ensaios pertinentes a painéis acústicos de acordo com a norma ISO 354 (ISO, 2003), ao qual se realiza a medição do coeficiente de absorção em câmara reverberante para o cálculo de desempenho acústico do material.

REFERÊNCIAS

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET. **Resina Pet – História**. 2012. Disponível em <http://ww.abipet.org.br>. Acessado em 16/05/17.

_____. **Censo da Reciclagem do PET no Brasil. 10ª Edição**. 2016. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/indexAjax.html?method=baixarArquivo&id=548>. Acessado em 16/05/17.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Processos de transformação para materiais plásticos**. São Paulo/SP. 2014. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf. Acessado em 04/01/18.

_____. **Perfil 2015**. Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico. São Paulo/SP. 2016. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf. Acessado em 03/01/2018. AAQBAJ&lpg=PP1&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false. Acessado em 15/02/2018.

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://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/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.

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.

AU - ARQUITETURA E URBANISMO. **Coberturas Metálicas**. Edição 215. Editora Pini. Dez/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA - ABCEM – **Manual Técnico. Telhas de Aço**. Edição 1. Setembro. 2009.

_____. ABNT NBR 14513:2002. **Telhas de aço revestido de seção ondulada – Requisitos**. 2002.

_____. ABNT NBR 14514:2008. **Telhas de aço revestido de seção trapezoidal - Requisitos**. 2008.

_____. 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.

_____. **ABNT NBR 16373:2015 - Telhas e painéis termoacústico - Requisitos de desempenho, elaborada pelo Comitê Brasileiro de Siderurgia.** 2015.

Autodesk Inc. **Autocad 2018 - Student Version.** 111 McInnis Parkway San Rafael, Califórnia 94903. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/Autocad>>.

ÁVILA, A. F.; RODRIGUES, P. C. M.; SANTOS, D. B. & FARIA, A. C. A. - **A dual analysis for recycled particulate composites: Linking micro and macro mechanics.** Materials Characterization. Volume 50, Issues 4–5, June 2003, Pages 281-291. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580303001244?via%3Dihub>. Acessado em 11/05/2018.

AZEREDO Hélio Alves de. **O edifício e sua cobertura.** 2ª Edição. 182p. São Paulo, Edgard Blücher, 1997.

BARBOSA, R. V; BAUMHARDT Neto, R.; MAULER, R.S; GORGA, C.J.P; SCHNEIDER, C. G; SIMANKE. A.G. **Dynamic Mechanical Properties of Modified Poly (Ethylene-co-Vinyl Acetate).** Journal of Applied Polymer Science, v. 97, p. 1371-1376, 2005.

BASSO, Thalyta Mayara; NOGUEIRA, Carlos, E. C.; SILVA, Daniele, S. **Eficiência energética na construção civil no Brasil.** Acta Iguazu, Cascavel, v.4, n.1, p. 48-56, 2015. ISSN: 2316-4093

BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves, MILLER Kátia Broeto. **Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função.** Fórum Governamental de Responsabilidade Social. 2011. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/>. Acessado em: 20/05/18.

BRASKEM S.A. **Braskem Idealis500 Data Sheet.** 2014. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=m/8yTRitOZ4=&folhadados=true>. Acessado em 23/03/18.

BRITO, G. F; AGRAWAL, P; ARAÚJO, E. M; MÉLO, T. J. A. **Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 6.2, p. 127-139, 2011.

BRYDSON, J.A; **Plastics Materials.** BUCKNALL, C. B. Toughened Plastics, Applied SciencePubl, 1999.

BYNUM, Richard T. Jr. **Insulation Handbook**. The McGraw-Hill Company. 2001. EUA.

CALDEIRA, D; SPOSTO, R. M; CALDAS, LUCAS ROSSE. **Avaliação do ciclo de vida energético de telha termoacústica com poliestireno expandido e telha cerâmica tipo plan em edificação em edificação unifamiliar**. São Paulo. ENTAC. v. 1. p. 1-17, 2016.

CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 8ª Ed. Editora LTC. 2012, 820 p.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. **Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos**. Acta Scientiarum, Maringa, v.24, n.6, p.1599-1602, 2002.

CARVALHO, J. F.; **Energia e Sociedade**. Revista Estudos Avançados. Volume 28. Número 82. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, Brasil. Out/Dez. 2014. ISSN 0103-4014.

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

CICHINELLI, G. **Soluções termoacústicas**. Revista Técnica. Número 87. Junho. 2004. Editora Pini.

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 >. Acesso em: 03/05/18.

COUTINHO, Fernanda M. B; MELLO, Ivana L; MARIA, Luiz C. de Santa. **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações**. Instituto de Química, UERJ. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

COWIE, J.M.G., **Polymer: Chemistry and Physics of Modern Materials**, Intertex Books, London, 1993.

CUNHA, C. G; NEUMANN, Walter. **Manual de impermeabilização e isolamento térmico – Como projetar e executar**. Rio de Janeiro, RJ. 1979.

DAGRACA, 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.

DALFRE, G. M; CANDIAN, L. M; DIAS, A. A; PINHEIRO, L.M. **Uso de Polímeros Reciclados em elementos Estruturais**. In: Eduardo Chahud. (Org.). Reciclagem de

resíduos para a construção civil. 1ed. Belo Horizonte: FUMEC/FEA, 2007, v. 1, p. 193-215.

DEAN, John A. **Lange's Handbook of Chemistry**. University of Tennessee. USA. Fifteenth Edition. McGRAW-HILL, INC. 1999.

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. Dergisi Cilt, v. 13, n. 1, p. 26-35, 2011.

DIAS, Maria Ângela. **Arquiteturas em Contextos de Inovação** - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras na Cidade Universitária da UFRJ, 1ª Edição, Editora UFRJ, 2010, RJ.

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.

FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. **Catálogo Técnico Família MARCH 2. Versão 0513**. 2007. <https://www.flowwaterjet.com.br>.

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

GONÇALVES, A. P. B.; MIRANDA, C. S. ; GUIMARAES, D. H. ; SANTOS, Z. I. G. ; JOSE, N. M. . **Comportamento Mecânico de compósitos a base de blenda de PET reciclado/PEAD reforçados com fibras de bananeira roxa**. In: Edson Noriyuki Ito; Rosangela de Carvalho Balaban. (Org.). Comportamento Mecânico de compósitos a base de blenda de PET reciclado/PEAD reforçados com fibras de bananeira roxa. 1ª ed. São Carlos: Associação Brasileira de Polímeros Regional Nordeste, 2014, v. 1, p. 45-48.

HARPER, CHARLES A.; PETRIE, Edward M. **Plastics Materials and Process: A Concise Encyclopedia**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

HARRON, G. W.; HARKIN-JONES, E. M. A.; 7MARTIN, P. J. **Influence of thermoforming parameters on final part properties**. Thermoforming Research Group. The Queen's University of Belfast, Northern Ireland, 2002. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pen.10231>. Acessado em 28/03/17.

HELLMEISTER, J. C. **Estruturas de Madeira**. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. 2ed. rev. São Carlos, SP. 1977.

HOMETEKA. **Chise Experimental House**. Artigo digital. Jul. 2013. Disponível em <https://www.hometeka.com.br/f5/chise-experimental-house/>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual: Produto - PIA Produto. Tabela completa 2013**. 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?&t=downloads>. Acessado em 04/01/2018. [Insulation_Handbook.pdf](#)>. Acesso em 16/05/ 2017.

Iñiguez, C. G; Michel, E; González, R, V. M; Nuñez, R. González. **Morphological stability of postconsumer PET/HDPE blends**. November. 2000. Volume 45. 3ª Ed. p 295–302. Polymer Bulletin. Springer-Verlag. 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função. Arquivo da palestra apresentada no Fórum Governamental de Responsabilidade Social**. Brasil, 2014. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentacoes/3.pdf>. Acessado em: 20/05/18.

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

KALFOGLOU, N.K; SKAFIDAS, D.S; KALLITSIS, K. **Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/HDPE blends**. Polymer Materials Today, 36ª Ed. 23. Pages: 4453-4462. 1995.

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

LEI, Y; WU, Q; CLEMONS, C. M; GUO, W. **Phase Structure and Properties of Poly (ethylene terephthalate) / High-Density Polyethylene Based on Recycled Materials**. Published online 17 April 2009 in Wiley InterScience. Disponível em: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2009/fpl_2009_lei001.pdf>. Acessado em: 30/05/18.

LENGEN, Johan Van. **Manual do arquiteto descalço**. 1ª ed. B4 Editores. 2014.

LIMA, F. A. S; **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz cerâmica com cargas de resíduos de EPS e raspa de pneu para construção de casas populares**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

M&G Poliéster S.A. **Manual Técnico. Injeção**. 2018. Disponível em: <http://www.mg-chemicals.com.br/pt/manuais-tecnicos>.

MACHADO, Miriam L. C; PEREIRAM Nilson C; MIRANDA, Leila F. de; TERENCE, Mauro C. **Estudo das propriedades mecânicas e térmicas do polímero poli-3-hidroxi-butirato (PHB) e de compósitos PHB/pó de madeira.** Polímeros: Ciência e Tecnologia. ISSN: 0104-1428.2009.

MANCINI, S. D, BEZERRA, Maxwell, N, ZANIN, M. **Reciclagem de PET Advindo de Garrafas de Refrigerante Pós-Consumo.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. Abr/Jun, p. 68-75, 1998.

MARCONCINI, José M; FILHO, Adhemar R. **Análise Termodinâmica do Comportamento Mecânico na Região Elástica de Blendas de Poli (Tereftalato de Etileno) Reciclado e Poliolefinas Recicladas.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, nº 4, p. 323-331, 2006.

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.

MGM Produtos Siderúrgicos Ltda. **Manual de Sistema Estrutural Metálico Leve para Telhados - Engradamentos metálicos.** Disponível em: <http://www.mgmcorp.com.br>. Acessado em 25/03/17.

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.

MOLITERNO, Antônio; REYOLANDO, M.L.R.F. **Elementos para Projetos em Perfis Leves de Aço.** Brasil. Editora Edgard Blucher, 2015. 2a Edição.

MONDADORI, N.M.L., NUNES, R.C.R., ZATTERA, A.J., OLIVEIRA, R.V.B., CANTO, L.B. **Relationship between processing method and microstructural and mechanical properties of PET/short glass fiber composites.** Journal of Applied Polymer Science, v. 109, n. 5, p. 3266-3274, 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.

MONTEIRO, Sergio Neves ; MARGEM, Frederico Muylaert; DA SILVA, Isabela Leão; BEVITORI, Alice; OLIVEIRA, Michel Picanço. **Bending Mechanical Behavior of Epoxy Matrix Reinforced with Jute Fiber.** Materials Science, v. 775-776, p. 314-318, 2014.

MOURA, M. C. S.; Ribeiro, L.A.D. ; MEDEIROS, A. M. ; MELO, J. D. D. ; PASKOCIMAS, C. A. ; ITO, E. N. . **Processamento e caracterização de compósitos poli (tereftalato de etileno) (PET) reciclado com flocos de vidro.** Campos do Jordão. 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011. v. 1.

OLIVEIRA, Alessandra Lopes de; CABRAL, Fernando Antônio. **Uso da equação de estado de Peng-Robinson com regra de mistura dependente da composição na predição do equilíbrio de fases do sistema ternário CO₂-Limoneno-Citral**. Food Science and Technology. Ciência. Tecnologia. Alimentação. Vol. 17. N. 4. Campinas. Dez. 1997.

OPERMAK Suprimentos Industriais. **Cortes e Usinagem**. Rua Roque da Silva, 50. Novo Eldorado. CEP 32341-550. Contagem - MG, Brasil. Disponível em: <https://www.opermak.com.br/>.

OROMIEHIE, A, MAMIZADEH, A. **Recycling PET beverage bottles and improving properties**, Polymer International, v. 53, p. 728–732, 2004.

PACHECO, Flávia; COTA, Stela; SILVA, Tânia; SENNE, Murilo. **Avaliação do uso de poli (tereftalato de etileno) (pet) como matriz de imobilização de cinzas de incineradores**. Artigo. Química Nova. Volume 32, No. 9, 2294-2298, 2009.

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.

PEREIRA, Francisco, S; G. **Polímeros - Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. Revista do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Outubro, 2009. DOI: 10.13140/RG.2.2.12991.30885

PETTERSEN, M. K.; GÄLLSTEDT, M.; EIE, T. **Oxygen Barrier Properties of Thermoformed Trays Manufactured with Different Drawing Methods and Drawing Depths**. Packaging Technology and Science. John Wiley & Sons Ltd, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pts.642>. Acessado em 27/03/18.

PIETRASANTA, Y; ROBIN, J. J; TORRES, N; BOUTEVIN, B. **Reactive compatibilization of HDPE/PET blends by glycidyl methacrylate functionalized polyolefins**. Macromolecular Chemistry and Physics 200(1):142 – 149. 1999.

PORTAL MET@LICA. **Manual Técnico de Coberturas Metálicas**. 2017.

PQS - Petrobras. **Catálogo de resina PET**. Disponível em <http://www.pqspe.com.br/produto/resina-pet>. Acesso em: 26/10/2017.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima; acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986.

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.

SMARTGLASS. **Especificações Técnicas**. Disponível em: <http://www.smartglass.net.br/?page_id=10>. Acesso em 05/10/17.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurélio de. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Artigo. Química Nova, Vol. 28, No. 1, 65-72, 2005.

SUDECAP. **Cadernos de Encargos. Coberturas e Forros**. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. 3ª Edição. 2008.

TAVMAN, I; AYDOGDU, Y; KÖK, M; TURGUT; A; EZAN, A. **Measurement of heat capacity and thermal conductivity of HDPE/expanded graphite nanocomposites by differential scanning calorimetry**. Archives of Materials Science and Engineering. Julho 2011.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Isolamento térmico**. São Paulo, 1980. Fulton Editora Técnica Ltda., 1980.

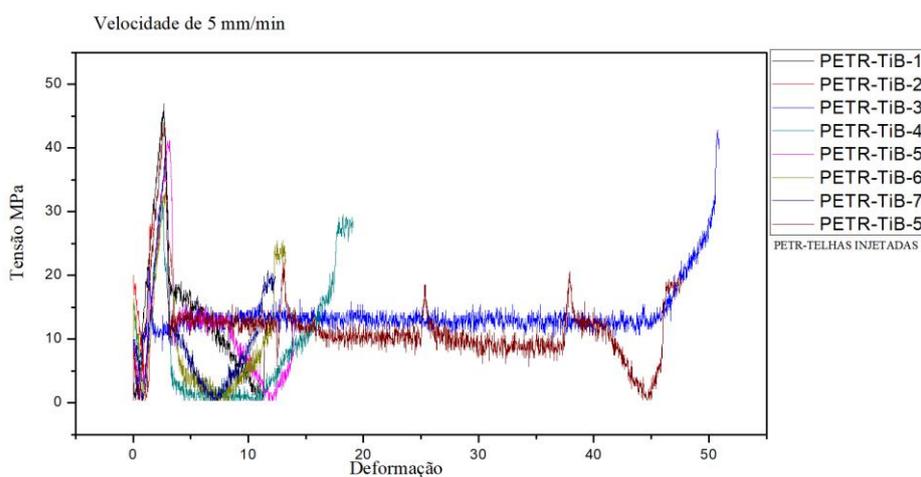
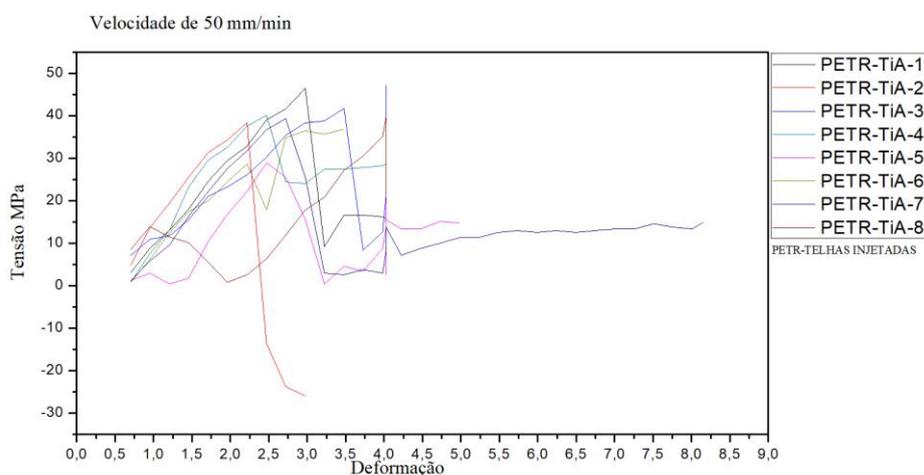
TORRES, T; ROBIN, J. J; BOUTEVIN, B. **Study of Compatibilization of HDPE–PET Blends by Adding Grafted or Statistical Copolymers**. France. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, 2377–2386. 2001 John Wiley & Sons, Inc.

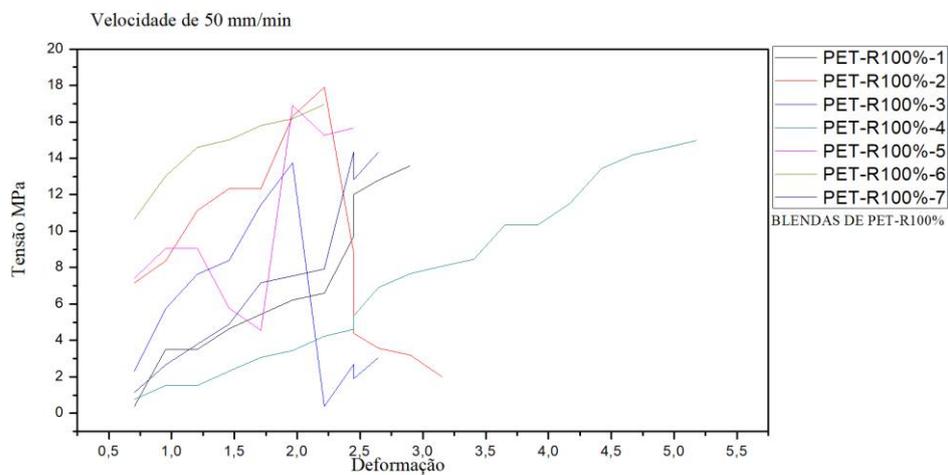
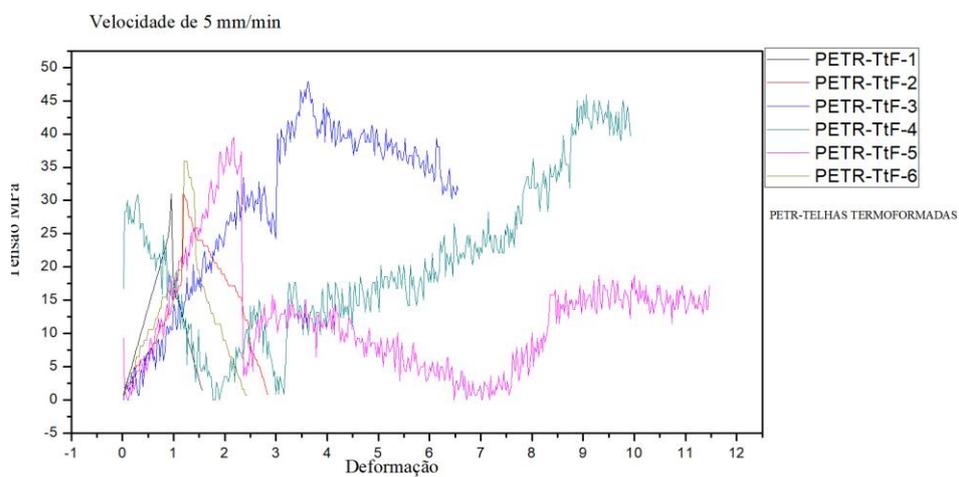
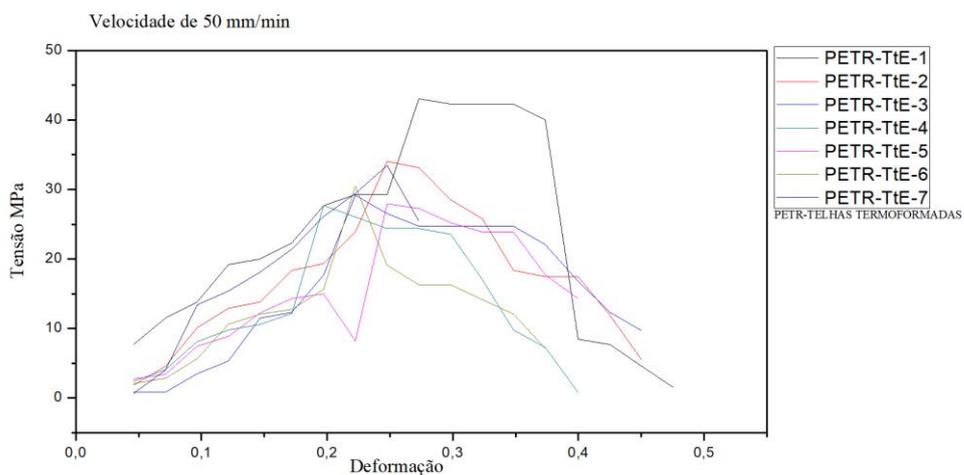
VITTORINO, F.; SATO, N. M. N. ; AKUTSU, M. . **Desempenho Térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas**. Técnica. Revista de Tecnologia da Construção, São Paulo, v. 75, p. 66-70, 2003.

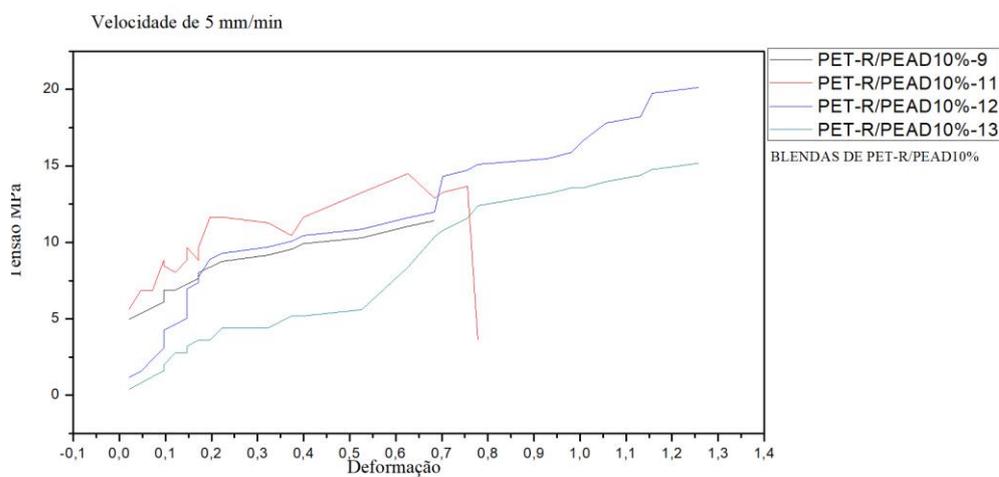
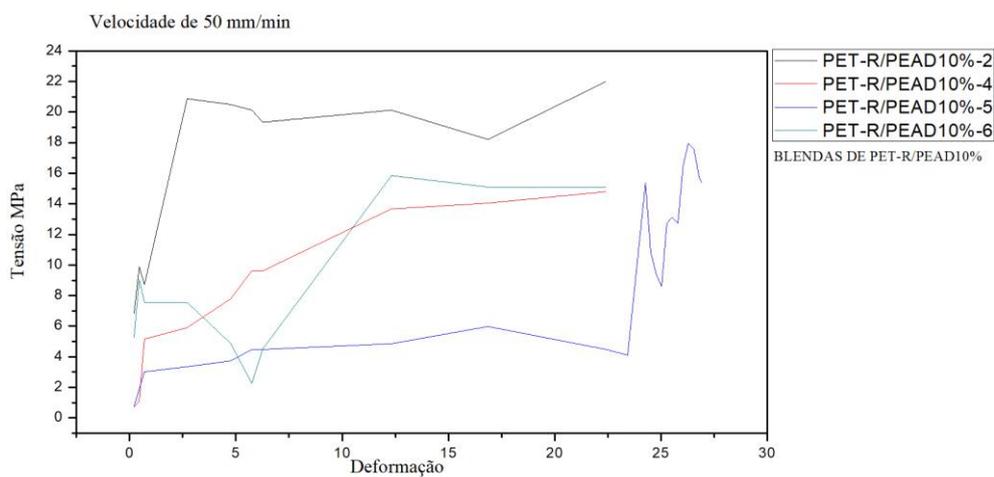
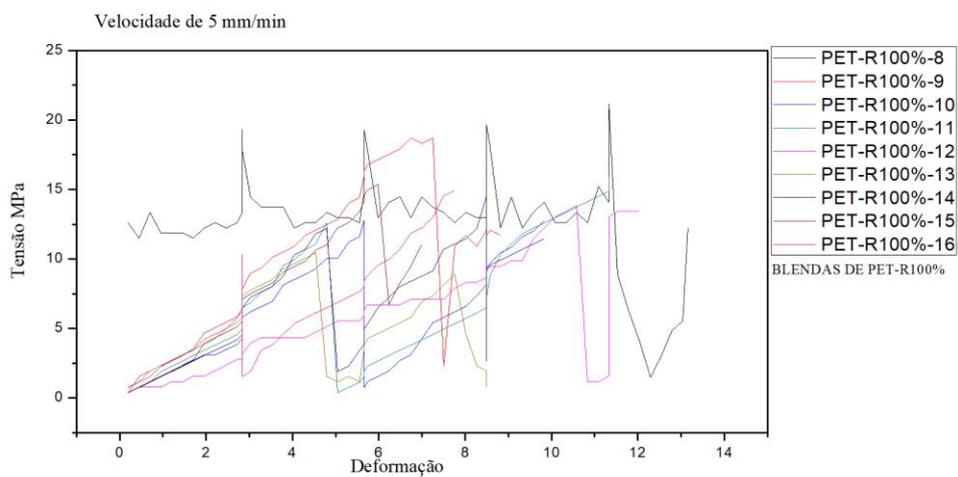
WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. São Paulo. Artiber Editora. 2005.

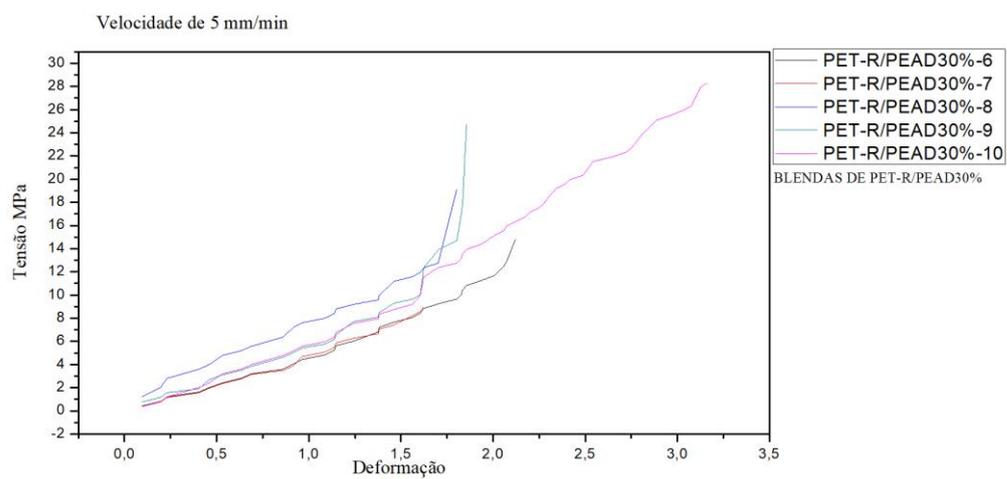
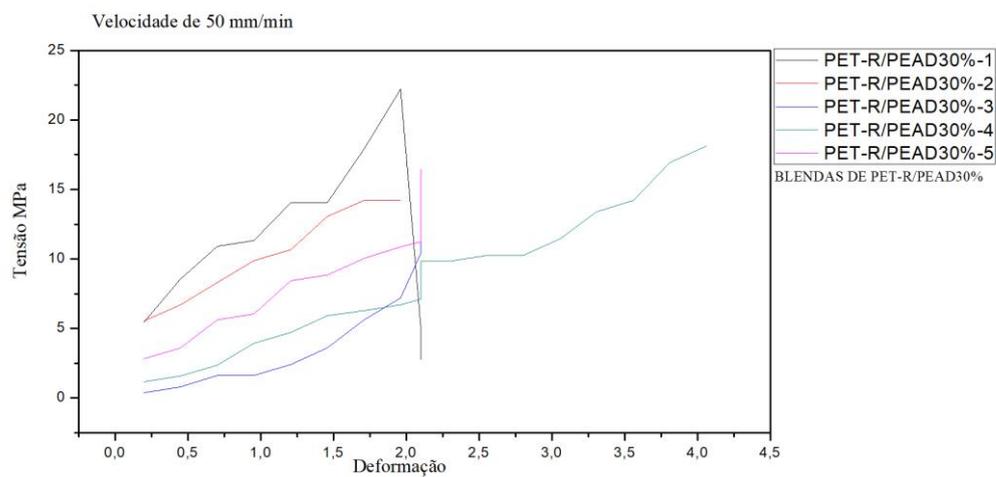
APÊNDICES

Resultados gráficos dos ensaios mecânicos das amostras a base de PET de origem comercial (PET-R de telhas) e reciclada (PET-R de garrafas e blendas de PET-R/PEAD) conforme norma técnica ASTM D638-14 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014). Os ensaios foram conduzidos em duas velocidades distintas: 50,0 mm/min, para determinar as propriedades mecânicas no regime plástico (LRT, LRR, % de deformação); e 5,0 mm/min para mensurar o módulo elástico (E_b) dos materiais.



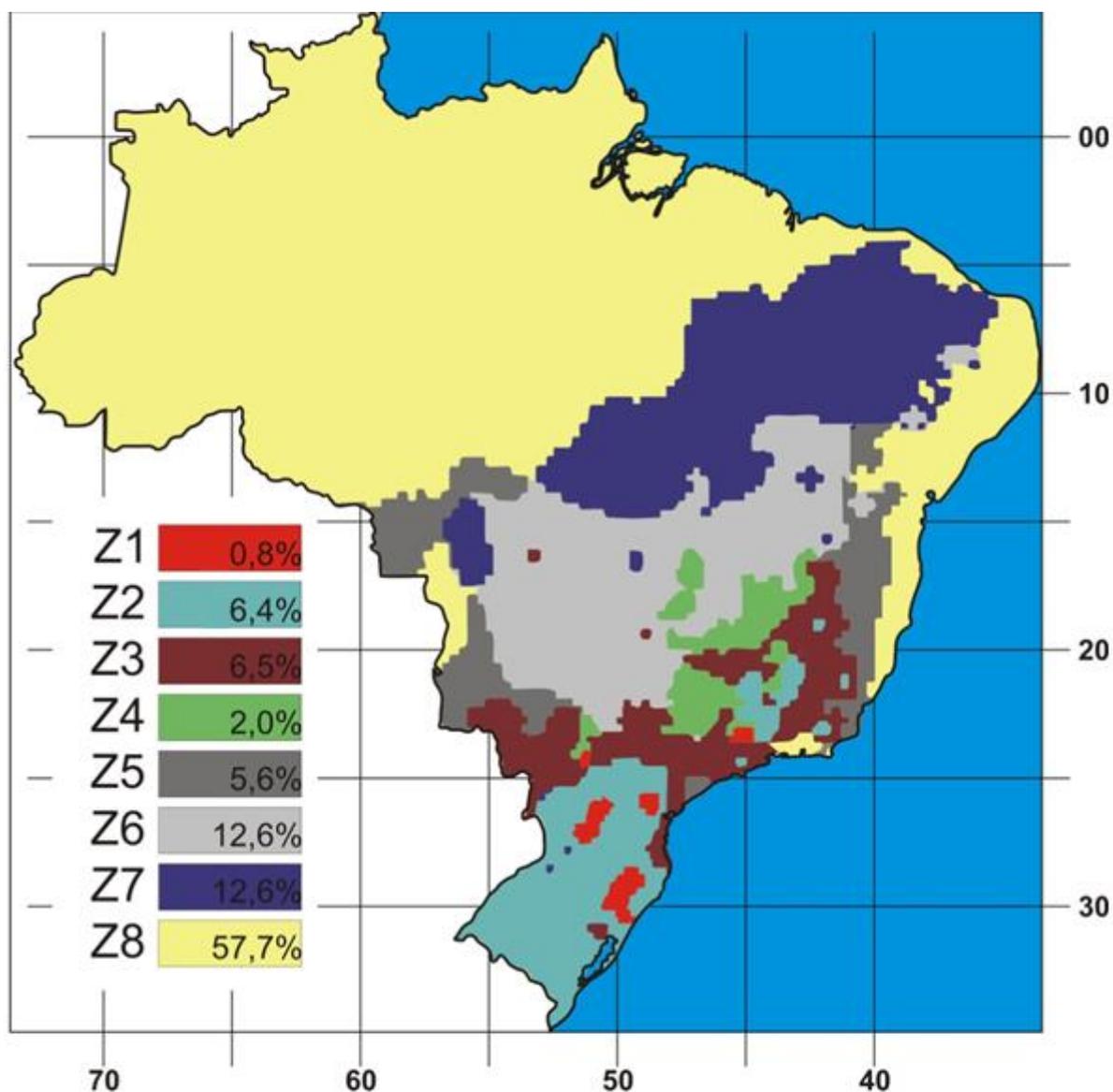






ANEXO A

Mapa do Zoneamento bioclimático brasileiro



Z = área do território brasileiro correspondente à referida zona bioclimática.

Nota: Belo Horizonte/MG se encontra na zona 3, Rio de Janeiro/RJ na zona 8, São Paulo/SP na zona 3, Curitiba/PR na zona 1, Porto Alegre/RS na zona 3.

Fonte: ABNT NBR 15220-3:2003

ANEXO B

Propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para as coberturas conforme ABNT NBR 15220-2:2003:

MATERIAL	PROPRIEDADE TÉRMICA		
	Densidade de massa aparente (ρ) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Condutividade térmica (λ) ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	Calor específico (c) ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)
Argamassa de reboco	2000	1,15	1,00
Cerâmica	2000	1,05	0,92
Concreto	2200	1,75	1,00
Fibrocimento	1900	0,95	0,84
Gesso	750	0,35	0,84
Madeira	600	0,15	1,34
PVC	1300	0,20	0,96
Telha metálica de aço	7800	55	046

Fonte: ABNT NBR 15220-2:2005

ANEXO C

Valores típicos do PEAD proveniente das empresas SABIC em grânulos usados neste trabalho:

PROPRIEDADES	MÉTODO ASTM	UNIDADES SI	VALORES
Densidade a 23°C	D 1505	kg·m ⁻³	964
Tensão de tração - escoamento	D 638	MPa	26
Tensão de tração – ruptura	D 638	MPa	18
Deformação – ruptura	D 638	%	>800
Módulo secante 1%	D 638	MPa	950
Módulo de elasticidade na flexão	D 790	MPa	1000
Força flexional	D 790	MPa	25
Força de impacto Izod, a entalha	D 256	J/m	75
Temperatura de fusão	/	°C	200 – 250
Temperatura do molde	/	°C	15 - 60
Pressão de injeção	/	Bar	600 - 1000

Fonte: Sabic (2016)

ANEXO D

Valores típicos do PEAD em pó Idealis 500, proveniente da empresa Braskem usados neste trabalho:

PROPRIEDADES	MÉTODO	UNIDADES SI	VALORES
Viscosidade intrínseca	ASTM D 4020	dL·g ⁻¹	4,7
Peso molecular médio	Interno	g·mol ⁻¹	5,5·10 ⁵
Índice de fluidez (190 °C·21,6 kg ⁻¹)	ASTM D 1238	g·10 min ⁻¹	0,70
Densidade a 23 °C	ASTM D 1505	g·cm ⁻³	0,952
Densidade aparente	ASTM D 1895	g·cm ⁻³	0,45
Tamanho médio das partículas Dp50	ASTM D 1921	µm	195
Tensão de tração escoamento	ASTM D 638	MPa	>20
Tensão de tração ruptura	ASTM D 638	MPa	>30
Deformação – ruptura	ASTM D 638	%	>500
Módulo de elasticidade na flexão	ASTM D 790	MPa	930
Força flexional	ASTM D 790	MPa	-
Resistência ao impacto Charpy	ISO 11542-2	kJ·m ⁻¹	>50
Dureza Shore D (15 s)	ASTM D 2240	-	63
Índice de abrasão (Ref. PE500 = 100)	Lama de areia - interno	-	80
Temperatura de fusão	ASTM D 3418	°C	136
Calor Específico a 23°C	ASTM E 1269	cal/g°C	0,48
Temperatura de amolecimento Vicat (50N)	ASTM D 1525	°C	80

Fonte: Braskem (2014)