

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Rafael de Oliveira Barreto

Desenvolvimento e avaliação de compósitos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reciclados dopados com grafite em fase dispersa aplicados em aquecimento solar de água

Belo Horizonte

Fevereiro de 2020

Rafael de Oliveira Barreto

Desenvolvimento e avaliação de compósitos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reciclados dopados com grafite em fase dispersa aplicados em aquecimento solar de água

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior

Coorientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

Belo Horizonte

Fevereiro de 2020

Barreto, Rafael de Oliveira.

B273d Desenvolvimento e avaliação de compósitos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reciclados dopados com grafite em fase dispersa aplicados em aquecimento solar de água / Rafael de Oliveira Barreto. – 2020.

97 f. : il.

Orientador: Ezequiel de Souza Costa Júnior

Coorientador: André Guimarães Ferreira

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2020.

Bibliografia.

1. Aquecimento solar. 2. Condutividade térmica. 3. Polímeros. I. Costa Júnior, Ezequiel de Souza. II. Ferreira, André Guimarães. III. Título.

CDD: 697.78



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS
DE ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)
RECICLADOS DOPADOS COM GRAFITE EM FASE
DISPERSA APLICADOS EM AQUECIMENTO SOLAR DE
ÁGUA”

Autor: Rafael de Oliveira Barreto

Orientador: Prof. Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 20 de Fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha família, que sempre me apoiou em meus estudos me fornecendo as condições necessárias para chegar até aqui.

Ao meu Orientador Professor Ezequiel de Souza Costa Júnior, por me guiar nesta empreitada, compartilhando seu saber quase inesgotável.

Ao meu Coorientador Professor André Guimarães Ferreira por sua presteza e disponibilidade em ajudar sempre que necessário.

Ao Professor Claudinei Rezende Calado por sempre me inspirar a fazer mais, melhor e de modo inovador.

Ao Professor Sidney Nicodemos da Silva pela presteza e cortesia em me atender.

À Professora e Amiga Elizabeth Marques Duarte Pereira e ao Professor e amigo Lucas Paglioni Pataro Faria, por me mostrarem a extensão do mundo da energia solar térmica sendo responsáveis pela realização deste trabalho.

À Professora Patrícia Santiago de Oliveira Patrício pelo acolhimento e abertura do laboratório de química para a preparação das misturas poliméricas.

Ao Professor Frederico Romagnoli Silveira Lima e o Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, por todo apoio prestado para o desenvolvimento das análises numérica.

Ao Mestrando Ítalo Rocha Coura por todo auxílio e paciência na preparação das misturas poliméricas.

Aos meus amigos e colegas Álvaro Caldeira e Rosa da Silva, Cecília Balduino da Silva, Eduardo César Vieira e Silveira, Juscelino Mendes Prado, Leonardo Menezes de Faria, Luiz Cristiano Franca de Souza e Vitor Vieira Junger por estarem ao meu lado me

ajudando e incentivando nessa jornada.

Ao Departamento de Engenharia Materiais do CEFET-MG, aos professores pela disponibilidade de infraestrutura dos laboratórios e materiais para realização dos ensaios, e em especial aos funcionários Rogério Mouroço Coutinho e Gilberto Caldeira Faria por toda assistência e amizade.

Ao CEFET-MG, à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e à FUNDAÇÃO CEFETMINAS pela disponibilidade de profissionais, instalações, laboratórios e auxílio financeiro.

*“A experiência nunca falha, apenas as
nossas opiniões falham, ao esperar da
experiência aquilo que ela não é capaz de
oferecer. ”*

Leonardo da Vinci

RESUMO

Materiais poliméricos termoplásticos apresentam elevado potencial de produção em larga escala a baixo custo em aquecedores solares. Sua aplicação em coletores solares atualmente se restringe a aplicações em baixas temperaturas, e em geral para o aquecimento de piscinas. Sua maior limitação é sua eficiência térmica em relação aos coletores solares metálicos. O presente trabalho consiste no desenvolvimento de compósitos de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) aplicando grafite de forma dispersa para aumentar a condutividade térmica do material. Inicialmente *pellets* de ABS virgem foram extrudados com adição de grafite disperso nas proporções de 1%, 2,5%, 5% e 10%. Foram produzidos também compósitos de ABS reciclado, de origem de lixo eletrônico, com grafite em fase dispersa nas proporções de 1%, 2,5%, 5%, 10% e 20%. Em seguida foram produzidos corpos de prova cilíndricos, por meio de termo moldagem, para a medição da condutividade térmica. As medições de condutividade térmica foram realizadas por meio do método de fluxo térmico radial, sendo observadas condutividades entre 0,21W/m K a 0,69 W/m K variando em função da quantidade de grafite empregado. Utilizando modelos e simulações numéricas constatou-se a possibilidade de obter ganho no desempenho térmico, na ordem de 5%, caso fosse empregado o compósito de ABS reciclado contendo 20% de grafite ao invés da utilização do polímero puro. Em análise numérica, o aumento da condutividade térmica faz com que a temperatura de estagnação de um coletor solar hipotético seja reduzida. Considerando os valores de condutividade do ABS puro, a temperatura de estagnação seria na ordem de 75°C, enquanto o ABS reciclado contendo 20% de grafite passaria para 68°C, reduzindo assim as solicitações térmicas as quais o coletor estaria exposto. Assim, a utilização deste compósito apresentaria desempenho superior em relação ao polímero puro.

Palavras-Chave: Aquecimento Solar; Condutividade Térmica; Polímeros.

ABSTRACT

Thermoplastic polymeric materials have high potential for large-scale production at low cost in solar heaters. Its application in solar collectors is currently restricted to applications at low temperatures, and in general for the heating of swimming pools. Its biggest limitation is its thermal efficiency in relation to metallic solar collectors. The present work consists in the development of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) composites applying graphite in a dispersed form to increase the thermal conductivity of the material. Initially pellets of virgin ABS were extruded with the addition of dispersed graphite in the proportions of 1%, 2.5%, 5% and 10%. Also produced were recycled ABS composites, originating from electronic waste, with graphite in dispersed phase in the proportions of 1%, 2.5%, 5%, 10% and 20%. Then, cylindrical specimens were produced, by means of thermoforming, for the measurement of thermal conductivity. The measurements of thermal conductivity were performed using the radial thermal flow method, with conductivities between 0.21W/m K to 0.69W/m K varying depending on the amount of graphite used. Using numerical models and simulations, the possibility of obtaining a gain in thermal performance was verified, in the order of 5%, if the recycled ABS composite containing 20% graphite was used instead of using the pure polymer. In numerical analysis, the increase in thermal conductivity causes the stagnation temperature of a hypothetical solar collector to be reduced. Considering the conductivity values of pure ABS, the stagnation temperature would be in the order of 75°C, while recycled ABS containing 20% graphite would go to 68°C, thus reducing the thermal stresses to which the collector would be exposed. Thus, the use of this composite would present superior performance in relation to the pure polymer.

Keywords: Solar heating; Thermal Conductivity; Polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo energético da eletricidade no Brasil	20
Figura 2: Fonte utilizada para aquecimento de água para banho	21
Figura 3: Comparação do impacto ambiental para a produção de 1m ² de coletores solares.....	24
Figura 4: Capacidade instalada total de coletores de energia sem cobertura em 2013	25
Figura 5: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre	31
Figura 6: Espectro eletromagnético da radiação solar.....	32
Figura 7: Condução em materiais cristalinos	33
Figura 8: Condução em polímeros amorfos	36
Figura 9: Modelo unidimensional de transferência de calor para coletor solar	38
Figura 10:Comparativo modelos de condução térmica 0 a 100%.....	41
Figura 11: Comparativo modelos de condução térmica 0 a 20%.....	41
Figura 12: Fluxograma das etapas de trabalho	44
Figura 13: Mistura de ABS virgem e grafite em pó antes de ser extrudada.....	47
Figura 14: Processamento do material realizado em extrusora plástica.....	48
Figura 15: Processo de moagem dos filamentos	49
Figura 16: Desenho de conjunto do molde em vista frontal e corte total.....	50
Figura 17: Corpo de prova para medição da condutividade térmica.....	52
Figura 18: Termômetro e resistor elétrico utilizados	53
Figura 19: Segmento de tubulação simulado no software Comsol	55
Figura 20: Coletor polimérico utilizado como base geométrica	58
Figura 21: Molde para produção de peças cilíndricas	61
Figura 22: Corpos de prova irregulares	62
Figura 23: DRX grafite.....	63
Figura 24: Pellets produzidos	64
Figura 25: Filamento de ABS reciclado com grafite disperso	65
Figura 26: Grafite disperso em matriz polimérica, aumento 200x	66
Figura 27: Grafite disperso em matriz polimérica, aumento 800x	66
Figura 28: MEV ABS reciclado com 1% de grafite	67
Figura 29: Grão de grafite disperso e EDS.....	68
Figura 30: MEV ABS reciclado com 20% de grafite 40X.....	68
Figura 31: MEV ABS reciclado com 20% de grafite 500X.....	69

Figura 32: DSC do ABS reciclado	70
Figura 33: DSC do ABS virgem.....	70
Figura 34:Corpos de prova para medição da condutividade térmica	71
Figura 35: Resultado das medições de condutividade térmica dos corpos de prova.....	72
Figura 36: Malha do componente simulado	73
Figura 37: Distribuição da radiação solar na superfície superior	74
Figura 38: Coeficiente convectivo por convecção natural ($k=0,1 \text{ W/m K}$)	75
Figura 39: Distribuição de temperaturas em condição de estagnação ($k=0,1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).....	75
Figura 40: Distribuição de temperaturas em condição de estagnação ($k=0,1 \text{ W/m K}$).....	76
Figura 41: Temperatura de estagnação em função da condutividade térmica do material	77
Figura 42: Relação entre a eficiência e o K_p/b em coletor polimérico	78
Figura 43: Relação entre a condutividade térmica e a eficiência	79
Figura 44: Comportamento da eficiência térmica de coletores solares.....	80
Figura 45: Desenho do coletor solar polimérico	81
Figura 46: Modelo em 3D do coletor solar utilizado na simulação de desempenho térmico ...	82
Figura 47: Detalhamento da malha	83
Figura 48: Distribuição da temperatura da água no interior do coletor.....	84
Figura 49: Distribuição de temperatura na saída do coletor.....	85
Figura 50: Desempenho térmico dos coletores em ABS reciclado	87
Figura 51: Desempenho térmico dos coletores em ABS virgem	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condutividade térmica de alguns materiais poliméricos.....	35
Tabela 2: Condutividade térmica de algumas cargas condutoras.....	35
Tabela 3: Principais métodos normatizados para mediação da condutividade térmica	42
Tabela 4: Propriedades do ABS virgem	45
Tabela 5: Características do grafite utilizado	46
Tabela 6: Condição de contorno nas simulações de desempenho térmico.....	59
Tabela 7: Resultado das medições de temperatura dos corpos de prova.....	72
Tabela 8: Dados da malha utilizada nas simulações de desempenho térmico	81
Tabela 9: Temperatura média de saída da água.....	85
Tabela 10: Eficiência térmica média do coletor $((T_e - T_a)/G = 0,005)$	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	-Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	-Método Brunauer, Emmett e Teller para análise de área superficial
DRX	-Difratometria de raios X
DSC	-Calorimetria Exploratória Diferencial
EDS	-Espectroscopia por Energia Dispersiva
EDX	-Fluorescência de Raio X
EES	- <i>Engineering Equation Solver</i>
EPE	-Empresa de Pesquisa Energética
HDT	-Temperatura de Deflexão Térmica
IEA	- <i>International Energy Agency</i>
MEV	-Microscopia Eletrônica de Varredura
PNE 2030	-Plano Nacional de Energia 2030
PP	-Polipropileno
PPGMQ-MG	-Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química
TF	-Temperatura de Fusão
Tg	-Temperatura de Transição Vítrea
C	-Carbono
Th	-Tório
Si	-Silício

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{c}_e$	-Velocidade média do elétron [m/s]
$\bar{c}_f$	-Velocidade média do som [m/s]
C_e	-Calor Especifico do elétron por unidade de volume [J/(kg K)]
C_f	-Calor Especifico do fônon [J/(kg K)]
$F_R (\tau\alpha)$	- Coeficiente de energia térmica absorvida coletor solar [-]
$F_R U_L$	-Coeficiente de perda térmica coletor solar [-]
K_e	-Condutividade térmica devido elétrons livres [W/(m K)]
K_f	-Condutividade térmica devido <i>fônons</i> [W/(m K)]
T_∞	-Temperatura do ar ambiente [K]
T_s	-Temperatura na superfície [K]
T_s	-Temperatura superficial [K]
$\dot{m}$	-Vazão mássica [m ³ /s]
$\dot{q}$	-Fluxo de calor local [W/m ²]
λ_e	-Livre percurso médio do elétron [m]
λ_f	-Livre percurso médio do <i>fônon</i> [m]
$\emptyset$	-Fração volumétrica de aditivo [%]
∇T	-Gradiente de temperatura [K/m]
A_c	-Área do coletor [m ²]
b	-Espessura da parede do absorvedor do coletor [m]
D	-Diâmetro [m]
F'	-Fator de eficiência térmica coletor [-]
G	-Fluxo de radiação solar [W/m ²]
h	-Coeficiente convectivo [W/(m ² K)]
hf_1	-Coeficiente de convecção entre fluido e absorvedor superior [W/(m ² K)]
hf_2	-Coeficiente de convecção entre fluido e absorvedor inferior [W/(m ² K)]
K	-Condutividade Térmica [W/(m K)]
K_a	-Condutividade térmica do aditivo [W/(m K)]
K_c	-Condutividade térmica do compósito [W/(m K)]
K_p	-Condutividade térmica do polímero [W/(m K)]
L	-Comprimento [m]
Pr	-Número de Prandtl [-]

q	-Taxa de transferência de calor [W]
Q_u	-Calor útil [W]
r	-Raio [m]
R	-Resistência elétrica [Ω]
Ra	-Número de Rayleigh [-]
Re	-Numero de Reynolds [-]
Re	-Numero de Reynolds [-]
R_{ex}	-Raio externo [m]
R_{in}	-Raio interno [m]
T_a	-Temperatura ambiente [K]
T_b	-Temperatura na base do absorvedor [K]
T_{bf}	-Temperatura na base do fluido [K]
T_f	-Temperatura na média do fluido [K]
T_p	-Temperatura do topo do absorvedor [K]
T_{pf}	-Temperatura do topo do fluido [K]
T_{se}	-Temperatura na superfície externa [K]
T_{se}	-Temperatura na superfície externa [K]
T_{si}	-Temperatura na superfície interna [K]
U_b	-Coeficiente de perda térmica pela base do coletor [$W/m^2 K$]
U_t	-Coeficiente de perda térmica pelo topo do coletor [$W/m^2 K$]
ν	-Viscosidade cinemática [m^2/s]
V	-Tensão elétrica [V]
η	-Eficiência térmica [%]
A_c	-Área coletora [m^2]
C_p	-Calor específico [$J/(kg K)$]
Q_u	-Ganho útil de energia [W]
q''	-Fluxo de calor [W/m^2]
α	-Difusividade térmica do fluido [m^2/s]
β	-Coeficiente de expansão volumétrico térmico [K^{-1}]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos específicos	17
3 JUSTIFICATIVA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Matriz energética brasileira.....	19
4.2 Aquecimento solar de água	21
4.3 Coletor solar térmico	22
4.4 Polímeros	27
4.4.1 ABS.....	28
4.5 Compósitos	28
4.5.1 <i>Influência da matriz polimérica na condutividade</i>	29
4.6 Radiação	29
4.7 Condutividade térmica	32
4.7.1 <i>Condução de calor em polímeros</i>	34
4.7.2 <i>Condução em compósitos de matriz polimérica</i>	37
4.8 Modelo térmico absorvedor solar.....	37
4.9 Modelagem da condução térmica em compósitos	39
4.10 Medição condutividade térmica	41
5 METODOLOGIA.....	44
5.1 Materiais	45
5.1.1 <i>ABS virgem</i>	45
5.1.2 <i>ABS reciclado</i>	45
5.1.3 <i>Grafite</i>	46
5.2 Métodos.....	46

5.2.1 Extrusão.....	46
5.2.2 Termo moldagem	49
5.2.3 Caracterização do material	50
5.3 Modelo numérico	54
5.3.1 Temperatura de estagnação	55
5.3.2 Fluxo térmico.....	56
5.3.3 Desempenho térmico	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1 Processamento	61
6.2 Materiais	62
6.2.1 Grafite	62
6.2.2 Compósitos	63
6.3 Caracterização	69
6.3.1 DSC	69
6.3.2 Condutividade térmica.....	71
6.4 Modelo Numérico.....	73
6.4.1 Temperatura de estagnação	73
6.4.2 Fluxo térmico.....	77
6.4.3 Desempenho térmico	80
7 CONCLUSÕES.....	89
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICE A – Modelo EES.....	94
ANEXO A- BET Grafite	96

1 INTRODUÇÃO

Existe grande empenho para o desenvolvimento e implantação de energia proveniente de fontes renováveis no mundo. Há desafios referentes à segurança energética, à mitigação das mudanças climáticas e ao desenvolvimento sustentável conforme expostos na 34ª Reunião de Cúpula do G8 em 2008 (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* – IEA, 2012). Ainda conforme a IEA 2012, as tecnologias de aquecimento solar podem desempenhar papel importante na superação de tais desafios. O aquecimento solar apresenta benefício de fornecer água quente a baixo custo, uma vez que apresenta reduzidos custos operacionais.

Em relação ao consumo de energia elétrica, estima-se o aumento médio de 5,1% ao ano (a.a.) no consumo residencial, enquanto a taxa média de crescimento total é de 4,3% a.a. entre os anos de 2005 e 2030, segundo o Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME, 2007).

A economia propiciada pelos aquecedores solares de água, em substituição aos chuveiros elétricos, é entendida como geração virtual de energia elétrica. Estima-se que 33% da energia elétrica residencial seja destinada ao aquecimento de água (RAIMO, 2007).

Atualmente os coletores solares são produzidos de diversos materiais utilizando-se vidro em sua cobertura, cobre em sua serpentina e alumínio em sua caixa externa e aletas.

Devido à utilização de alumínio e cobre o coletor solar apresenta valor financeiro elevado. Segundo Grevesses, Anders e Waddington (1988) a disponibilidade de cobre na crosta terrestre é de apenas 0,006%, sendo assim um material escasso e com grande demanda no setor elétrico. Segundo Melo (2009), para cada tonelada de alumínio produzida no Brasil são consumidos 14,9 (MW.h) de energia elétrica. Devido à escassez de cobre e o elevado consumo elétrico na produção do alumínio, o custo final de coletores solares metálicos torna-se elevado.

A redução de custo do equipamento pode ser conseguida através da simplificação do processo de fabricação e a redução do valor da matéria prima utilizada. A partir do processo de redução do custo dos equipamentos utilizados para a coleta de energia solar essa tecnologia torna-se mais acessível. Nesta perspectiva, a substituição dos materiais usualmente utilizados (alumínio e cobre) por materiais poliméricos reciclados vem com intuito de gerar produto financeiramente mais acessível e com desempenho similar aos modelos atualmente no mercado, empregados somente para aquecimento de água de piscina.

2 OBJETIVOS

O escopo geral do projeto trata de formular e caracterizar (físico-química e mecânica) misturas de ABS virgem e reciclado, visando à obtenção de materiais com características adequadas à utilização em sistemas de coletores com aquecimento solar.

Para se obter as propriedades necessárias, os materiais tiveram suas características moduladas ou alteradas por meio de aditivos e os valores obtidos das propriedades dos materiais caracterizados, servindo de base para o modelamento numérico de coletores solares em ambiente virtual por meio de *software* de simulação termofluidodinâmica.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de mestrado são:

- Formular compósitos a partir de matriz polimérica (ABS) virgem e reciclado usando grafite como aditivo;
- Desenvolver e avaliar materiais poliméricos com capacidade de condução de calor superiores a $0,5\text{W/m K}$;
- Medir a condutividade térmica dos materiais obtidos por meio do fluxo de calor radial em corpos de prova cilíndricos;
- Desenvolver modelo matemático para avaliar o efeito da condutividade térmica em tubos com escoamento interno e fluxo de calor constante na superfície externa;
- Simular computacionalmente a variação do desempenho térmico de um coletor solar térmico aberto correlacionado a condutividade térmica dos matérias utilizadas.

3 JUSTIFICATIVA

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2011) as ações de eficiência energética compreendem modificações ou aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo da cadeia, resultando em melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Privilegiando-se, portanto as ações com maior aproveitamento energético e consumo inferior para suprir a mesma demanda.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de coletores solares planos utilizando materiais poliméricos a partir de ABS reciclado (oriundos de carcaças de computadores, garrafas plásticas, celulares e outros). Os coletores solares estão sujeitos a diversas e severas condições de operação, tais como temperaturas na ordem de 100°C na superfície, variações de pressão constante com o acionamento de bombas e exposição direta à radiação solar. Diversos parâmetros característicos dos materiais empregados devem ser avaliados a fim de se garantir o pleno funcionamento dos mesmos sob estas condições. Outro fator importante é que o material aplicado deve apresentar condutividade térmica elevada, parâmetro que influencia diretamente na capacidade de transmissão da energia solar para o fluido interno ou de trabalho. Segundo Tsilingiris (2000), existe um valor crítico obtido pela razão da condutividade térmica com a espessura da tubulação, o qual demonstra que em condições inferiores a 200W/m²K, o desempenho térmico do equipamento apresenta redução acentuada de capacidade de aquecimento.

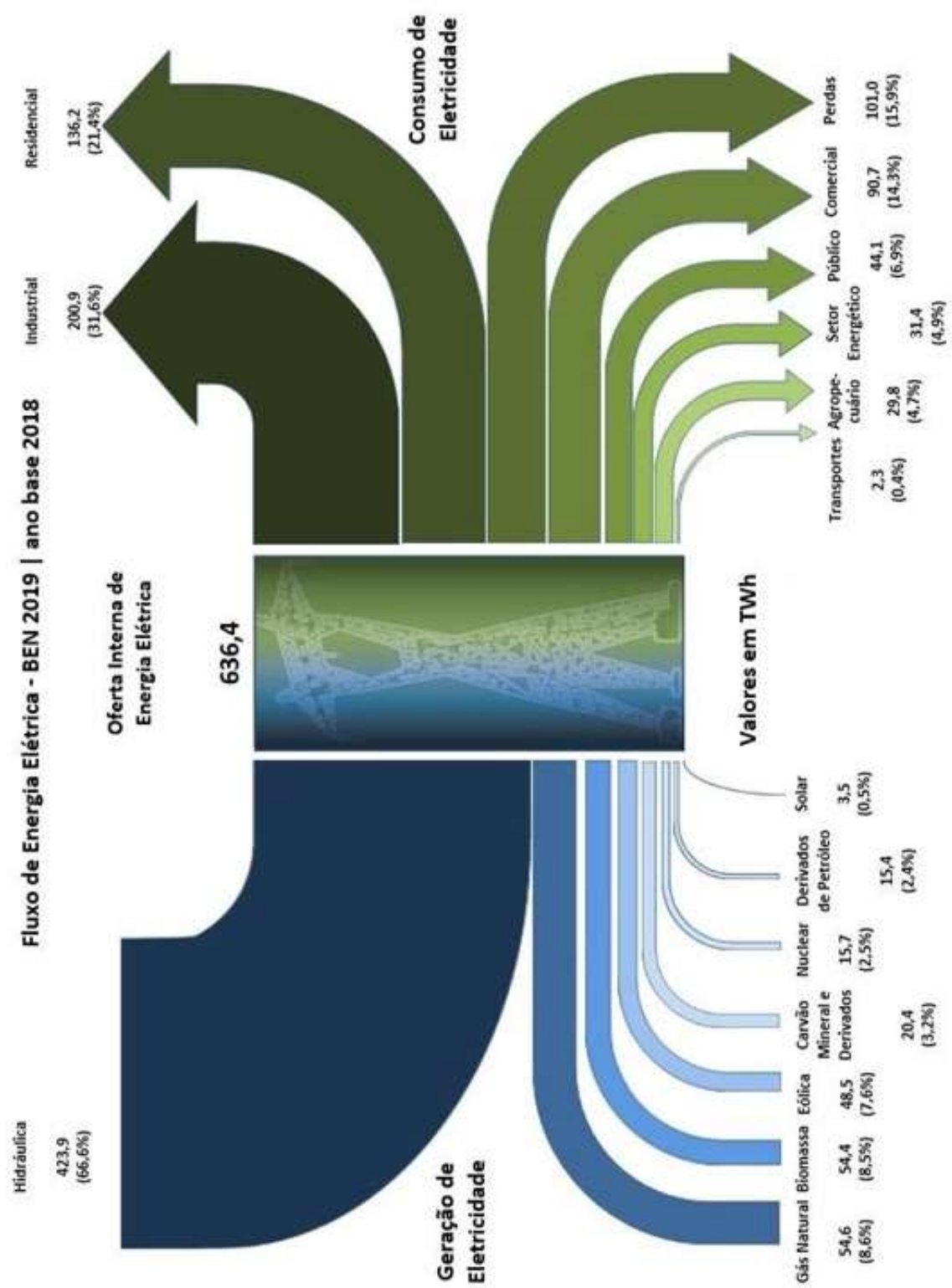
Deste modo, justifica-se a busca de material polimérico, de origem reciclada, com potencial de utilização em coletores solares, cujo desempenho térmico seja similar ou superior aos materiais utilizados atualmente no mercado.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Matriz energética brasileira

O sistema elétrico brasileiro apresenta-se como um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidroelétricas. Em 2018, a capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil atingiu a marca aproximada de 162.840MW, com participação das diversas fontes de energia, sendo gerado 636,4TWh no total de 2018 conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019). É apresetado na Figura 1 o fluxo de geração e consumo de energia elétrica do Brasil. Enquanto as termoelétricas e as hidroelétricas são consideradas fontes capazes de garantir o atendimento da demanda de carga típica do sistema, fontes renováveis como a eólica e a solar fotovoltaica são consideradas fontes intermitentes de energia, devido à variabilidade temporal associada às condições meteorológicas presentes no local da planta.

Figura 1: Fluxo energético da eletricidade no Brasil



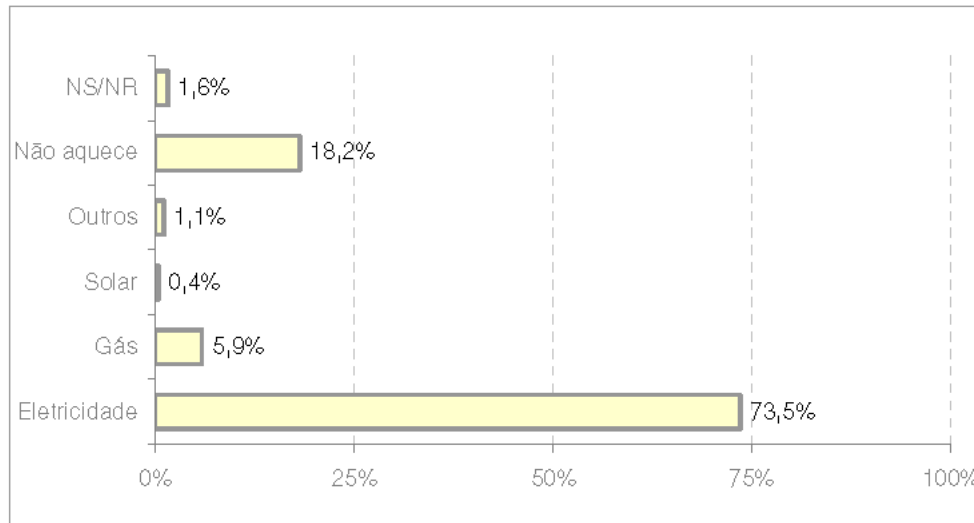
Fonte: Adaptado EPE, 2019.

4.2 Aquecimento solar de água

O parque solar térmico brasileiro, segundo a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, apresenta escala de cerca de 5,3 milhões de metros quadrados instalados em operação e cresce a taxas moderadas. Entretanto, o uso do chuveiro elétrico para aquecimento de água é disseminado no Brasil como em nenhum outro país. Os chuveiros elétricos apresentam baixo custo inicial e instalação simples, criando-se as condições para que fossem largamente disseminados nas residências brasileiras. Porém, a longo prazo, essa solução tecnológica produz efeitos indesejados no setor de energia elétrica (Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2011).

Conforme pesquisa publicada pela ELETROBRÁS/PROCEL (2007) apenas 0,4% dos entrevistados utilizavam sistema de aquecimento solar, 73,5% usavam eletricidade e 18,2% não aqueciam a água para banho. O gráfico presente na Figura 2 contém o resultado da pesquisa.

Figura 2: Fonte utilizada para aquecimento de água para banho



Fonte: ELETROBRÁS/PROCEL, 2007.

No âmbito nacional os chuveiros elétricos representam cerca de 18% do pico de demanda do sistema e 6 % de todo consumo nacional de eletricidade, da ordem de 22 TWh/ano, conforme a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (2011). Nesse caso, é importante incentivar o programa de desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e inovadoras para o aquecimento de água para banho, bem como sua compatibilização com a tecnologia de aquecimento solar, em especial para habitações de

interesse social. Trazendo-se benefícios para o setor elétrico, com a redução da demanda e consumo de energia e facilitando a incorporação dos sistemas solares em programas habitacionais governamentais.

Segundo dados fornecidos pela ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) à Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (2011), o mercado brasileiro para sistemas de aquecimento solar de água está em expansão. No ano de 2009, o mercado de aquecimento solar chegou à marca de 798 mil m² de novos coletores instalados e a área total instalada no Brasil era de 5,273 milhões de m².

O crescimento anual registrado em 2009 foi de 18,9% com relação ao ano de 2008, pouco acima do crescimento registrado entre 2007 e 2008, que ficou próximo de 17% a.a. De acordo com a Agência Internacional de Energia – IEA (2008), os números absolutos de área coletora instalada no Brasil eram de 4,5 milhões de m², e conferiam ao Brasil o sétimo lugar entre os países com maior capacidade instalada de sistemas de aquecimento solar de água, com aproximadamente 3,4 GWh.

Conforme a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (2011), tomando-se por base dados de 2009, a marca de 5,3 milhões m² é traduzida nos seguintes indicadores, de acordo com a ABRAVA, demonstrando a importância do aquecimento solar para o país, a saber:

- Número de domicílios com aquecimento solar de aproximadamente 1.057.000 (1,8 % dos domicílios);
- Demanda de energia (potência) retirada da ponta: 597 MW;
- Economia anual de energia: 920 GWh;
- Investimentos evitados pelo setor elétrico da ordem de R\$ 1,84 bilhão;
- Redução da emissão de CO₂ podem ser da ordem de 86.000 t CO₂.

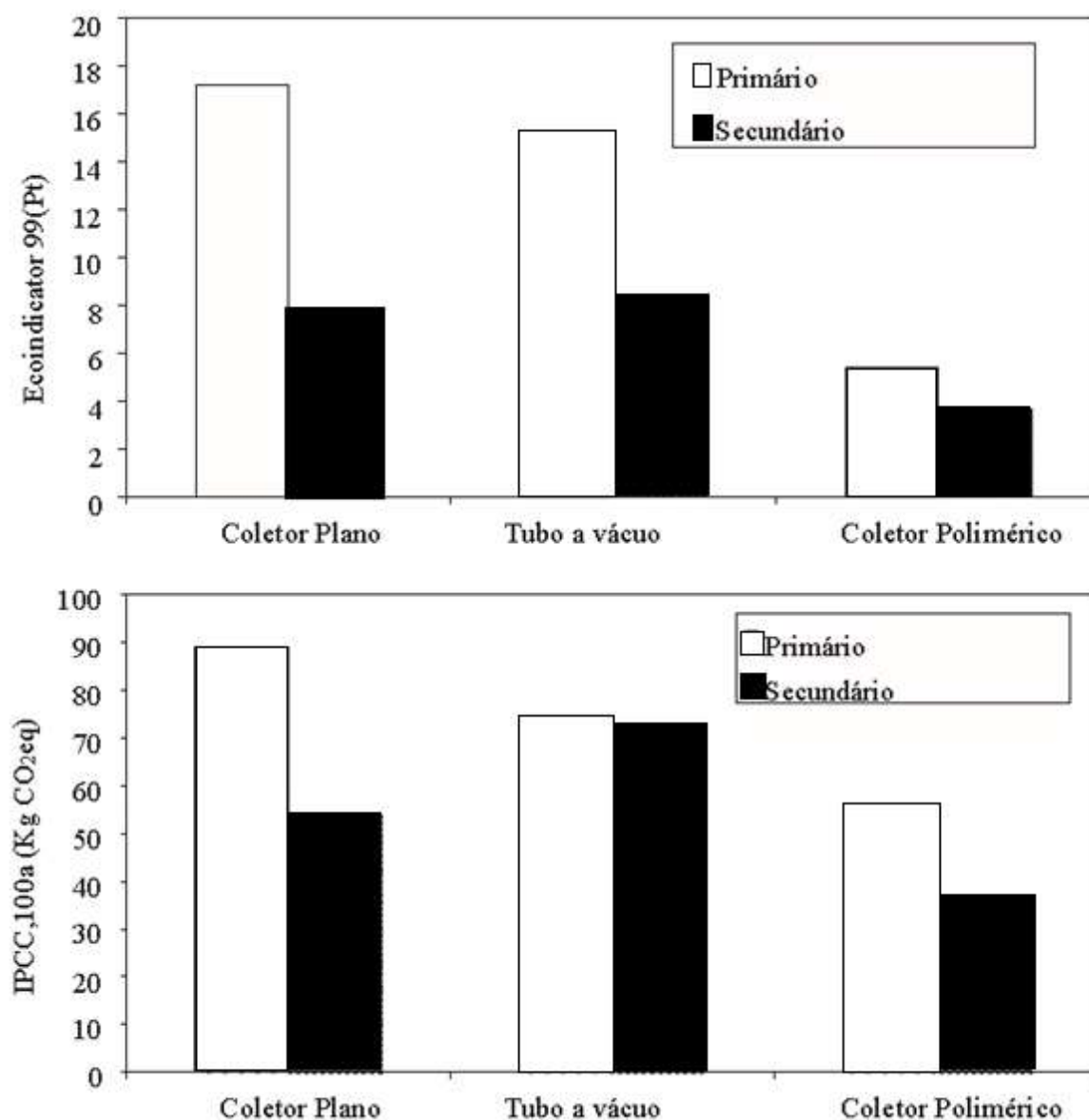
4.3 Coletor solar térmico

A norma ABNT 15747-1 Sistemas solares térmicos e seus componentes, conceitua coletor solar como dispositivo projetado para absorver a radiação solar e transferir a energia térmica produzida para o fluido que passa pelo equipamento. A radiação solar incidente na superfície do coletor varia de acordo com o horário solar e ângulos de instalação do mesmo, podendo atingir aproximadamente 1100 W/m² durante o meio dia solar, em comprimento de onda que varia de 0,3 a 3μm (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Os coletores solares planos podem fornecer energia em temperaturas moderadas, até 100°C acima da temperatura ambiente, sendo aplicados em unidades de aquecimento solar de água, aquecimento predial, ar condicionado e aquecimento industrial (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Os coletores solares de base polimérica, quando comparados aos coletores convencionais, possuem vantagens em relação ao custo, bem como tem menor peso, fator significativamente presente na instalação do coletor, que facilita a instalação em lugares de difícil acesso (TSILINGIRIS, 2000). Considerando os custos ambientais, Carlsson *et al.* (2014) realizaram estudo de caso comparando coletores solares poliméricos com coletores solares de placa plana e coletores solares de tubo a vácuo. Para a comparação, foi adotada a abordagem de contabilidade de custo total por meio da avaliação do ciclo de vida. Os resultados indicam claramente que o sistema coletor solar polimérico é o melhor em termos climáticos e ambientais. O desempenho foi expresso em termos dos indicadores IPCC 100a e Ecoindicator 99. O indicador IPCC 100a é usado para avaliar o desempenho climático dos sistemas de produção de energia. O resultado é expresso como a quantidade de gases de efeito estufa emitida para a atmosfera durante a produção da unidade de energia. No método Ecoindicator 99, o impacto ambiental é avaliado em termos de danos à saúde humana, à qualidade do ecossistema e aos recursos. Na Figura 3, apresenta-se o gráfico com os resultados de Carlsson *et al.* (2014), em que são comparados três tipos de coletores solares térmicos: coletores planos, de tubo a vácuo e poliméricos. Estes são comparados na condição primária (matéria prima virgem), e na condição secundária (metais reciclados). No gráfico superior é apresentado o índice Ecoindicator 99, enquanto no gráfico inferior o índice IPCC. É possível observar que coletores solares produzidos em materiais poliméricos possuem menor impacto ambiental. No estudo de Carlsson não foi considerada a possibilidade de que o polímero seja de fonte reciclada.

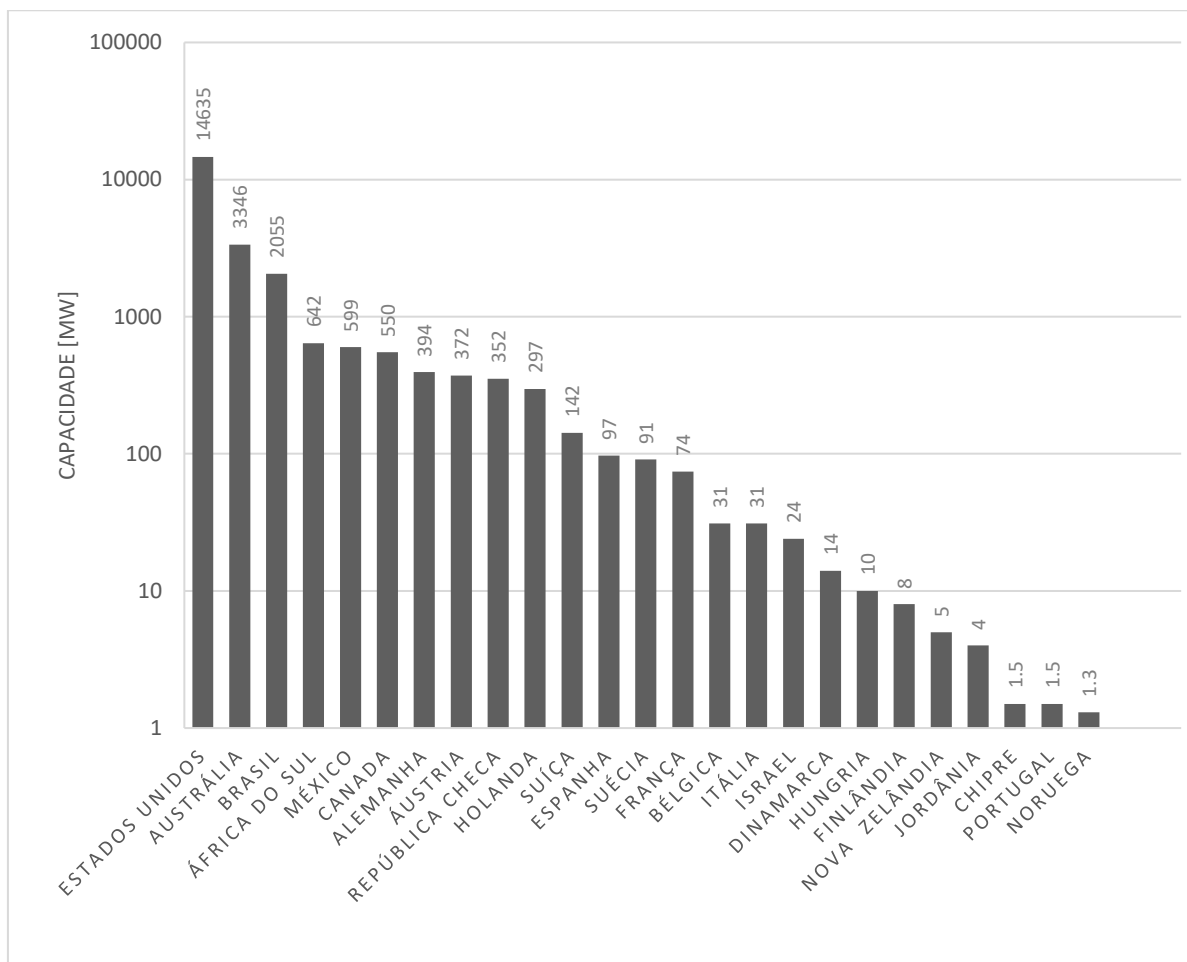
Figura 3: Comparação do impacto ambiental para a produção de 1m² de coletores solares



Fonte: Adaptado de Carlsson *et al* (2014).

Absorvedores de material polimérico para aquecimento de piscinas são produzidos desde o início da década de 1970. O coletor de energia solar sem cobertura, usado para este tipo de aplicação é o sistema ideal para o uso de materiais de baixo custo, tal como polímeros. O alto volume de produção traz vantagens na confecção de coletores poliméricos, reduzindo custos de produção e padronizando modelos (LEITÃO; MACAGNAN; ROCHA, 2018). Eles representam a tecnologia com a maior capacidade instalada nos EUA e Austrália em termos de potência térmica Figura 4.

Figura 4: Capacidade instalada total de coletores de energia sem cobertura em 2013



Fonte: Adaptado Leitão *et al* (2018).

Coletores de energia solar de alto desempenho construídos com materiais poliméricos são o maior desafio, atualmente, do ponto de vista tecnológico, devido ao potencial de mercado que se tem à disposição.

Segundo Leitão; Macagnan; Rocha (2018), nos últimos 10 anos, diversos estudos foram realizados, tentando melhor eficiência em coletor de energia solar plano de alto desempenho. Diversos tipos de polímeros foram estudados, tanto para a cobertura como para o absorvedor, que são as duas partes do coletor com maior número de pesquisas realizadas, nas quais busca-se sempre obter características essenciais para poder se equiparar ao coletor de energia solar convencional que geralmente utiliza tubos de cobre para o absorvedor e vidro para a cobertura. As principais características que se buscam no absorvedor são relacionadas ao desempenho térmico, sua absorbância e refletância, além de, principalmente, sua resistência às condições de operação.

Um dos problemas básicos na seleção de materiais poliméricos apropriados para a utilização em coletores solares está relacionado à falta de requisitos funcionais e de desempenho bem definidos dos componentes e aos requisitos de propriedade do material empregado. Um dos aspectos cruciais do uso de materiais poliméricos em sistemas solares térmicos é o conhecimento exato sobre as cargas, especialmente no que diz respeito às variações de temperatura e pressão. Os materiais poliméricos possuem propriedades térmicas limitadas em comparação com os materiais atuais mais utilizados (cobre, alumínio ou vidro) (THOMAS, ROBERT e CHRISTIAN, 2016).

A norma ABNT NBR 15747-1 estabelece como requisito de segurança que os materiais utilizados na fabricação de coletores devem ser selecionados considerando a temperatura de estagnação do equipamento. A temperatura de estagnação de um coletor solar é a temperatura que o absorvedor atinge em condição de fluido interno parado (vazão interna nula), radiação global no plano do coletor de 1000 W/m^2 e temperatura do ar ambiente de 30°C .

A eficiência de coletores solares é definida como a razão entre o ganho útil de energia no período de tempo e a energia solar incidente no mesmo período, sendo calculada pela Equação (1) (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G dt} \quad (1)$$

Em que G representa a taxa de energia solar no plano do coletor (W/m^2), A_c é a área do coletor (m^2) e Q_u é o ganho útil de energia (W). A área do coletor é determinada como o produto do comprimento e largura do mesmo. O ganho útil de energia é determinado através do balanço de energia entre a entrada e a saída do coletor por meio da Equação(2).

$$Q_u = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2)$$

Sendo $\dot{m}$ a vazão mássica do fluido interno coletor (kg/s), C_p o calor específico a pressão constante do fluido aquecido e ΔT a diferença de temperatura do fluido de saída e de entrada do coletor. A eficiência térmica também pode ser determinada pela Equação(3).

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (3)$$

Sendo F_R o fator de remoção de calor do coletor, $\tau\alpha$ o produto transmissividade

absortividade do sistema do coletor, U_L o coeficiente global de perda de calor do coletor e T_a a temperatura ambiente e T_e a temperatura de entrada do fluido (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A seleção de materiais poliméricos apropriados e rotas de tecnologia de processamento de polímeros aplicados em coletores solares está relacionado à falta de requisitos funcionais e de desempenho e aos requisitos de características do material no nível de amostra (RAMSCHAK, HAUSNER e FINK, 2016).

4.4 Polímeros

Os Polímeros são compostos orgânicos quimicamente baseados no carbono, no Hidrogênio e em outros elementos não metálicos. São formados por macromoléculas construídas pela repetição de pequenas unidades químicas relativamente simples, compostas por ligações primárias (Covalentes) (ZANIN e MANCINI, 2009).

Os Polímeros termoplásticos constituem a classe de materiais poliméricos, formados por cadeias lineares ou ramificadas, em que as macromoléculas são unidas entre si por ligações secundárias (Van Der Wall). Na medida que a temperatura é elevada, as forças destas ligações diminuem devido ao maior movimento das moléculas, tornando o polímero maleável quando aquecido e endurecido quando resfriados (CALLISTER, 2008). Quando aquecidos, podem ser transformados por meio de processos como: moldagem, extrusão e injeção.

A degradação é qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que causa modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos. Segundo De Paoli as reações químicas que ocorrem durante a degradação são: cisão (ou quebra) de ligações na cadeia principal ou em grupos laterais, reticulação, eliminação ou substituição de cadeias laterais, reações intermoleculares, auto oxidação e despolimerização, sendo que estas reações podem ter origem devido às condições térmicas, fotoquímicas, mecânicas, radiação, química ou *stress cracking* (DE PAOLI, 2009). O processo de degradação sempre se inicia com o rompimento de ligações covalentes, gerando radicais livres.

A estabilidade térmica para utilização dos polímeros orgânicos ocorre na faixa de 100°C a 200°C (DE PAOLI, 2009), pois em temperaturas superiores a 200°C o polímero sofre decomposição.

4.4.1 ABS

O Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) compreende a família de resinas prontamente processáveis usadas para produzir produtos que exibem excelente tenacidade, boa estabilidade dimensional e boa resistência química (MARK, 2004).

O ABS é formado, geralmente, por polibutadieno ou um copolímero de butadieno, disperso em matriz termoplástica de estireno e copolímero de acrilonitrila. Segundo Mark (2004), por se tratar de mistura multifásica (copolímero) os efeitos da composição e estrutura no ABS são complexos e interdependentes, mas é possível aproximação inicial, sendo a fase borracha a base de butadieno responsável pela tenacidade, o estireno contribuindo para a rigidez e processabilidade e a fase acrilonitrila contribuindo para a resistência química.

O comportamento do ABS pode ser associado a partir dos grupos funcionais presentes no polímero. (MARK, 2004). O ABS possui caráter polar devido ao grupo nitrilo, reduzindo sua interação com solventes de hidrocarbonetos, óleos minerais e vegetais, ceras e materiais domésticos e comerciais relacionados. Porém, as condições de moldagem podem afetar significativamente a resistência química. Certas combinações de temperatura de fusão, taxa de preenchimento e pressão de compactação podem reduzir significativamente a resistência à tensão de quebra (MARK, 2004).

O ABS sofre autooxidação e as características cinéticas da reação de consumo de oxigênio, segundo Mark (2004), são consistentes com o mecanismo de cadeia de radicais livres auto catalítico. A oxidação do polibutadieno resulta na fragilização da borracha, devido à reticulação e à introdução de grupos oxidados polares, resultando na redução de resistência ao impacto. Sua degradação química por oxidação ocorre apenas na superfície externa com aproximadamente 0,2 mm de espessura.

A Degradação foto-oxidativa resulta em coloração amarelada e perda de resistência ao impacto, causada principalmente pela exposição prologada sob luz com comprimentos de onda entre 300 e 360nm, e o descolorimento máximo de espécies de coloração amarela ocorre com exposição a comprimentos de onda na região de 475 a 485nm (MARK, 2004).

4.5 Compósitos

Para Rezende *et al* (2011), materiais compósitos são a combinação de dois ou mais materiais macroconstituintes distintos, com interface bem definida entre eles, com o objetivo de obter propriedades específicas. Cada um dos constituintes mantém suas propriedades

físicas e químicas, embora o material resultante apresente propriedades superiores.

Em compósitos poliméricos com nano tubos de carbono os valores de condutividade elétrica, e por conseguinte térmica, podem ser aumentados com pequenas quantidades de aditivo. Porém, para Kuester (2013), problemas com dificuldade de dispersão e distribuição e custos elevados, apresentam-se como desvantagens relevantes para sua utilização. Ao passo que o grafite, disponível em grande quantidade e com baixo custo, mostra-se como alternativa interessante para produção em massa de compósitos condutores.

Dentre as cargas termicamente condutoras disponíveis, pode-se destacar o negro de fumo; as nanofibras de carbono; as partículas metálicas; as nanofibras condutoras e os polímeros intrinsecamente condutores. As propriedades finais dos compósitos de matriz polimérica são definidas pela matriz polimérica, a carga utilizada e a técnica de processamento para obtenção do compósito.

4.5.1 Influência da matriz polimérica na condutividade

A tensão superficial, a cristalinidade, a polaridade das moléculas e o peso molecular são propriedades dos polímeros que mais afetam a quantidade de aditivos necessários para formar a rede percolada (SILVA, 2013). A concentração necessária para atingir a percolação tende a aumentar com o aumento da tensão superficial do polímero; quanto maior a tensão superficial do polímero, menor será a tensão interfacial polímero/carga.

A baixa tensão interfacial permite que toda a carga seja embebida pela matriz, resultando em melhor distribuição; logo, maior quantidade de carga será necessária para que a rede percolada seja formada. O tamanho das cadeias poliméricas afeta a percolação, desfavorecendo-a à medida que o peso molecular aumenta. Isso porque longas cadeias aumentam a distância entre as cargas, requerendo maior concentração de carga para que a percolação seja atingida (SILVA, 2013).

4.6 Radiação

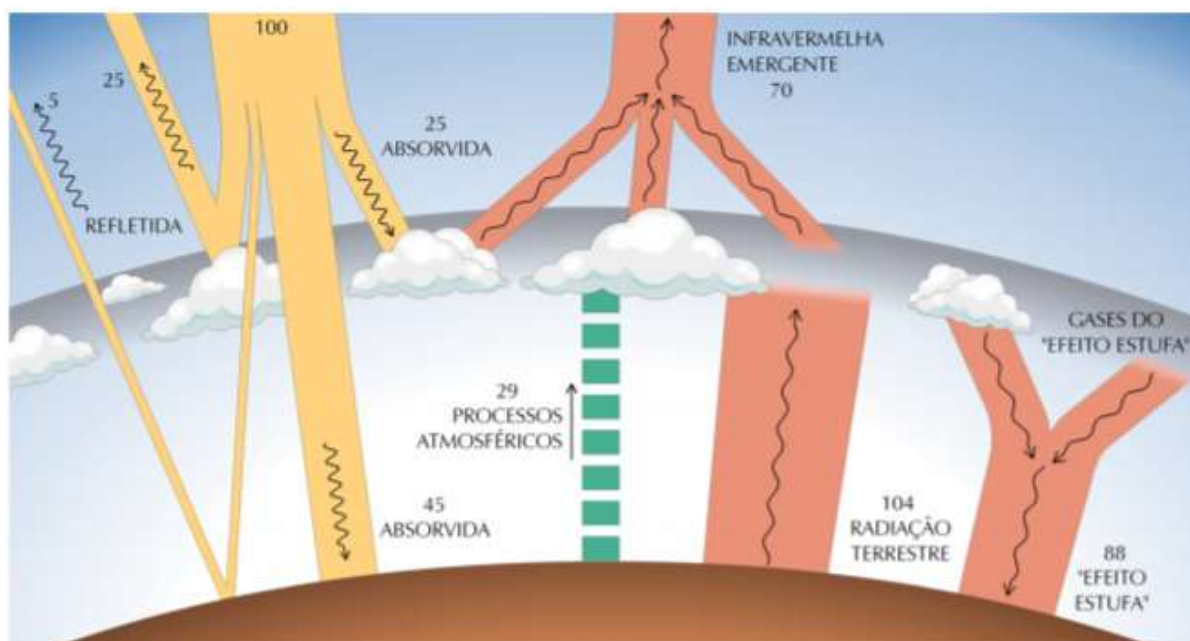
Segundo Incropera *et al.* (2008), a radiação é o mecanismo de transferência de calor que ocorre entre corpos, sem a necessidade de contato físico entre as superfícies. A taxa de transferência de calor varia com a diferença de temperatura entre as superfícies elevado à quarta potência da temperatura, sendo o fenômeno dominante entre corpos em temperatura elevada, como é o caso entre o Sol e a Terra.

Toda a matéria está continuamente emitindo energia radiante como resultado da vibração térmica das partículas (elétrons, íons, átomos e moléculas) dos quais é composto. Este processo é chamado de radiação térmica, e a energia radiante assim emitida é chamada de energia térmica radiante. Cada corpo sólido não está apenas emitindo continuamente energia térmica radiante, mas também está continuamente sendo bombardeado pela energia radiante dos corpos em seus arredores, onde algumas dessas energias oriundas desses corpos são absorvidas. A taxa líquida de transferência de calor por radiação para, ou a partir, do corpo é igual à diferença nas taxas de emissão e absorção. As propriedades da radiação térmicas são caracterizadas pela emitância, refletância, absorção e transmitância do material (TOULOUKIAN e DEWITT, 1972).

O comportamento térmico do material metálico é caracterizado principalmente pelo movimento de elétrons livres sob a influência do campo de radiação. Os elétrons livres são forçados a oscilar na frequência do campo induzido, e submetido à força de amortecimento viscosa, proporcional à velocidade dos elétrons acelerados, decorrentes de colisões com a rede atômica. O comportamento térmico no material não-metálico é caracterizado principalmente pelo movimento de elétrons ligados elasticamente à rede, decorrente da influência do campo de radiação. Estes elétrons, oscilando na frequência do campo induzido, são submetidos à força de amortecimento elástica e viscosa que surge da rede (TOULOUKIAN e DEWITT, 1972).

A energia emitida pelo Sol é aproximadamente $3,86 \times 10^{26} \text{W}$, com temperatura efetiva em sua superfície de 5778K (5505°C) (PEREIRA *et al*, 2017). A distância entre a Terra e o Sol é de aproximadamente $1,50 \times 10^8 \text{km}$, que resulta em fluxo de radiação solar (irradiância solar) média de 1366W/m^2 , definido como a constante solar. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar é atenuada por processos físicos de espalhamento e absorção, devido aos constituintes atmosféricos e à superfície do planeta. Na Figura 5 são mostrados os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica no sistema Atmosfera-Terra. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera.

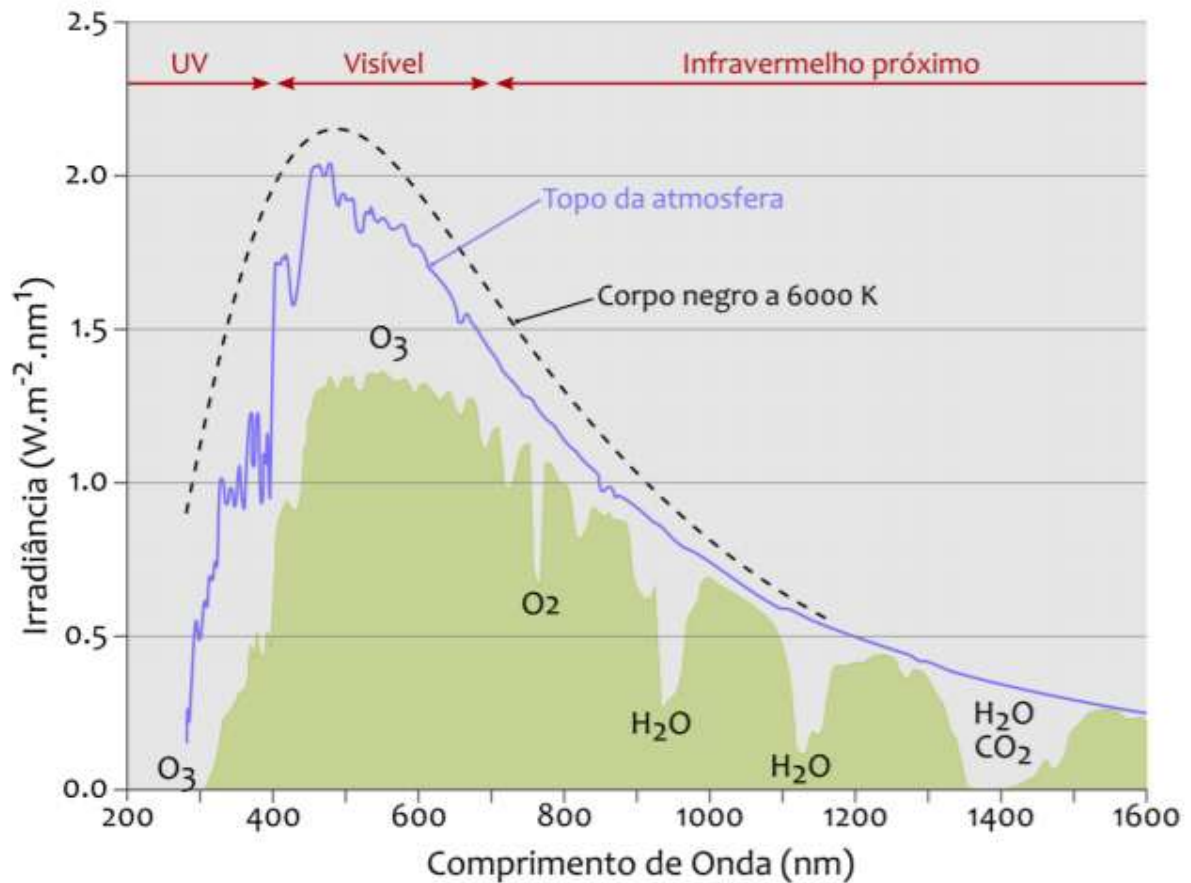
Figura 5: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre



Fonte: Pereira *et al* (2017).

A dispersão da radiação é causada pela interação da radiação com as moléculas de ar, água (vapor e gotículas) e poeira. O grau de dispersão ocorre em função do número de partículas, através das quais a radiação deve passar, e do tamanho das partículas em relação a λ , o comprimento de onda da radiação. A absorção de radiação pela atmosfera no espectro de energia solar é devido em grande parte ao ozônio na região do ultravioleta e ao vapor de água e dióxido de carbono em bandas na região do infravermelho (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Há absorção quase completa da radiação de ondas curtas pelo ozônio na atmosfera superior em comprimentos de onda abaixo de $0,29\mu\text{m}$. Absorção do ozônio diminui conforme λ aumenta acima de $0,29\mu\text{m}$, até $0,35\mu\text{m}$ onde não há absorção. Há também fraca absorção pelo ozônio na faixa perto de $\lambda = 0,6\mu\text{m}$. O vapor de água absorve fortemente em bandas na região do infravermelho do espectro solar, com bandas de absorção fortes centradas em $1,0$, $1,4$ e $1,8\mu\text{m}$. Além de $2,5\mu\text{m}$, a transmissão da atmosfera é muito baixa devido à absorção por H_2O e CO_2 . A distribuição espectral da radiação solar é mostrada no gráfico da Figura 6.

Figura 6: Espectro eletromagnético da radiação solar



Fonte: Pereira *et al* (2017).

4.7 Condutividade térmica

Condutividade térmica (k) é a propriedade que quantifica a habilidade do material em transferir calor da região de alta temperatura para outra de baixa temperatura. (CALLISTER, 2008). Esta propriedade pode ser expressa por meio da lei de Fourier em sistemas permanentes sem geração de calor interno apresentada na Equação (4).

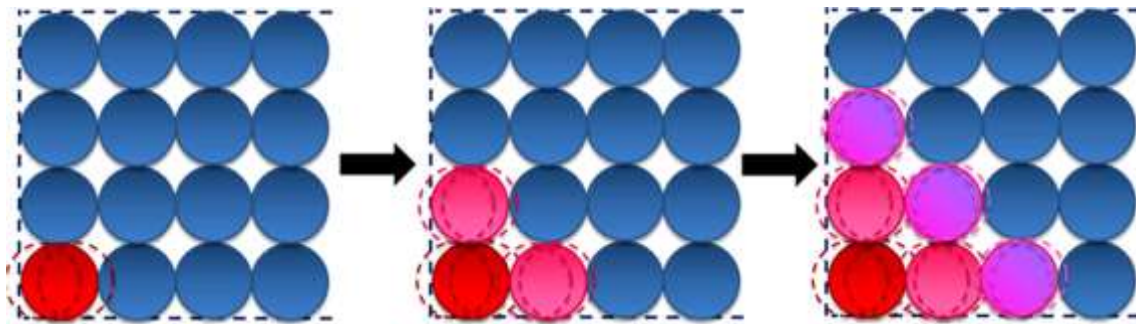
$$\dot{q} = -k\nabla T = -k\left(\hat{i}\frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (4)$$

Em que $\dot{q}$ é o fluxo de calor local, k é a condutividade térmica do material e ∇T é o gradiente de temperatura. Sendo expresso pelos vetores unitários $\hat{i}$, $\hat{j}$ e $\hat{k}$ para coordenadas

cartesianas.

A condutividade térmica consiste no transporte de energia térmica pela propagação da energia vibracional dos átomos. Nos materiais sólidos, esta vibração constante é caracterizada por frequências muito altas e amplitudes relativamente pequenas (CALLISTER, 2008). Essas vibrações são transferidas aos átomos adjacentes através de suas ligações atômicas. A propagação pode ser considerada como onda elástica que se propaga através do cristal na velocidade do som. Apenas certos valores de energia são propagados, em um único *quantum* de energia vibracional que é chamado de Fônon. A forma de propagação em ondas da energia vibracional (Fônons), em sólidos cristalinos, é mostrada de maneira planar e simplificada na Figura 7.

Figura 7: Condução em materiais cristalinos



Fonte: Burger *et al* (2016).

O transporte de energia térmica nos materiais sólidos ocorre devido a dois efeitos distintos: A migração de elétrons livres e ondas vibracionais na rede. Quando vistos como fenômeno de partículas, os *quanta* da rede são chamados de *fônons* (INCROPERA *et al*, 2008). Nos materiais metálicos puros a contribuição dos elétrons é dominante (KITTEL, 2006). Nos materiais não-condutores e semicondutores, a contribuição do transporte de energia térmica por *fônons* é dominante. Quando ambos os fenômenos estão presentes a condução de calor em sólidos pode ser descrita por meio da soma de ambos os fenômenos, conforme Equação (5).

$$K = K_e + K_f \quad (5)$$

Em que K_e é a parcela da condutividade térmica referente ao movimento dos elétrons e K_f a parcela referente a vibração dos *fônons*. Segundo Incropera *et al.* (2008), a teoria cinética fornece a expressão para determinar a condutividade térmica dos materiais, sendo a Equação

(6) utilizada para a determinação da condutividade para a parcela de transporte de energia devido ao mecanismo de elétrons livres e a Equação (7) para o transporte de energia através de *fônons*.

$$K_e = \frac{1}{3} C_e \bar{c}_e \lambda_e \quad (6)$$

$$K_f = \frac{1}{3} C_f \bar{c}_f \lambda_f \quad (7)$$

Em que C_e é o calor específico do elétron; $\bar{c}_e$ é a velocidade média do elétron; λ_e é o livre percurso médio do elétron; C_f é o calor específico do *fônons*; $\bar{c}_f$ é a velocidade média do som no material e λ_f é o livre percurso médio do *fônons*.

4.7.1 Condução de calor em polímeros

A maioria dos materiais poliméricos possuem uma banda de valência preenchida, separada de uma banda de condução vazia por espaçamento em geral superior a 2eV. Desta forma, poucos elétrons podem ser excitados através do espaçamento entre estas bandas (CALLISTER, 2008). A ausência de elétrons livres em materiais polímeros faz com que o fenômeno de condução de calor seja realizado pela vibração e rotação das moléculas da cadeia (propagação de *fônons*), sendo que o grau de cristalinidade do material influencia na capacidade de conduzir calor. O polímero com estrutura altamente cristalina, irá apresentar condutividade superior ao mesmo material com estrutura amorfa. Na Tabela 1 são apresentados valores típicos da condutividade térmica de alguns materiais poliméricos, enquanto na

Tabela 2, são apresentadas as condutividades térmicas de alguns materiais não poliméricos.

Tabela 1: Condutividade térmica de alguns materiais poliméricos

Material	Condutividade Térmica a 25°C [W/m K]
Polietileno de alta densidade (PEAD)	0,44
Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	0,33
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	0,30
Nylon-6 (PA6)	0,25
Policarbonato (PC)	0,20
Resina epóxi	0,19
Poliestireno (PS)	0,14
Politereftalato de etileno (PET)	0,15
Polipropileno (PP)	0,11

Fonte: Han e Fina, (2010) adaptado.

Tabela 2: Condutividade térmica de algumas cargas condutoras

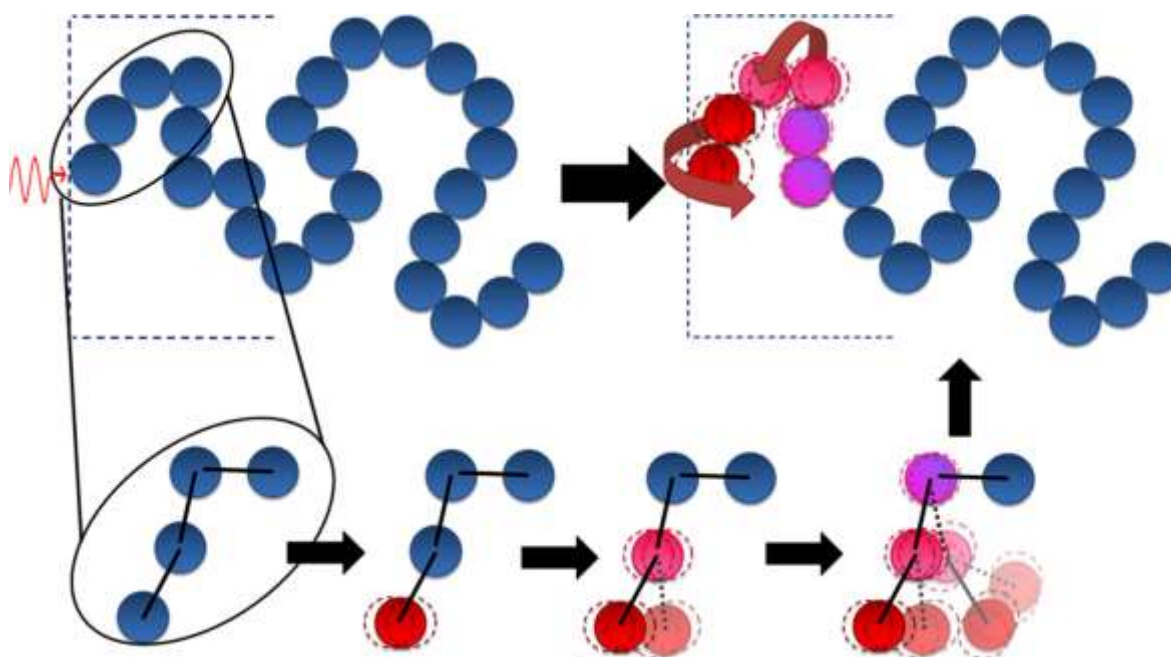
Material	Condutividade Térmica a 25°C [W/m K]
Nano tubo de Carbono	2000~6000
Diamante	2000
Grafite	100~400 (No plano)
Negro de Fumo	6~174
Cobre	483
Alumínio	204

Fonte: Han e Fina, (2010) adaptado.

Polímeros amorfos apresentam livre percurso médio de *fônon* ($\overline{\lambda_f}$) extremamente pequeno, na ordem de 10^{-10} m, causado pelo espalhamento de *fônons* nas imperfeições estruturais, levando à reduzida condutividade térmica (k) em polímeros (HAN e FINA, 2010).

A forma de propagação de *fônons* em polímeros amorfos é mostrada na Figura 8. Por serem compostos de estruturas lineares, a propagação do calor ocorre no sentido da cadeia principal (ligação covalente), sendo reduzida nas cadeias laterais (Van Der Waals).

Figura 8: Condução em polímeros amorfos



Fonte: Burger *et al* (2016).

A condutividade térmica dos materiais poliméricos depende de diversos fatores, tais como: constituintes, força de adesão, tipo de estrutura, grupo lateral, peso molecular, distribuição da densidade molecular, tipo e existência de defeitos ou falhas estruturais, massa molecular, condições de processamento e temperatura (HAN e FINA, 2010).

A cristalinidade do polímero afeta fortemente a sua condutividade térmica. Em polímeros semicristalinos existem relatos sobre o aumento da condutividade térmica com o aumento da cristalinidade. No entanto, existe grande dispersão nos dados experimentais de condutividade térmica de cristais poliméricos, incluindo até alguns resultados contraditórios.

O espalhamento de fônons na interface entre a fase amorfa e a fase cristalina torna a previsão da variação da condutividade térmica com elevado grau de complexidade em relação a cristalinidade apresentada conforme Han e Fina (2010).

Apesar da condutividade térmica ser muito limitada nos polímeros termoplásticos, existem diversas razões em se querer aumentar a condutividade térmica de materiais poliméricos para várias aplicações industriais, incluindo placas de circuitos elétricos em eletrônica de potência, trocadores de calor, aparelhos eletrônicos e máquinas.

4.7.2 Condução em compósitos de matriz polimérica

Cargas à base de carbono parecem ser as melhores promessas para enchimentos leves e que favorecem o aumento da condutividade térmica (HAN e FINA, 2010). O grafite, a fibra de carbono e o negro de fumo são alguns exemplos de cargas à base de carbono mais conhecidas comercialmente. O grafite é um dos melhores enchimento por causa de sua boa condutividade térmica, baixo custo e dispersibilidade junto a matriz polimérica (HAN e FINA, 2010).

Folhas de grafeno apresentam condutividade térmica da ordem de 800W/m K ou superiores (teoricamente é possível alcançar condutividade de 5300W/m K), determinado, pela alta condutividade térmica da grafita, na faixa de 100 a 400W/m K (HAN e FINA, 2010).

O grafite expandido é a forma esfoliada de grafite com camadas de 20–100nm de espessura, também tem sido usado em compósitos poliméricos, nos quais a condutividade térmica depende do grau de esfoliação e da dispersão na matriz.

Fibra de carbono é tipicamente composta por geometria anular paralela ao eixo da fibra, propriedades condutoras térmicas ao longo do eixo da fibra são significativamente diferentes em relação à direção transversal (estimado até 2000W/m K na direção axial, sendo que na direção transversal é estimado entre 10–110W/m K), afetando diretamente a condutividade térmica de compósitos alinhados.

Partículas de negro de fumo são agregados de carbono, na forma de micro cristais, com tamanho característico de suas partículas na faixa de (10 a 500nm) e área de superfície entre (25 e 150m²/g). Este componente pode contribuir para a condutividade elétrica em vez da condutividade térmica.

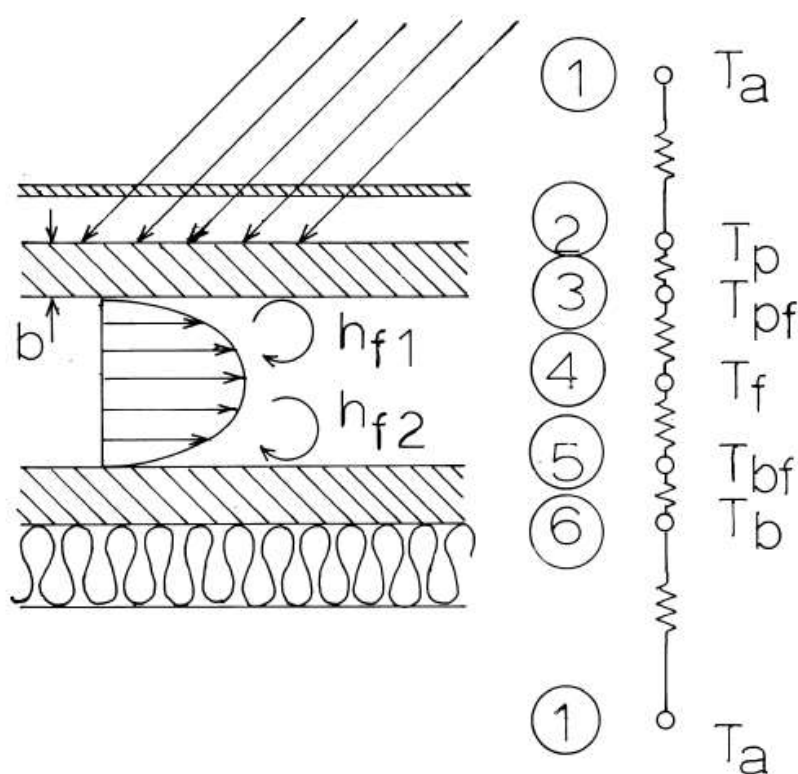
4.8 Modelo térmico absorvedor solar

A análise térmica proposta por Tsilingiris (2000), desenvolvida para absorvedor polimérico, abrange modelos de topo escuro. O fluxo de calor de condução é considerado na direção perpendicular ao plano do absorvedor de modo unidimensional. A espessura do absorvedor é considerada desprezível em relação ao comprimento. Além disso, efeitos bidimensionais nos coletores são assumidos como insignificantes.

No modelo de Tsilingiris (2000), o absorvedor polimerico encontra-se dentro da estrutura fechada, contendo isolamento térmico na parte inferior do absorvedor e cobertura de vidro na parte superior. O calor absorvido é parcialmente dissipado ao meio ambiente por

convecção e radiação através do sistema de envidraçamento superior. O calor também é transferido por condução através da espessura da placa de polímero e por convecção o calor é transferido ao fluido por baixo. Convecção e condução de transferência de calor também são responsáveis pelas perdas de calor subsequentes do fluido aquecido para o meio ambiente através da convecção térmica do isolamento do absorvedor. A Figura 9 contém a seção transversal do absorvedor com suas respectivas resistências térmicas, em que T_a é a temperatura ambiente, T_p a temperatura do topo do absorvedor, T_{pf} a temperatura do topo do fluido, T_f a temperatura média do fluido, T_{bf} a temperatura na base do fluido e T_b a temperatura na base do absorvedor. O item b é a espessura do absorvedor e h_{f1} e h_{f2} correspondem ao coeficiente de convecção entre o fluido e o absorvedor.

Figura 9: Modelo unidimensional de transferência de calor para coletor solar



Fonte: Tsilingiris (2000).

Algebricamente Tsilingiris (2000) obteve a Equação (8) para o cálculo do calor útil em coletores solares poliméricos.

$$q = \frac{1}{1 + U_t \cdot \left(\frac{1}{k_{p/b}} + \frac{1}{h_{f1}} \right)} \cdot \left[G - \left(U_t + U_b \cdot \frac{h_{f2} \cdot \left(U_t + h_{f1} + h_{f1} \cdot \frac{U_t}{k_{p/b}} \right)}{h_{f1} \cdot \left(U_b + h_{f2} + h_{f2} \cdot \frac{U_b}{k_{p/b}} \right)} \right) \cdot (T_f - T_a) \right] \quad (8)$$

Considerando o modelo de Hottel-Willier-Bliss (HWB) apresentado por Duffie e Beckman (Equação (9)), considerado que $h_{f1} = h_{f2} = h_f$ e que U_t e U_b são muito menores que h_f , obtém-se a Equação (10).

$$q = F' \cdot [G - U_L \cdot (T_f - T_a)] \quad (9)$$

$$q = \left[\frac{1}{1 + U_t \cdot \left(\frac{1}{k_{p/b}} + \frac{1}{h_f} \right)} \right] \cdot [G - (U_t + U_b) \cdot (T_f - T_a)] \quad (10)$$

4.9 Modelagem da condução térmica em compósitos

A abordagem proposta por Chen *et al.* (2016) considera dois casos limites: regra de mistura linear (também conhecida como modelo paralelo) e regra de mistura inversa (geralmente chamada de modelo de série). O modelo paralelo fornece o limite superior e o modelo de série, o limite inferior. No modelo paralelo, a fase dispersa e a matriz contribuem, independentemente da condutividade térmica, em relação à proporção de suas frações volumétricas. A Equação (11) apresenta o modelo em paralelo em que k_c é a condutividade térmica do compósito, k_p é a condutividade térmica do polímero, k_a a condutividade térmica do aditivo e ϕ é a fração volumétrica do aditivo.

$$k_c = (1 - \phi)k_p + \phi k_a \quad (11)$$

O modelo paralelo maximiza a contribuição da fase de enchimento e assume o contato perfeito entre as partículas numa rede totalmente percoladora implicitamente (CHEN,

GINZBURG, *et al.*, 2016). Resultado em condutividades elevadas para compósitos não fibrosos.

O modelo de série é mais aplicável para compósitos onde os enchimentos são dispersos numa matriz e não há percolação mesmo em frações de alto volume de carga (CHEN, GINZBURG, *et al.*, 2016). A condutividade térmica é dada pela Equação (12).

$$kc = \left[\frac{(1 - \phi)}{kp} + \frac{\phi}{ka} \right]^{-1} \quad (12)$$

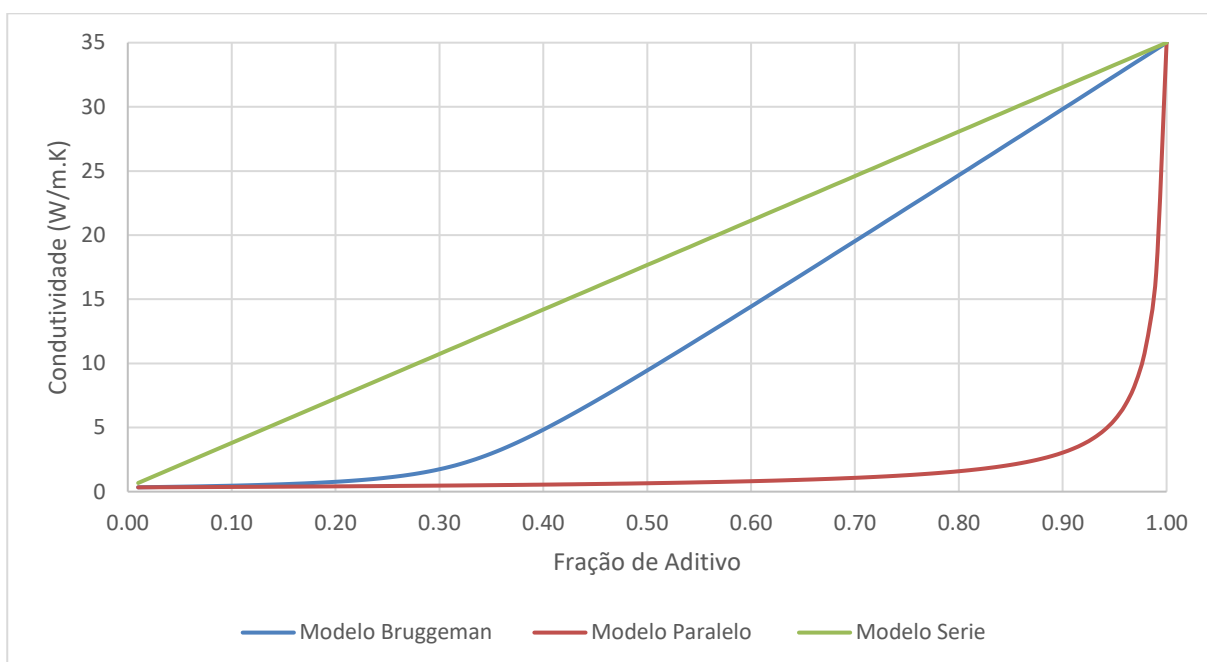
A maioria dos resultados experimentais é encontrada entre os modelos serie e o modelo paralelo (CHEN *et al.* 2016).

Para esses tipos de compósitos binários contendo matriz e enchimento em forma de partículas esféricas o modelo de Bruggeman fornece descrição muito melhor. Neste modelo, a abordagem de campo médio é usada para capturar as interações entre os preenchimentos distribuídos aleatoriamente. Este pode ser determinado por meio da solução iterativa da Equação(13).

$$\phi \left(\frac{ka - kc}{ka + 2kc} \right) + (1 - \phi) \left(\frac{kp - kc}{kp + 2kc} \right) = 0 \quad (13)$$

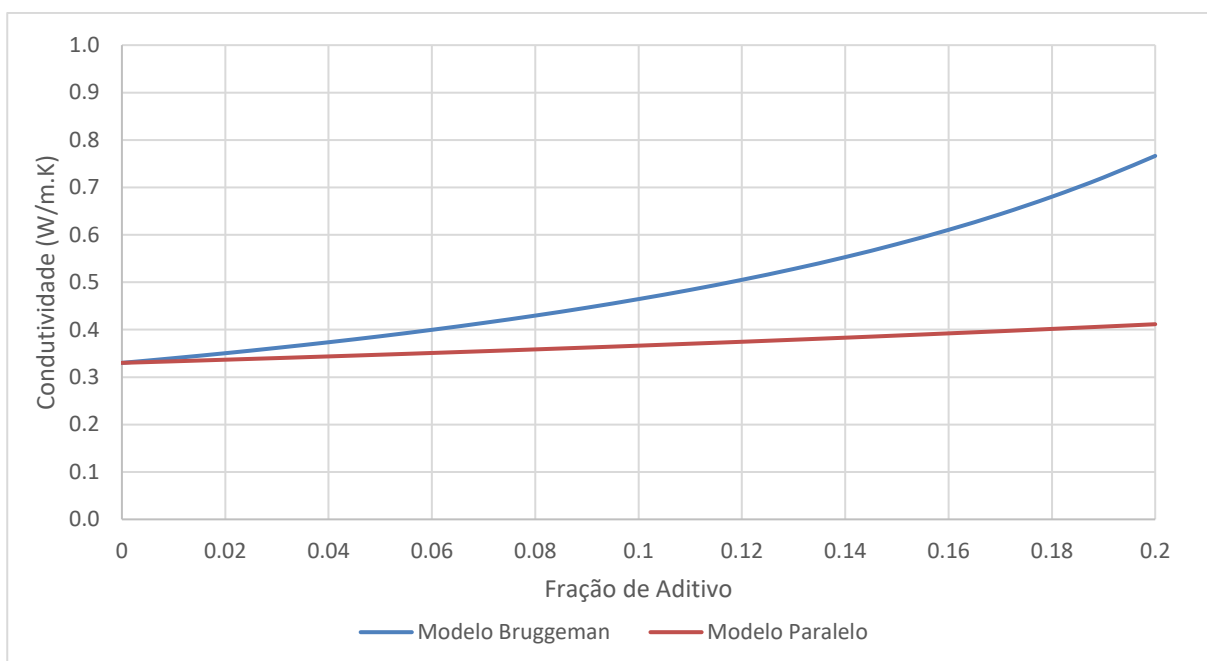
As Figuras Figura 10 e Figura 11 contém o gráfico resultante do modelo de condução térmica em série, paralelo e de Bruggeman, considerando grafite com condutividade térmica de 35 W/m K disperso em polímero com condutividade 0,33 W/m K.

Figura 10: Comparativo modelos de condução térmica 0 a 100%



Fonte: Autor.

Figura 11: Comparativo modelos de condução térmica 0 a 20%



Fonte: Autor.

4.10 Medição condutividade térmica

A Tabela 3 contém os principais métodos normalizados para a medição da condutividade térmica dos materiais.

Tabela 3: Principais métodos normatizados para mediação da condutividade térmica

Métodos		Faixa de temperatura (K)	Faixa de condutividade (W/m K)	Incerteza	Materiais	Normas
Estado Permanente	Placa quente Isolada	80–800	<0,8	2%	Vidro, polímeros, materiais de isolamento	ASTM C177 ISO 8302 EN 12667
	Escoamento Axial	90–1300	0,2–200	2%	Polímero, cerâmica, metais	ASTM E1225
	Medição do fluxo de calor	253–523	<10	3%	Vidro, polímeros, materiais de isolamento, cerâmica	ASTM C 518 ASTM E1530 ISO 8301 EN 12667
	Fluxo de calor radial	293–2770	0,02–200	2%	Metais, inorgânicos de alta condutividade, compósitos poliméricos	ISO 8497
Estado Transiente	Flash laser	373–3273	>0.01	3–5%	Vidros, polímeros, cerâmica, metais	ASTM 1461 ISO 22007-4
	Fio quente	293–2273	<25	1–10%	Vidros, polímeros, cerâmicas, a maioria dos líquidos, gás, pós	ASTM-C 1113 ISO 8894-1 ISO 8894-2
	Fonte Plana	20–1273	0,005–1800	5%	Materiais de isolamento, pós, polímeros, cerâmicas, metais, líquidos	ISO 22007-2

Fonte: Chen *et al.* (2016) Adptado.

O método do fluxo de calor radial utiliza a amostra na forma de cilindro circular direito com furo central coaxial, que contém o aquecedor ou o dissipador de calor, caso o fluxo de calor desejado seja radialmente para fora ou para dentro. O efeito das perdas de calor

das extremidades da amostra é minimizado usando a amostra longa e monitorando a energia elétrica dentro apenas de pequena parte da amostra longe das extremidades (TOULOUKIAN *et al.*, 1971).

Temperaturas dentro da amostra são medidas por termopares ou por pirômetro óptico (TOULOUKIAN *et al.*, 1971).

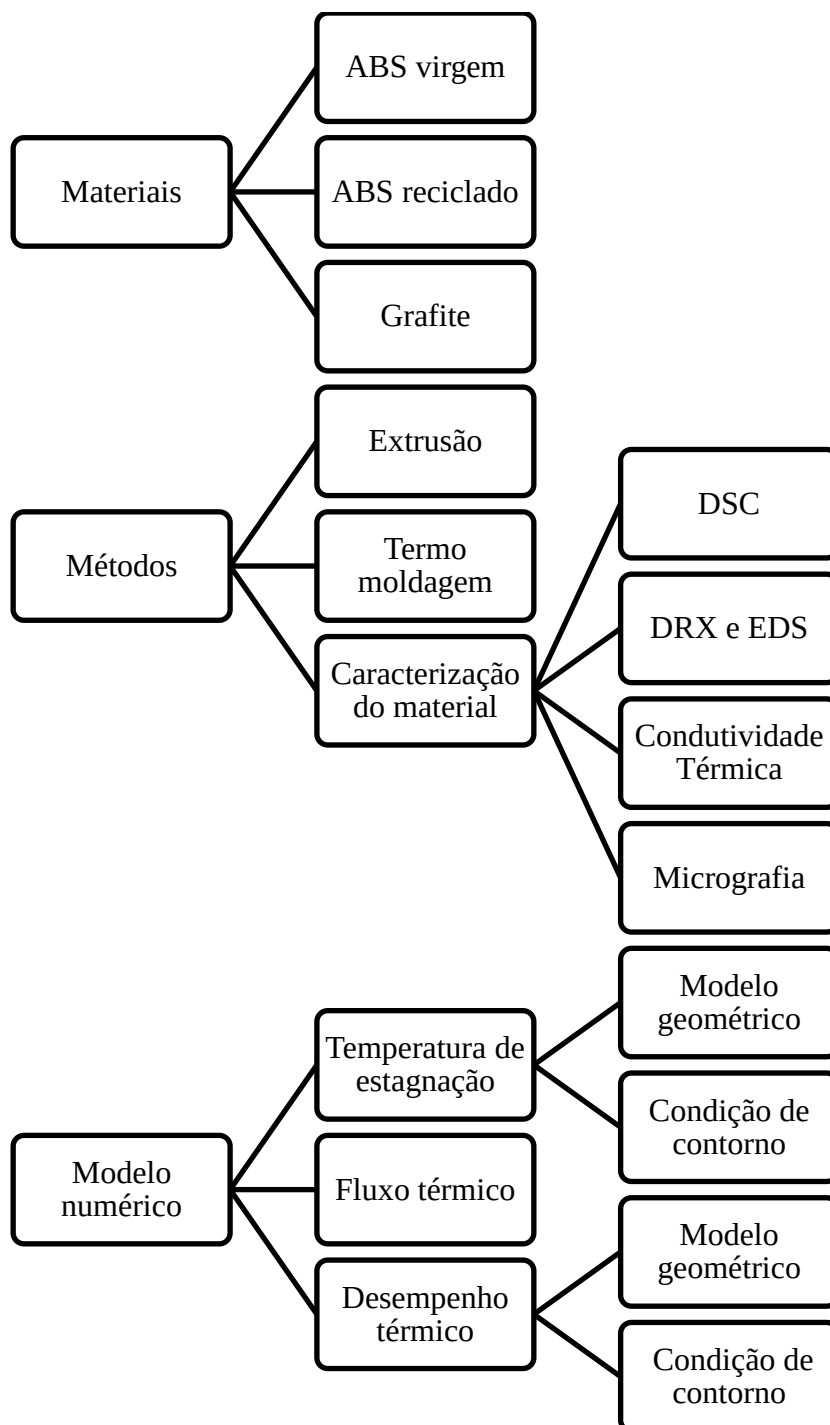
A condutividade térmica é calculada a partir da Equação (14).

$$k = \frac{q \ln \left(\frac{R_e}{R_i} \right)}{2 \pi L \Delta T} \quad (14)$$

5 METODOLOGIA

A seguir são apresentados os materiais e métodos de processamento e caracterização dos compósitos desenvolvidos. O fluxograma, presente na Figura 12, contém as principais etapas desenvolvidas desde a produção de corpos de prova a sua caracterização.

Figura 12: Fluxograma das etapas de trabalho



Fonte: Autor.

5.1 Materiais

Os materiais utilizados na formulação são ABS de origem virgem e reciclada e aditivos a base de carbono.

5.1.1 ABS virgem

O ABS virgem é da marca *Nature Works*, comercializado na forma de *pellets* pela empresa 3DLab. Apresenta-se no formato cilíndrico com média de 3,5mm de comprimento e 2,5mm de diâmetro. Na Tabela 4, apresentam-se algumas propriedades mecânicas e térmicas do ABS virgem segundo a 3DLab.

Tabela 4: Propriedades do ABS virgem

Densidade	1,04[g/cm ³]
Temperatura de Fusão	220[°C]
Tg	100[°C]
Tensão de escoamento	38[Mpa]
Resistencia a Flexão	66[Mpa]
Modulo de elasticidade	2200[Mpa]
Dureza	74[Shore D]
Temperatura HDT	86,13[°C]

Fonte: 3DLab.

5.1.2 ABS reciclado

O ABS reciclado foi fornecido pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, mais especificamente pelo Laboratório de Ciência e Tecnologia de Polímeros – LCTP, proveniente de reaproveitamento de descarte de equipamentos eletrônicos. O material reciclado apresenta resistência à tração de 40Mpa, conforme ensaios relatados por (COSTA e RODRIGUES, 2017).

5.1.3 Grafite

O grafite utilizado foi produzido pela Nacional Grafite, modelo Grafine 72140. Conforme o fabricante, a linha de produtos Grafine é composta por grafite natural cristalino, com tamanho médio de partícula inferior a 150µm (100 *mesh* ASTM) e teor de carbono que varia entre 72,0% a 99,9%.

Na Tabela 5, são apresentadas as características do grafite modelo Grafine 72140, com dados fornecidos pela Nacional Grafite. O item “G” refere-se a valores mínimos garantidos pelo fabricante enquanto o item “T” os valores típicos encontrados.

Tabela 5: Características do grafite utilizado

		Parâmetros									
		% Carbono (LOI)				% Cinzas			% Umidade		
Grafine 72140		G	≥ 72,0				≤ 28,0			≤ 0,3	
		T	77,9				22,1			0,2	
Tamanho da malha		Retido Acumulado em %									
Malha ASTM	100#	140#	200#	325#	Granulometria Laser				Densidade	BET – ASE	
µm	150	106	75	45	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	Densidade Aparente (g/pol ³)	(m²/g)		
Grafine 72140	G	-	≤ 5,0	-	-	-	-	-	-	-	
	T	0,6	2,7	8,7	16,5	14	42	88	6,2	5,3	

Fonte: Nacional Grafite.

5.2 Métodos

A seguir são apresentados os métodos realizados para a produção de corpos de prova.

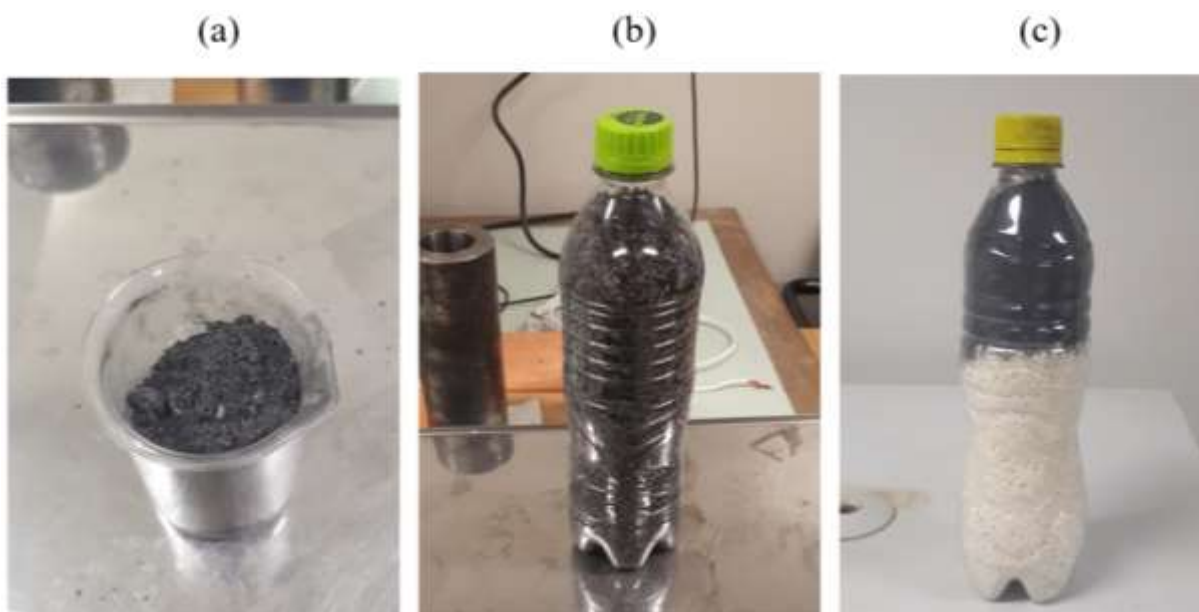
5.2.1 Extrusão

O processo de extrusão foi utilizado para misturar o ABS com grafite. A extrusora plástica utilizada, modelo Rheomex 19/25 QC, produzida pela Thermo Electron e disponibilizada pelo Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química (PPGMQ-MG) CEFET-MG Campus VI.

A mistura do grafite com o ABS reciclado foi realizada através da homogeneização nas proporções de 1%, 2,5%, 5%, 10% e 20%. Para o ABS virgem foram usadas as proporções de 1%, 2,5%, 5% e 10% de grafite. O ABS e o grafite foram dispersos diretamente

no funil de alimentação da extrusora. Na Figura 13 apresenta-se a preparação das misturas antes de serem processadas. A parte (a) contém o grafite em pó, a parte (b) contém 300g de ABS reciclado e a parte (c) contém a mistura de ABS virgem e grafite em pó antes de ser extrudada.

Figura 13: Mistura de ABS virgem e grafite em pó antes de ser extrudada

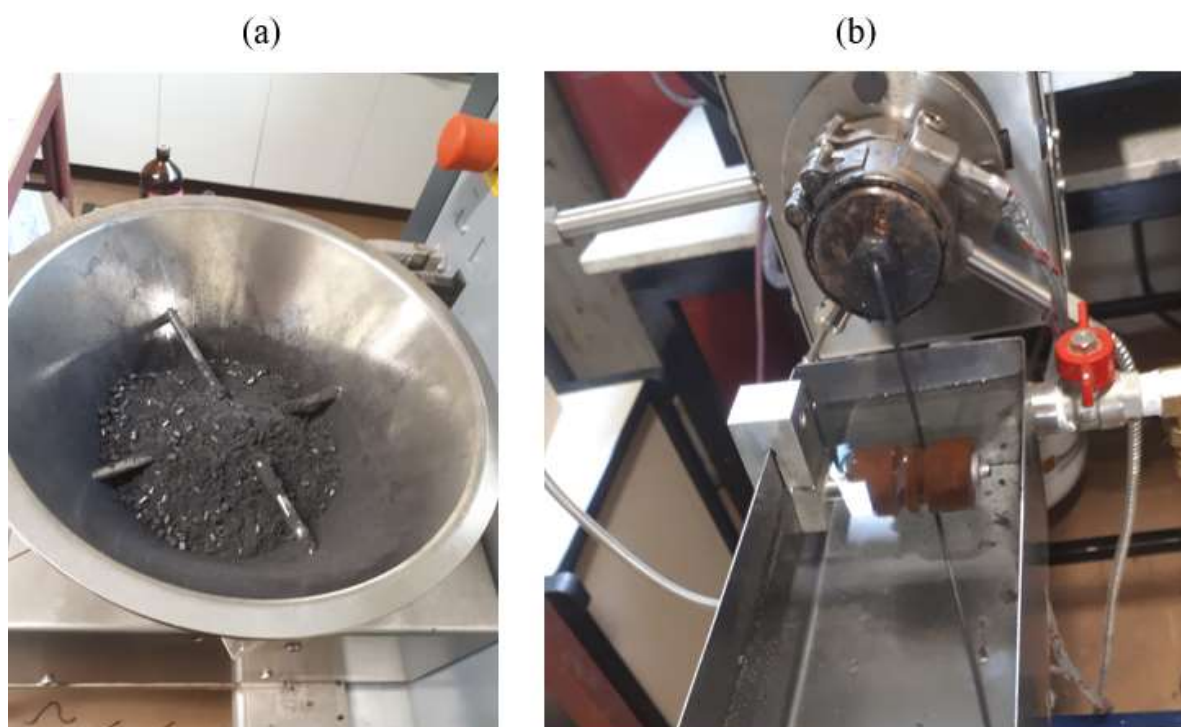


(a) Grafite em pó (b) ABS reciclado (c) ABS virgem misturado com grafite

Fonte: Autor.

Para o processamento do material na extrusora, foi selecionada a temperatura na faixa de 200°C a 260°C em todas as zonas de aquecimento do canhão de extrusão. Utilizou-se a velocidade de na faixa de 10rpm a 20rpm e pressão na faixa de 6 a 7bar. A temperatura de saída do filamento foi de aproximadamente 245°C, variando na faixa de $\pm 10^\circ\text{C}$ durante a confecção do material. Na Figura 14 é apresentada a entrada da mistura de grafite e ABS e a saída do filamento, sendo (a) o funil de entrada onde são adicionados os *pellets* do material em conjunto com o aditivo e (b) o bocal de saída em que o compósito polimérico é retirado.

Figura 14: Processamento do material realizado em extrusora plástica

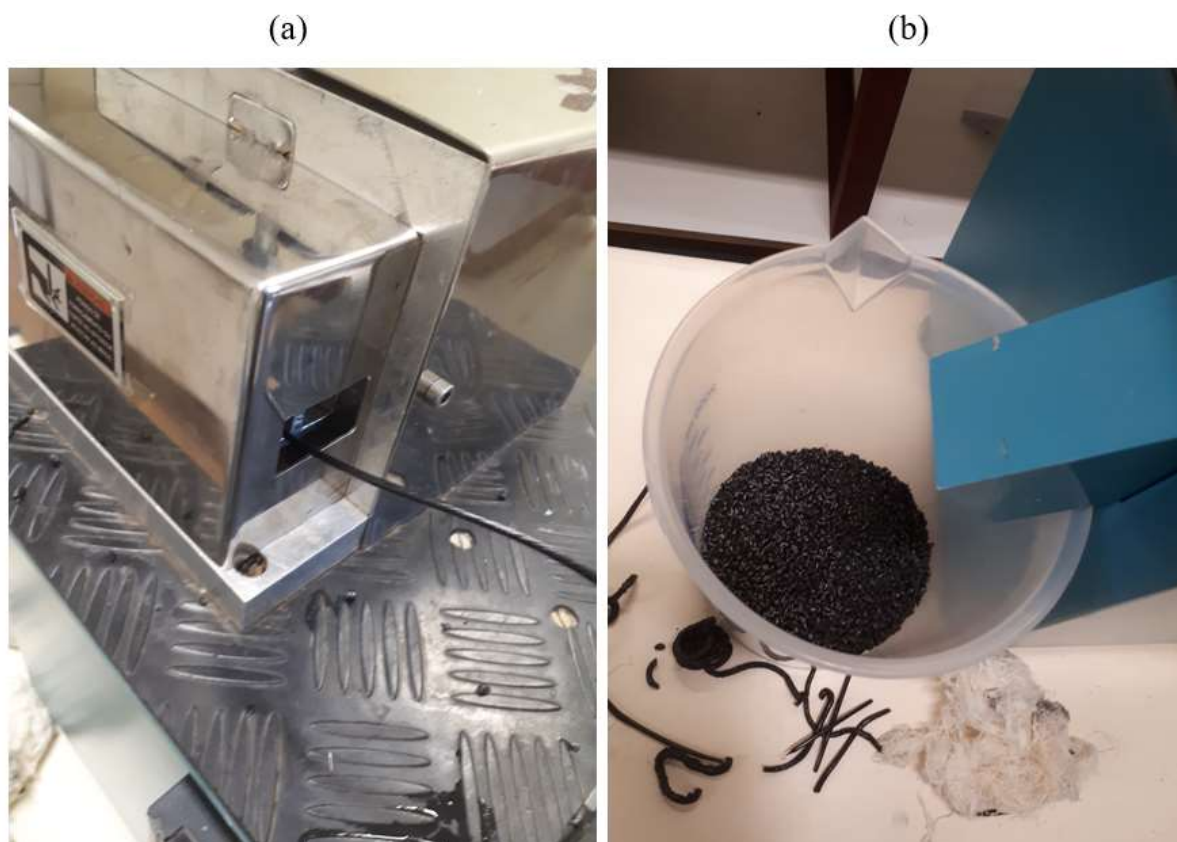


(a) Funil de entrada contendo pellets de ABS e grafite (b) bocal de saída

Fonte: Autor.

Após a formação dos “fios” dos compósitos ABS/grafite, foi realizada a moagem para geração de novos *pellets*. Na Figura 15 apresenta-se a moagem e os *pellets* obtidos. Para a moagem dos *pellets* foi utilizada a velocidade de 70Hz e estes foram formados com comprimento médio de 3mm.

Figura 15: Processo de moagem dos filamentos



(a) Moagem do fio dos compósitos ABS/Grafite e (b) pellets formados

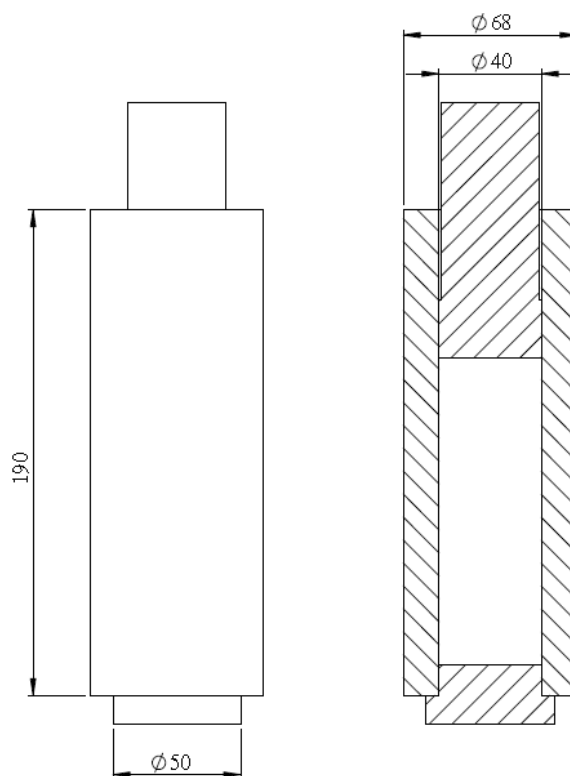
Fonte: Autor.

5.2.2 Termo moldagem

A confecção de corpos de provas cilíndricos foi realizada por meio do processo de moldagem. Os *pellets* do material foram colocados dentro do molde (150 gramas) e aquecidos em estufa. O aquecimento ocorreu em duas etapas, sendo a primeira entre 180°C e 220°C, com duração de 20 minutos e em seguida à temperatura 230°C por 20 minutos. Em seguida, o material foi removido da estufa e prensado com carga de 5 a 10 toneladas.

A peça extraída apresenta formato cilíndrico com 40mm de diâmetro. Para facilitar a remoção das peças do molde, é aplicada a camada de desmoldante spray à base de silicone nas faces internas do molde. As principais dimensões do molde são apresentadas na Figura 16, em que são apresentadas as vistas frontal e lateral em corte total. A peça superior é utilizada para prensar, comprimindo os *pellets* de material aquecido para que seja gerada a peça cilíndrica após resfriada ao ar.

Figura 16: Desenho de conjunto do molde em vista frontal e corte total



Fonte: Autor.

5.2.3 Caracterização do material

Para avaliar os compósitos gerados, foram realizados micrografias, ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC), fluorescência de raio X (EDX), difração de raio X (DRX) e medição da condutividade térmica por fluxo radial.

5.2.3.1 Micrografia

As micrografias foram realizadas a partir dos corpos de prova termo moldados. Foram retidas amostras para análises, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram previamente metalizadas em ouro, durante 60 segundos, com corrente de 3mA. Foi utilizado o equipamento *Quick Coater* modelo SC701 da marca *Sanyu Electron*. As imagens foram obtidas através do Microscópio de Varredura Eletrônico modelo Superscan SSX-550, fabricado pela Shimadzu disponibilizado no laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Matérias do CEFET-MG (DEMAT) *Campus I*.

5.2.3.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A análise DSC é utilizada para verificar mudanças físicas ou químicas, observando a variação de entalpia entre polímero em análise e um material padrão inerte, enquanto ambos são aquecidos à mesma taxa de aquecimento. A partir dos picos gerados, é possível determinar a temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de cristalização (T_c) e temperatura de fusão (T_f) do polímero. Também é possível medir o calor específico (C_p) do polímero.

Os testes foram realizados no equipamento modelo DSC-60, fabricado pela Shimadzu, disponibilizado no laboratório de Caracterização de Materiais, do Departamento de Engenharia de Matérias do CEFET-MG (DEMAT), *Campus I*. Foi utilizado cadinho de alumínio e atmosfera de nitrogênio. A velocidade de aquecimento é de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, iniciando na temperatura de 50°C e terminado com temperatura de 250°C . Foram testadas amostras de 5 a 10mg de cada composição obtida, sendo executado o ciclo de aquecimento/resfriamento anterior à análise, com objetivo de remover características térmicas provenientes do processamento do material.

5.2.3.3 DRX e EDS

Com o objetivo de verificar a composição e as fases presentes no aditivo utilizado, grafite, foram realizados os ensaios de difração de raio X (DRX) e fluorescência de raio X (EDX). O DRX foi realizado no difratômetro Maxima XRD-7000, fabricado pela Shimadzu, disponibilizado no laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Matérias do CEFET-MG (DEMAT), *Campus I*. O ensaio de fluorescência de raio X (EDX), foi realizado no equipamento modelo EDX-720, fabricado pela Shimadzu disponibilizado no laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Matérias do CEFET-MG (DEMAT), *Campus I*.

5.2.3.4 Condutividade térmica

Para a realização da medição das condutividades térmicas dos corpos de prova, foi realizado um furo com 10mm de diâmetro no centro de cada corpo de prova, por onde foi inserido o resistor elétrico de aquecimento. Em cada corpo de prova foi realizado um furo de

3mm de diâmetro, perpendiculares à geratriz do cilindro, na metade do comprimento do corpo de prova, por onde se insere um termopar tipo k. Na superfície externa foi colocado o termopar para medição da temperatura. Na Figura 17 é apresentado o corpo de prova contendo os termopares e o resistor interno.

Figura 17: Corpo de prova para medição da condutividade térmica



Fonte: Autor.

A partir da medição das temperaturas interna e externa, foi calculada a condutividade térmica do material. Foi aplicada tensão elétrica de 32V (corrente contínua), durante 2 horas. Sendo realizadas medições de temperatura na superfície interna e externa do corpo de prova, em intervalos de 15 minutos. As medidas consideradas para cálculo são a média das últimas 3 medições (equivalentes ao tempo de 90, 105 e 120 minutos após o início do aquecimento), referentes ao tempo necessário para o início do regime permanente. Para as medições de temperatura, foi utilizado o termômetro digital Kkmoon modelo de 4 canais, que apresenta resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e incerteza de 1°C , com confiabilidade de 95%. Na Figura 18 é apresentado o termômetro Kkmoon de 4 canais ao lado da resistência elétrica utilizada para o aquecimento dos corpos de prova.

Figura 18: Termômetro e resistor elétrico utilizados



Fonte: Autor.

A partir da Equação (4) em coordenadas cilíndricas considerando a condução de modo unidirecional obtém-se a Equação (15) para distribuição da temperatura no interior de cilindros ocos.

$$T(r) = T_{se} + \Delta T \frac{\ln\left(\frac{r}{R_e}\right)}{\ln\left(\frac{R_{in}}{R_{ex}}\right)} \quad (15)$$

Sendo que T_{se} é a temperatura na superfície externa, ΔT a diferença entre a temperatura interna e externa do tubo, R_{in} o raio interno e R_{ex} o raio externo. Como os corpos de prova apresentam o raio interno de 5mm e raio externo de 20mm é possível simplificar a expressão obtendo-se a Equação (16) para determinação da distribuição de temperaturas na parede do corpo de prova em regime permanente e condução unidirecional.

$$T(r) = T_{se} - 0,721348 \Delta T \ln(50r) \quad (16)$$

Sendo que r varia de 0,005m a 0,02m distância entre a face interna e externa da superfície do corpo de prova. Para determinar a taxa de aquecimento em cilindro oco e utilizada a Equação (17).

$$q = \frac{2 \pi L k \Delta T}{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)} \quad (17)$$

Sendo L o comprimento do aquecedor. Para os testes, o aquecimento é realizado por meio de resistência elétrica com 100mm de comprimento. Assim, para se determinar a condutividade térmica do material (k) foi utilizada a Equação (14) nos corpos de prova obtidos, sendo que a taxa de aquecimento (q) é obtida pela Equação (18), sendo (V) a tensão elétrica e (R) a resistência elétrica. Simplificando as equações conforme características geométricas do corpo de prova consideradas, tem-se a Equação (19).

$$q = \frac{V^2}{R} \quad (18)$$

$$k = \frac{18,3296}{(T_{si} - T_{se})} \quad (19)$$

A Equação (19) foi usada para o cálculo da condutividade térmica dos materiais produzidos. A resistência de contato entre termopar e superfícies de mediação são desconsideradas, bem como seu acoplamento realizado por meio de fita adesiva.

5.3 Modelo numérico

Para determinar o efeito efetivo do material empregado, são aplicados modelos numéricos para avaliar o comportamento do coletor solar caso produzido com materiais de condutividade. Os modelos desenvolvidos são para coletores abertos (sem cobertura e isolamento térmico) composto por múltiplos tubos em paralelo de 6mm de diâmetro externo. São analisadas a temperatura de estagnação, o fluxo térmico e o desempenho térmico.

A análise da temperatura de estagnação tem por objetivo determinar a máxima temperatura que o material estaria exposto, sendo esta a condição mínima de temperatura que o material deve resistir. A análise de fluxo é realizada para compreender a influência da condutividade térmica do material e da espessura do material no fluxo de calor no interior do absorvedor. A análise de desempenho térmico é feita por meio da simulação de protótipo em 3D, aplicando condições de teste similares a norma ABNT 17747-2.

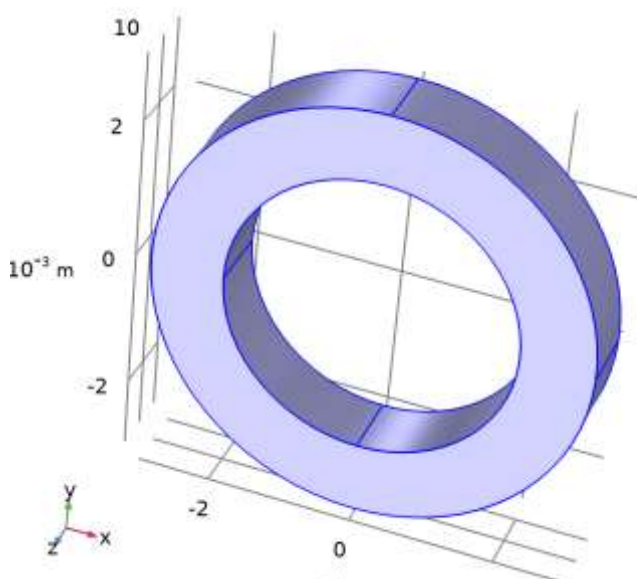
5.3.1 Temperatura de estagnação

A temperatura de estagnação é a temperatura atingida no absorvedor do coletor solar exposto à radiação de 1000W/m^2 , temperatura ambiente de 30°C e com condição de escoamento interno nulo. Para simular esta condição foi utilizado o *software Comsol Multiphysics* devida possibilidade de lidar com os processos de referência de calor por radiação em superfícies curvas.

5.3.1.1 Modelo geométrico temperatura de estagnação

O modelo geométrico é realizado em 3 dimensões, considerando um segmento do absorvedor do coletor genérico contendo 6mm de diâmetro externo e 4mm de diâmetro interno. A Figura 19 contém a geometria utilizada para análise de condução térmica.

Figura 19: Segmento de tubulação simulado no *software Comsol*



Fonte: Autor.

5.3.1.2 Condição de contorno para temperatura de estagnação

As condições de contorno aplicadas foram adotadas para representar a condição de estagnação e, por conseguinte, obter as maiores temperaturas a que o material estaria exposto. Foi considerada a condição de superfície isolada na superfície interna, de modo a considerar fluxo nulo de calor entre o coletor e a água. Por tratar-se de um trecho do absorvedor, foi

considerada a condição de simetria nas faces laterais. Na superfície externa foi aplicado modelo de convecção natural e radiação térmica.

A condição de contorno, referente à convecção externa, considera o modelo de convecção natural em cilindros horizontais conforme as Equações (20) e (21), para determinação do fluxo térmico. Foi considerado o cilindro de 6mm de diâmetro, envolto por ar padrão seco a pressão de 0,9atm (referente a pressão atmosférica em Belo Horizonte).

$$q'' = h (T_s - T_a) \quad (20)$$

$$h = \frac{k}{D} \left(0,6 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (21)$$

O fluxo de radiação externa foi determinado utilizando-se modelo de radiação *Surface-to-Surface Radiation*, sendo considerado corpo opaco com emissividade igual a 1. O fluxo de radiação foi considerado proveniente de termo-fonte à distância infinita do objeto por meio do vetor unitário [0i -1j 0k]. A banda espectral da fonte de energia (sol) ocorre na faixa de 0 a 2,5µm, sendo considerada a distribuição de Planck para corpo negro a temperatura de 5780K. O fluxo térmico enviado foi considerado como de 1000W/m². As trocas de calor por radiação para o ambiente foram desconsideradas.

Para a condutividade térmica do material foram usados valores obtidos nos testes de condutividade térmica, de modo a obter as temperaturas máximas que o polímero estaria exposto na condição de estagnação.

5.3.2 Fluxo térmico

O fluxo térmico foi obtido aplicando-se o modelo analítico apresentando por Tsilingiris (2000), com o auxílio do *software* EES (*Engineering Equation Solver*). Foram consideradas cargas de vento externa de 1m/s e velocidade de escoamento interno de água a 0,02m/s. A radiação solar considerada foi de 1000W/m².

O interior da tubulação apresenta escoamento de água, conforme modelo de convecção forçada apresentada na Equação (22), válida para regime laminar ($Re < 2500$). Enquanto a parte externa apresenta escoamento ao redor da tubulação com incidência de Ar a 1m/s e

pressão atmosférica considerada 0,9atm, conforme Equação (23).

$$h = 3,66 \frac{k}{D} \quad (22)$$

$$h = \frac{k}{D} \left(0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{2/3} \right)^{1/4}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right)^{4/5} \right) \quad (23)$$

Através de simplificação unidirecional, foi estimado o desempenho térmico em função da condutividade térmica do material e da espessura da parede do absorvedor.

5.3.3 Desempenho térmico

O cálculo do desempenho térmico dos coletores solares abertos, caso fossem produzidos nos materiais desenvolvidos, foi obtido em ambiente virtual, por meio de simulação no *software* Ansys-CFX. Para tal, foram utilizados dois domínios distintos, sendo um a parte sólida, cujas propriedades dependem dos materiais envolvidos e outra líquida, composta por escoamento interno de água. As simulações são baseadas na norma ABNT 15.747-2 (Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares Parte 2: Métodos de ensaio) sendo adotadas simplificações para realização em modelo virtual.

5.3.3.1 Modelo geométrico desempenho térmico

O modelo geométrico para determinação do desempenho térmico foi desenvolvido com base na geometria de coletores comerciais. O modelo de base é apresentado na Figura 20. O coletor é composto por 38 tubos de 6mm de diâmetro externo possuindo 1505mm de comprimento e 250mm de largura.

Figura 20: Coletor polimérico utilizado como base geométrica



Fonte: Autor.

5.3.3.2 Condições de contorno e desempenho térmico

As simulações foram executadas com vazão de água $0,015\text{kg/s}$, o equivalente a $0,4\text{kg/s}$ para cada metro quadrado de área coletora, e considerada a convecção natural na superfície externa com temperatura ambiente de 25°C . O fluxo térmico utilizado na superfície superior é de $636,62\text{W/m}^2$, por se tratar de uma superfície cilíndrica, esse fluxo equivale a 1000W/m^2 em superfície plana.

São desconsideradas as cargas de vento e perdas por radiação para o ambiente, sendo consideradas somente as perdas pela convecção natural. Para a determinação do coeficiente convectivo foi utilizado o modelo de convecção natural, ao redor de cilindros horizontais. Na Tabela 6 são apresentadas as condições de contorno utilizadas nas simulações. Para cada material testado, são realizadas 5 simulações variando a temperatura de entrada, conforme valores apresentados no item temperatura de entrada da Tabela 6. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor

Tabela 6: Condição de contorno nas simulações de desempenho térmico

Condições de Contorno	
Água	Entrada
	Tipo <i>Inlet</i>
	Direção do escoamento Normal a condição de contorno
	Regime de Escoamento Subsônico
	Temperatura de entrada Ponto 1=25°C Ponto 2=27,5°C Ponto 3=30°C Ponto 4=32,5°C Ponto 5=35°C
	Vazão 0,015056 kg/s
	Turbulência <i>K-Epsilon (k-ε)</i>
	Interface
	Transferência de calor Conservação do fluxo na interface
	Massa e Momento Sem Deslizamento
	Rugosidade da parede Parede Lisa
	Saída
	Tipo <i>Outlet</i>
	Regime de Escoamento Subsônico
	Pressão Relativa 0 Pa
	Água Padrão
	Tipo <i>Wall</i>
	Transferência de calor Adiabático
	Massa e Momento Sem Deslizamento
	Rugosidade da parede Parede Lisa
Coletor	Interface Fluido Solido
	Tipo <i>Interface</i>
	Transferência de calor Conservação do fluxo na interface
	Base Absorvedor
	Tipo <i>Wall</i>
	Transferência de calor Coeficiente de transferência de calor
	Coeficiente de transferência de calor $(1,20708 * (((T/1[K]-298,15)^2)^{(1/2)})^{(1/6)} + 1,12915)^2 [W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
	Temperatura externa 25°C
	Base Calha
	Tipo WALL

Transferência de calor	Coeficiente de transferência de calor
Coeficiente de transferência de calor	$(1,20708 (((T/1[K]-298,15)^2)^{(1/2)})^{(1/6)} + 0,342271)^2 [W m^{-2} K^{-1}]$
Temperatura externa	25°C
Topo Absorvedor	
Tipo	WALL
Transferência de calor	Coeficiente de transferência de calor
Coeficiente de transferência de calor	$(1,20708 (((T/1[K]-298,15)^2)^{(1/2)})^{(1/6)} + 1,12915)^2 [W m^{-2} K^{-1}]$
Temperatura externa	25°C
Topo Calha	
Tipo	WALL
Transferência de calor	Coeficiente de transferência de calor
Coeficiente de transferência de calor	$(1,20708 (((T/1[K]-298,15)^2)^{(1/2)})^{(1/6)} + 0,342271)^2 [W m^{-2} K^{-1}]$
Temperatura externa	25°C

Fonte: Autor.

Em condição analítica a Equação (10) é utilizada de modo que U_t e U_b são órbitos por meio de processo de integração de superfície da calota externa. O calor útil q , torna-se função das variáveis K_p , b e T_f e sua eficiência instantânea é determinada pela razão entre $q(k_p/b, T_f)$ de integração de superfície do fluxo de radiação, conforme apresentado na Equação (24).

$$\eta(k_p/b, T_f) = \frac{q(k_p/b, T_f)}{\oint G} \quad (24)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Processamento

O processo de extrusão do ABS junto ao grafite se apresenta eficaz em baixas concentrações de aditivos. Nos teores superiores a 5% de aditivo, os filamentos gerados se tornam muito quebradiços, dificultando assim o processo de moagem. A condição de 20%, somente foi possível para o ABS reciclado. Por tratar-se de lubrificante sólido, o grafite, nesta concentração, acaba dificultando o transporte dos *pellets* pela extrusora, deixando parte do material na parede, e aumentando o tempo de permanência em altas temperaturas.

O molde confeccionado foi utilizado no processo de fabricação dos corpos de prova e é composto de 3 peças, sendo fabricado de Aço ABNT-4140, por meio de torneamento e temperado. O molde é apresentado na Figura 21.

Figura 21: Molde para produção de peças cilíndricas

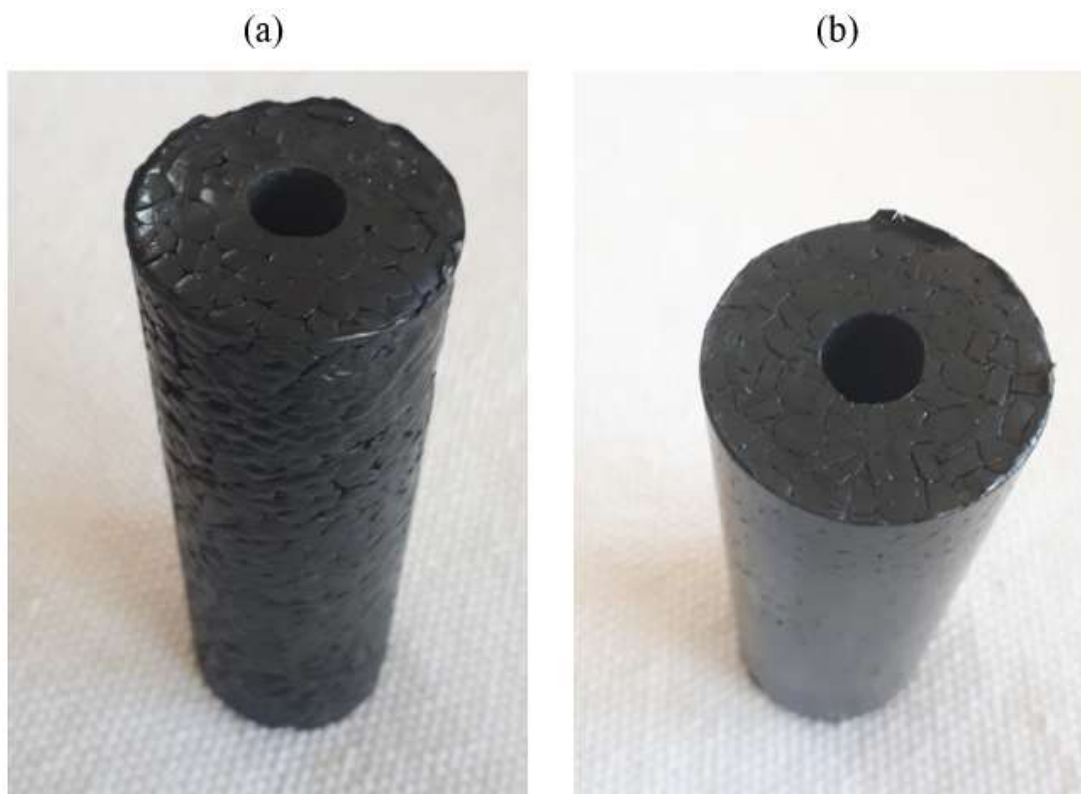


Fonte: Autor.

Caso as condições de tempo de aquecimento, temperatura de aquecimento e força de prensagem não sejam seguidos, os corpos de prova apresentarão características indesejadas,

tais como falta de fusão e falta de adesão. Na Figura 22 são apresentados alguns corpos de prova irregulares. No corpo (a) a força utilizada não foi suficiente para a adesão dos *pellets* em massa polimérica homogênea, e no corpo (b) a temperatura foi inferior de fusão do material.

Figura 22: Corpos de prova irregulares



Fonte: Autor.

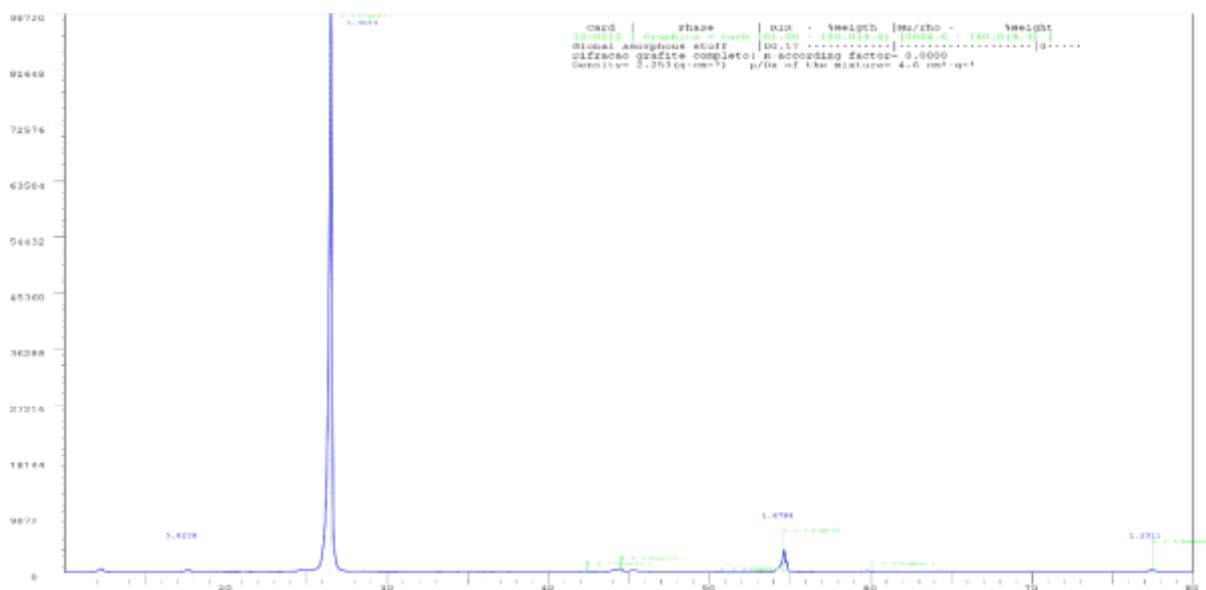
6.2 Materiais

6.2.1 Grafite

O grafite utilizado apresenta, em média $4\text{m}^2/\text{g}$ de área superficial específica e massa específica de $2,25\text{g}/\text{cm}^3$, conforme ensaio BET resultados apresentados no ANEXO A- BET Grafite.

Na Figura 23 é apresentado o difratograma obtido por difração de raio X (DRX). Utilizando o software *XPowder*, em comparação com o cartão 12-0212 (*Graphite = Carbon*) na forma hexagonal, foram encontrados os parâmetros de rede e constatados os picos referentes ao grafite.

Figura 23: DRX grafite



Fonte: Autor.

Com a análise do difratograma foi identificado o grafite em forma hexagonal com os seguintes parâmetros de rede:

a: 2,4640Å;

b: 2,4640Å;

c: 6,7360Å;

α : 90°;

β : 90°;

γ : 120°;

Volume da célula unitária: 35,42;

Densidade: 2,253g/cm³.

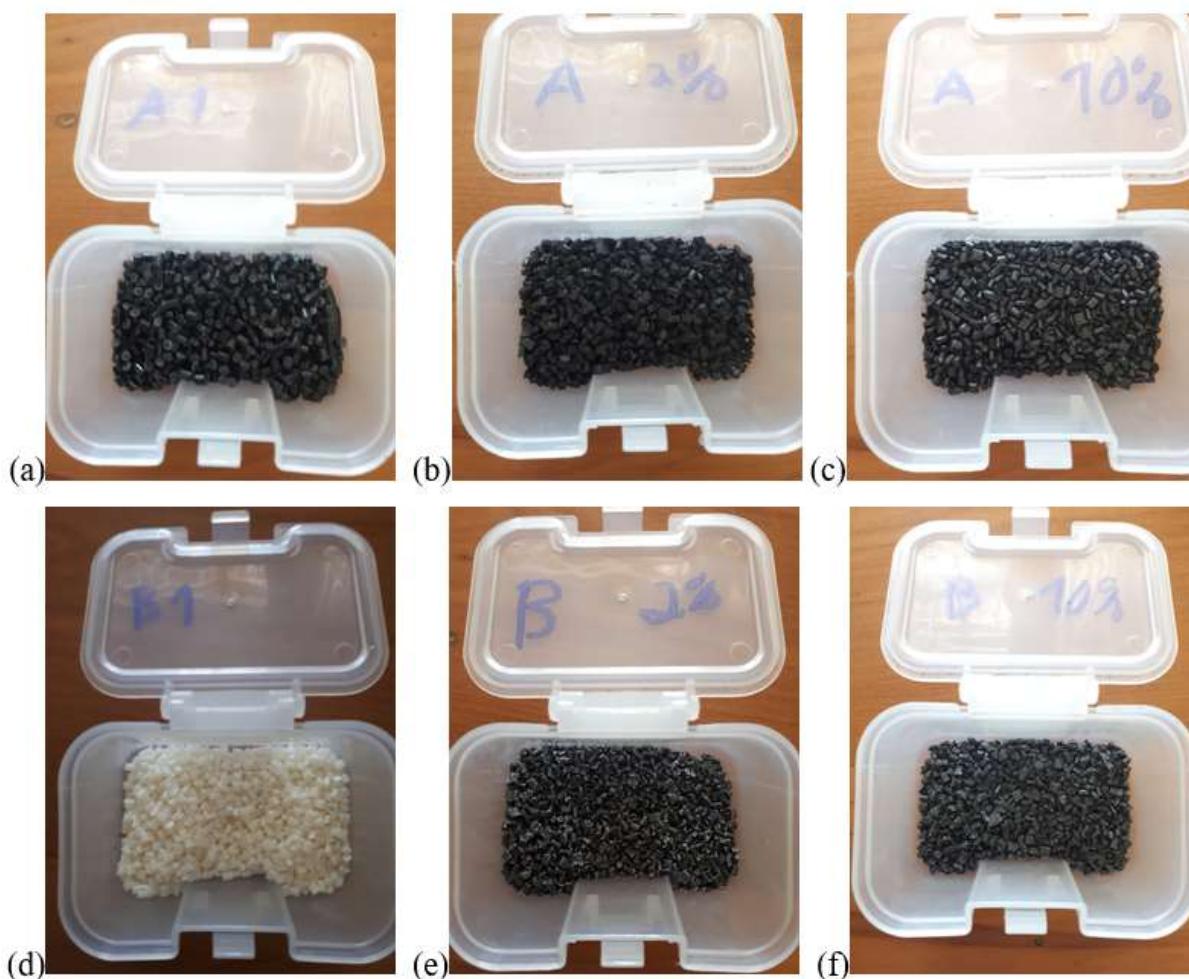
Em ensaio de fluorescência de raio X (EDX), foi encontrada a presença de Si e Al. Devida à baixa quantidade destes componentes, não foi possível detectá-los no DRX.

6.2.2 Compósitos

A partir do processo de extrusão foi realizada a mistura do ABS reciclado e virgem com o grafite nos teores de 1% 2,5% 5% e 10% em massa de grafite. A Figura 24 apresenta amostras de ABS virgem e reciclado puros, com 2% e 10% de grafite. É observável a mudança de cor homogênea, em especial entre o ABS virgem puro e o com 2% de grafite,

Figura 24 (d) e (e). A homogeneidade na cor indica distribuição da carga na matriz adequada.

Figura 24: *Pellets* produzidos

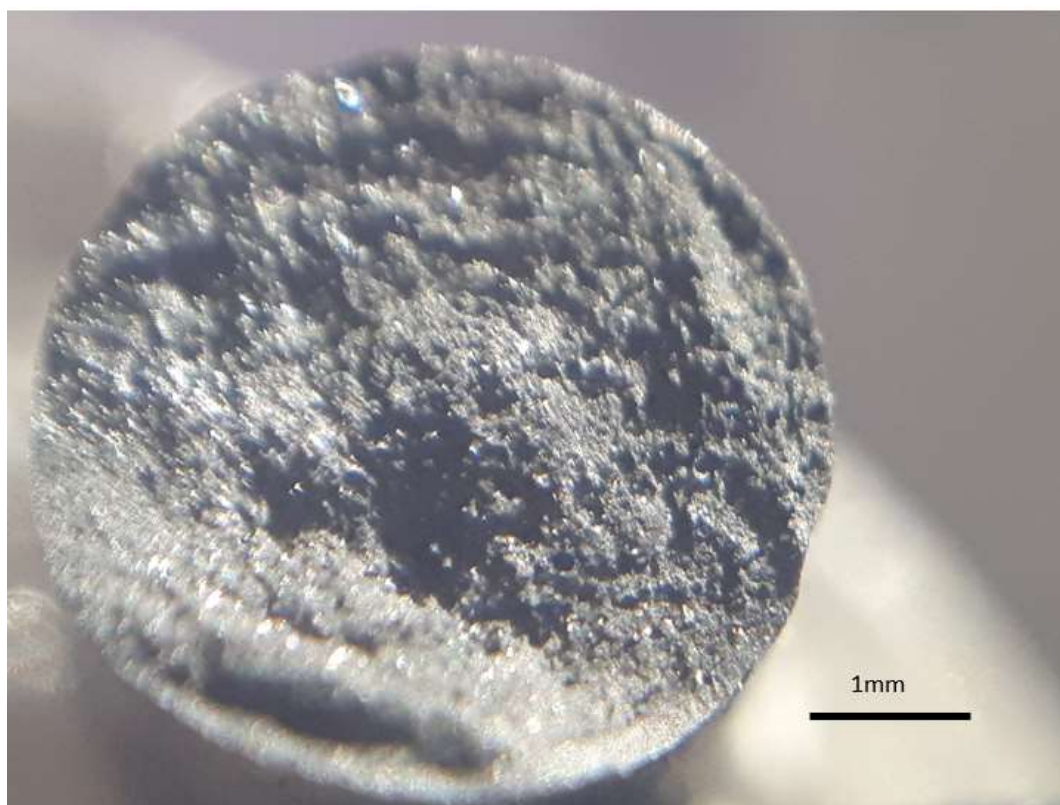


(a) ABS reciclado puro, (b) ABS reciclado com 2% de grafite, (c) ABS reciclado com 10% de grafite, (d) ABS virgem puro, (e) ABS virgem com 2% de grafite, (f) ABS virgem com 10% de grafite

Fonte: Autor.

A Figura 25 apresenta a seção transversal do filamento de ABS reciclado contendo 10% de grafite disperso. O filamento foi seccionado por meio de criofratura (resfriado em nitrogênio líquido e rompido mediante esforço de cisalhamento). Não foi possível encontrar visualmente regiões de aglomeração do aditivo, sendo indicativo que a dispersão do grafite ocorreu de modo homogêneo.

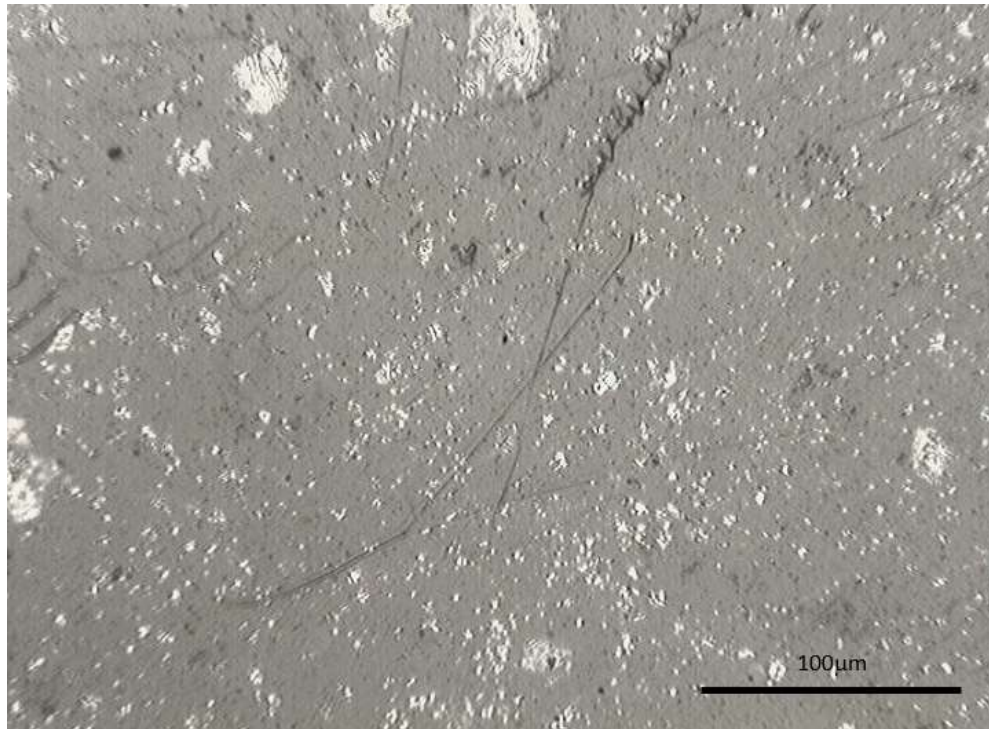
Figura 25: Filamento de ABS reciclado com grafite disperso



Fonte: Autor.

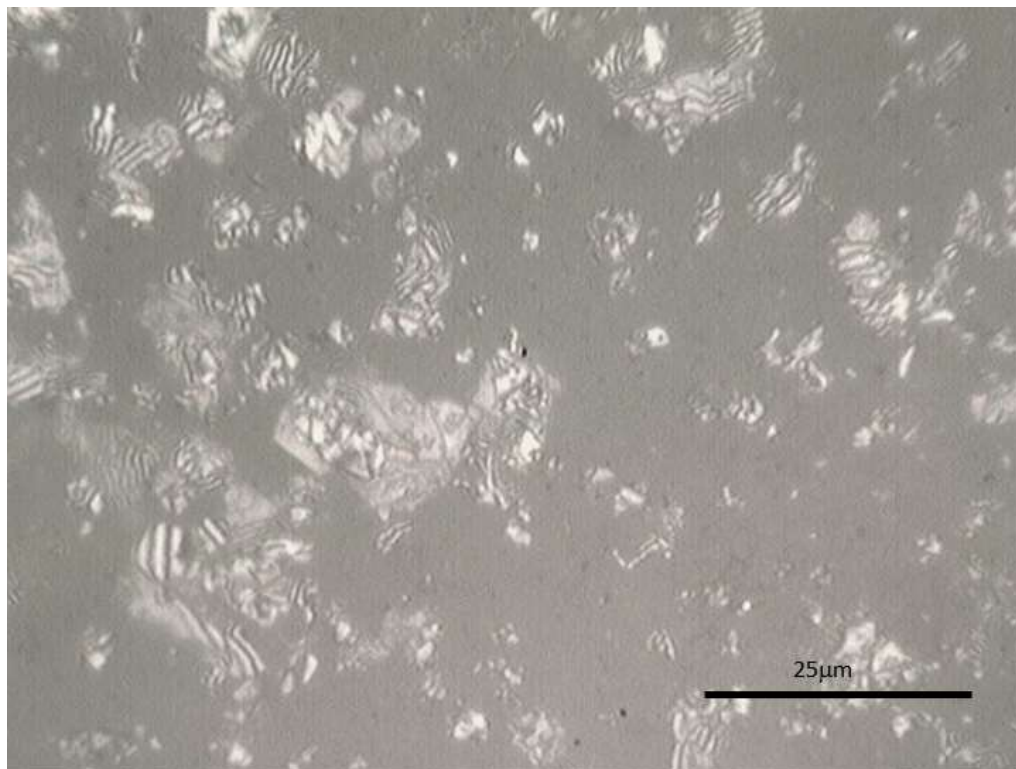
Na Figura 26 é apresentada com aumento de 200X obtida em microscópio ótico marca Kontrol, modelo 1M713. É possível observar o grafite (cor branca) disperso no ABS (cor cinza). O grafite está presente em particulados de diferentes tamanhos. No entanto, se apresentam bem dispersos. Na Figura 27 é apresentada a mesma amostra com aumento de 800X.

Figura 26: Grafite disperso em matriz polimérica, aumento 200x



Fonte: Autor.

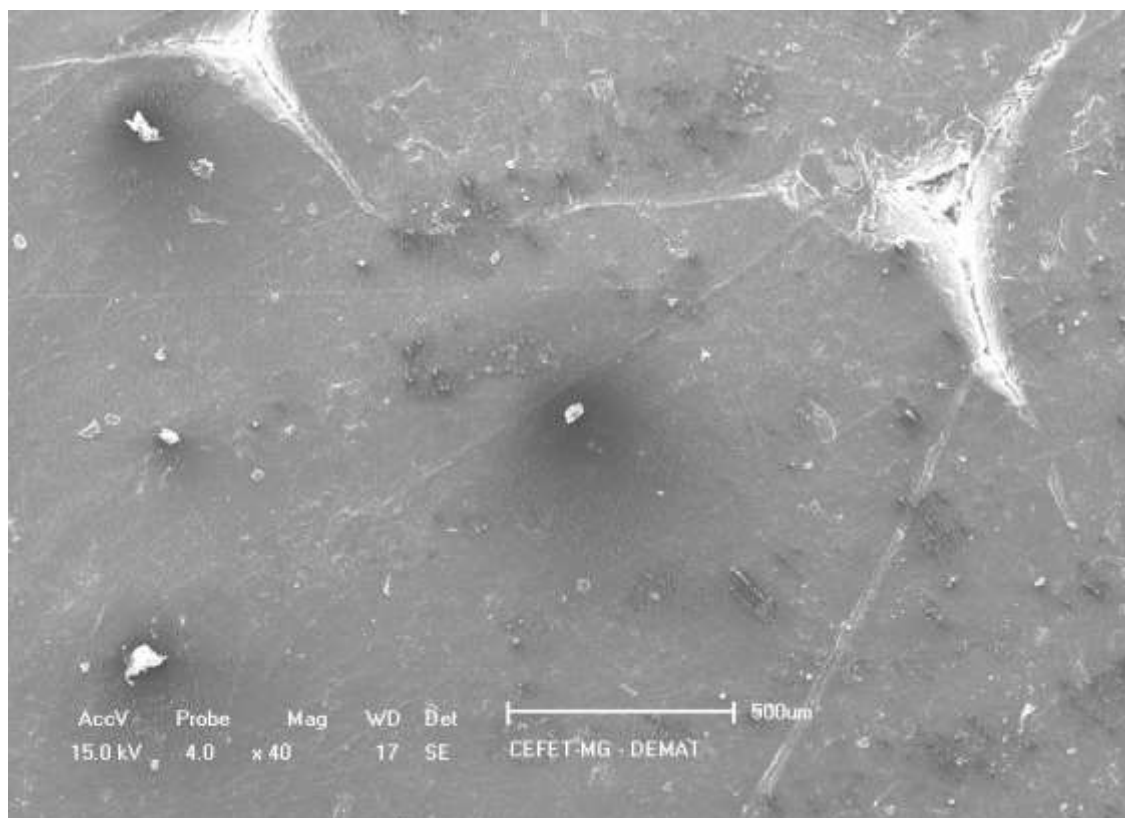
Figura 27: Grafite disperso em matriz polimérica, aumento 800x



Fonte: Autor.

Na Figura 28 é mostrada imagem da superfície do corpo de prova moldado contendo ABS reciclado com 1% de grafite. Na parte superior da imagem, tem-se a marca da junção dos *pellets*, evidenciando falha no processo de moldagem, que pode ter ocorrido por temperatura, tempo e/ou pressão insuficientes.

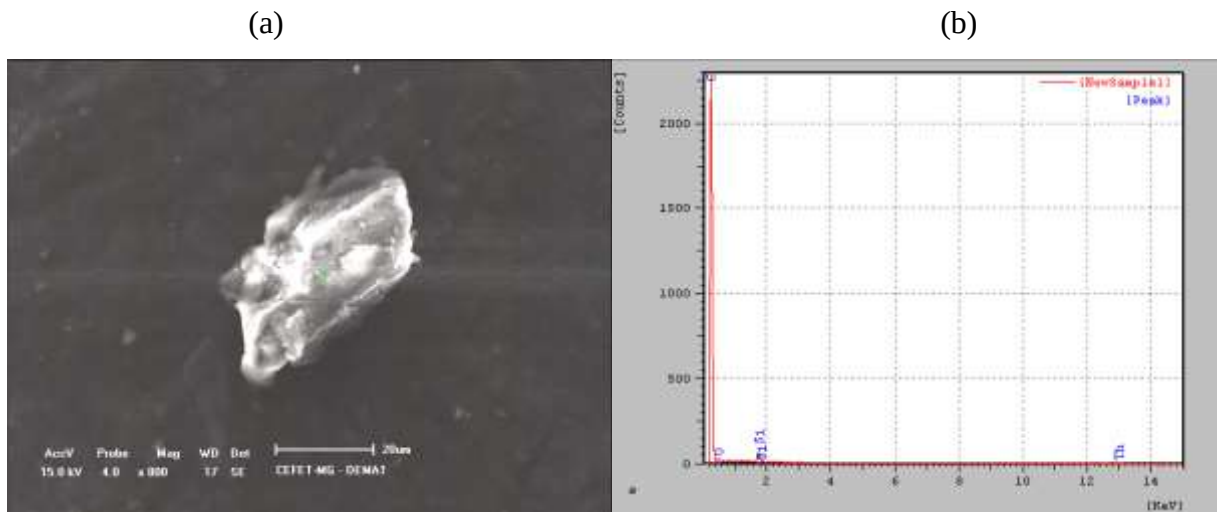
Figura 28: MEV ABS reciclado com 1% de grafite



Fonte: Autor.

Na Figura 29 (a) é apresentado grão de grafite disperso na matriz de ABS, enquanto que na Figura 29, é apresentada a análise pontual de Espetroscopia por energia dispersiva (EDS). Através do resultado do EDS é possível comprovar a composição de química dos grãos presentes na amostra. Sendo composto de carbono (C) e alguns traços de silício (Si) e Tório (Th).

Figura 29: Grão de grafite disperso e EDS



Fonte: Autor.

Na Figura 30 e na Figura 31 é apresentada a superfície da amostra do corpo de prova de ABS reciclado, contendo 20% de grafite. Por não haver contato físico entre os grãos de grafite, não foi possível identificar caminhos preferenciais para a condução de calor.

Figura 30: MEV ABS reciclado com 20% de grafite 40X

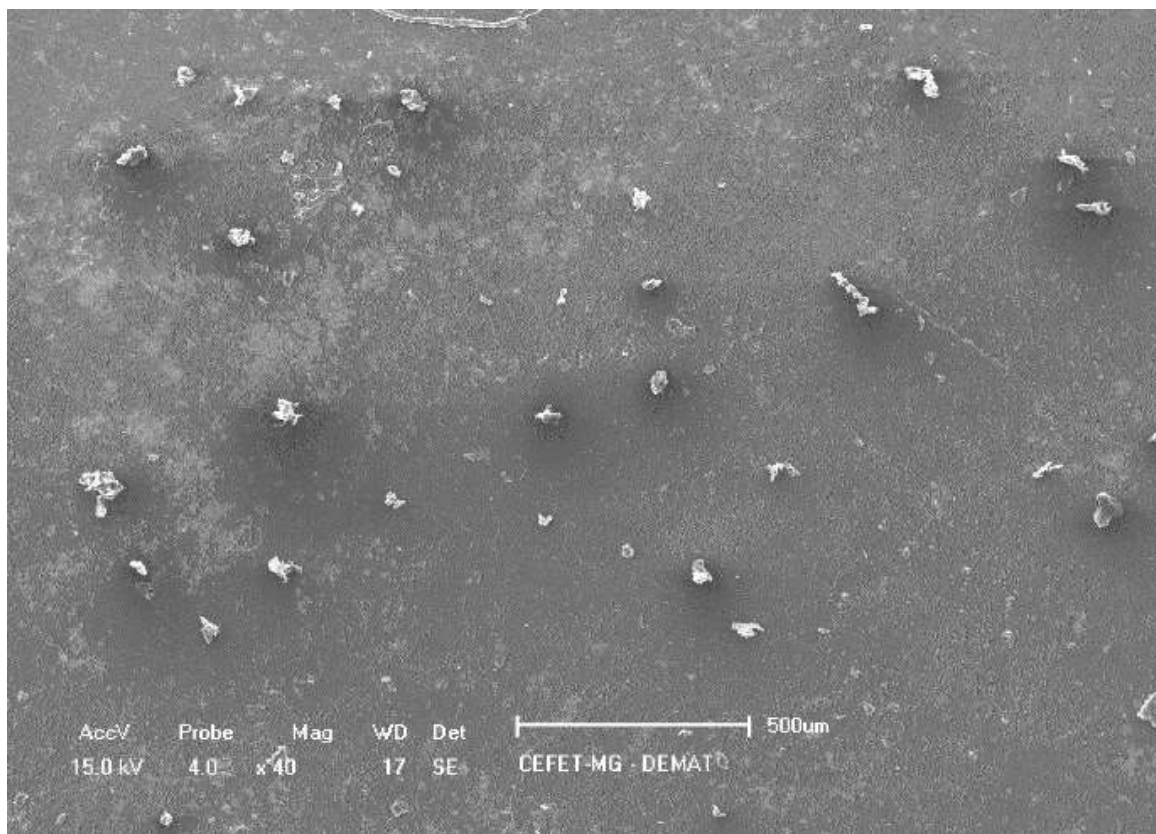


Figura 31: MEV ABS reciclado com 20% de grafite 500X



Fonte: Autor.

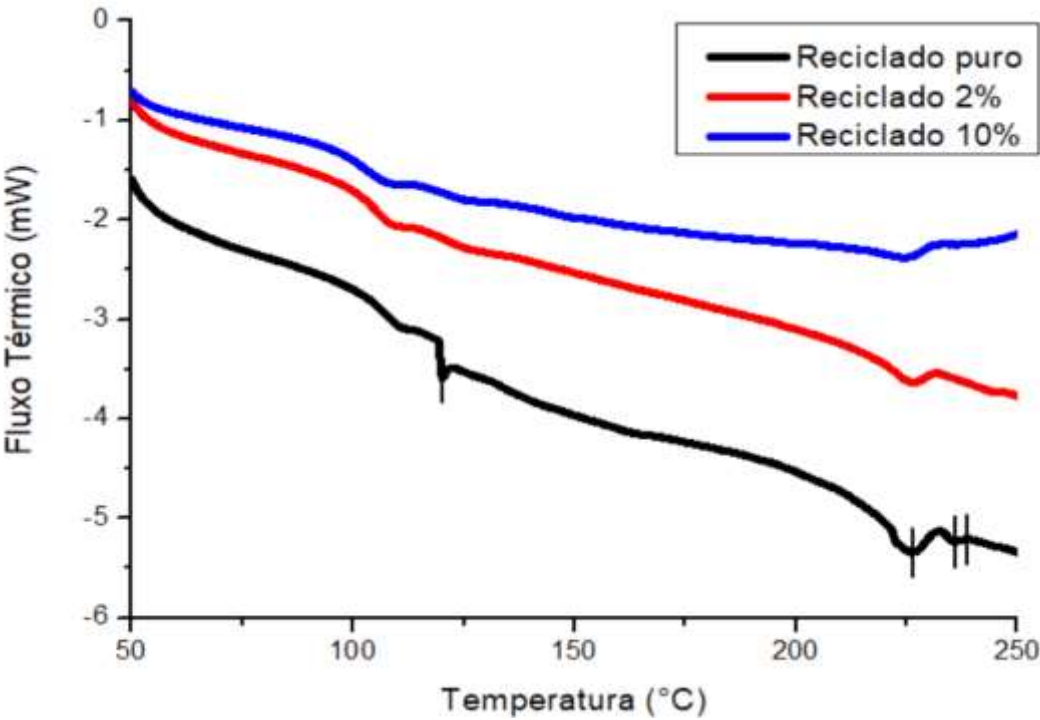
6.3 Caracterização

6.3.1 DSC

O ABS foi submetido a análise Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) a fim de se determinar sua temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de fusão (TF). Os resultados dos ensaios são mostrados nos gráficos da Figura 32 e da Figura 33. As temperaturas T_g obtidas por Da Silva (2014) para o ABS estão na faixa de 108°C a 112°C, antes e depois de tratamento de envelhecimento com radiação UVA com aditivos para estabilizadores de radiação. Na Figura 32 e na Figura 33, em todas as condições avaliadas, existem picos endotérmicos próximos a 115°C, correspondentes a temperatura de transição vítrea (T_g), valores similares aos obtidos por Da Silva (2014). Outro pico endotérmico ocorre aproximadamente a 220°C, conforme Hirayama (2015), na faixa de 220°C a 260°C, os picos encontrados, referentes a Temperatura de fusão (TF). Com a adição do grafite, a posição dos picos referentes T_g e TF não se altera. Entretanto, o comportamento da curva apresenta

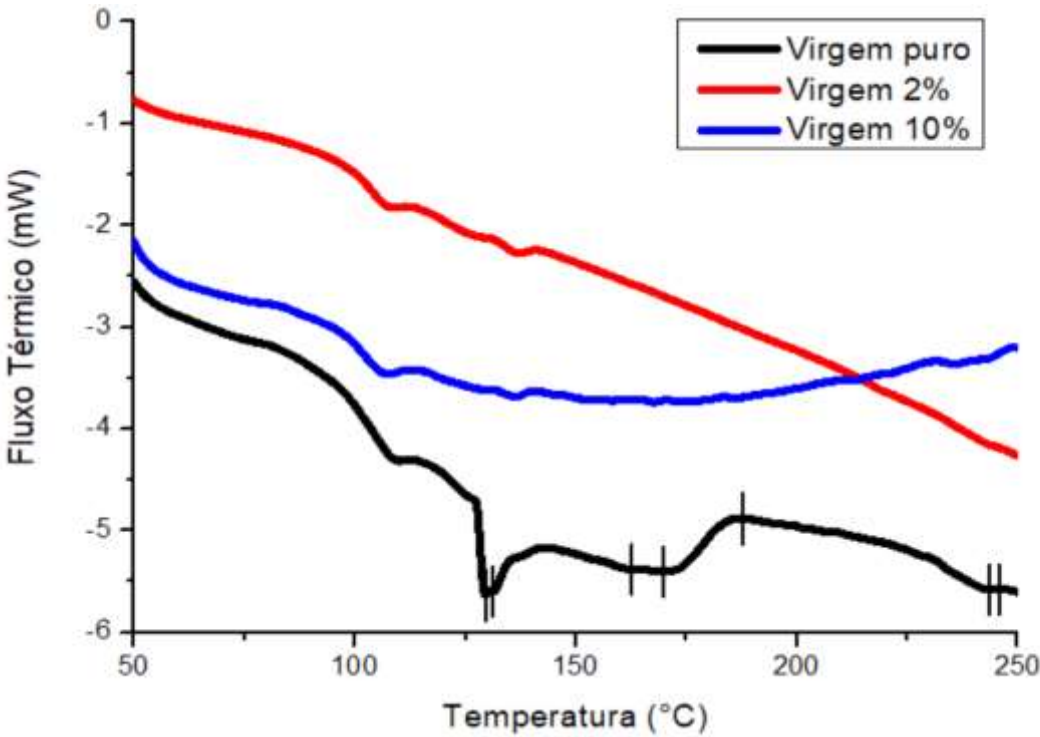
variações.

Figura 32: DSC do ABS reciclado



Fonte: Autor.

Figura 33: DSC do ABS virgem



Fonte: Autor.

6.3.2 Condutividade térmica

A Figura 34 apresenta os corpos de prova utilizados para a medição da condutividade térmica. Na parte superior está o furo pelo qual foi inserida a resistência de aquecimento, e ao centro dos corpos de prova, o furo para introdução do termopar para medição da temperatura interna.

Figura 34:Corpos de prova para medição da condutividade térmica



Fonte: Autor.

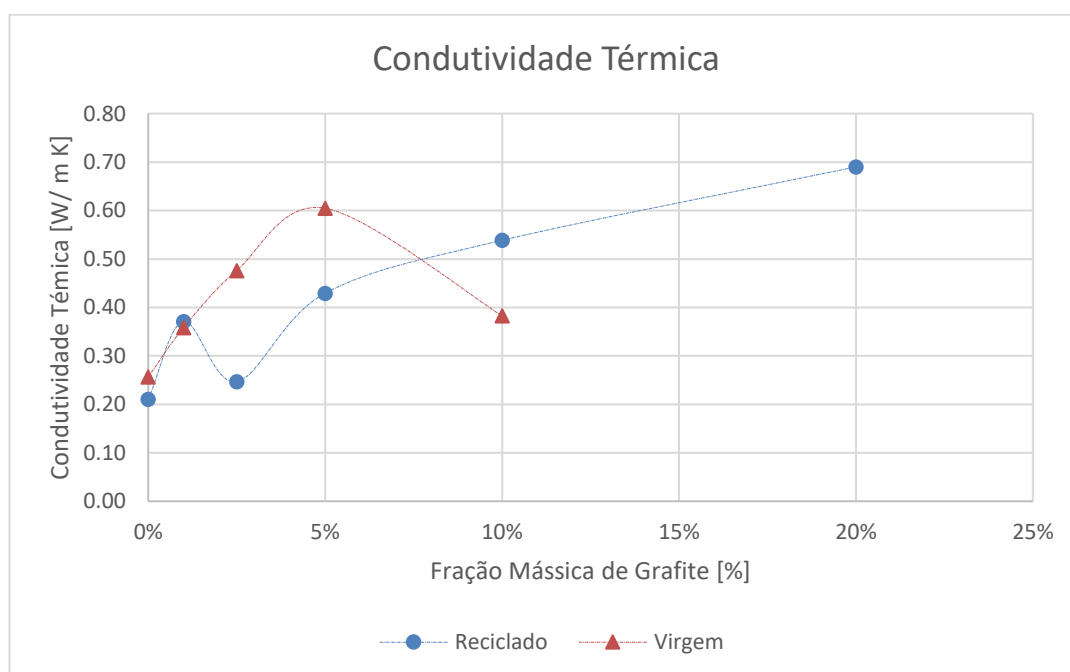
Na Tabela 7 é apresentado o resultado das medições das temperaturas no corpos de prova e o cálculo da condutividade térmica. Já na Figura 35 é apresentado o gráfico com a condutividade térmica em relação ao percentual mássico de aditivo.

Tabela 7: Resultado das medições de temperatura dos corpos de prova

Material	Temperatura externa (°C)	Temperatura interna (°C)	Condutividade (W/m K)
Reciclado puro	79,3	166,4	0,21
Reciclado 1%	71,5	120,9	0,37
Reciclado 2,5%	74,0	148,2	0,25
Reciclado 5%	69,8	112,5	0,43
Reciclado 10%	69,4	103,4	0,54
Reciclado 20%	73,5	100,1	0,69
Virgem Puro	79,0	150,4	0,26
Virgem 1%	68,7	119,8	0,36
Virgem 2,5%	71,4	109,9	0,48
Virgem 5%	72,0	102,3	0,60
Virgem 10%	73,3	121,2	0,38

Fonte: Autor.

Figura 35: Resultado das medições de condutividade térmica dos corpos de prova



Fonte: Autor.

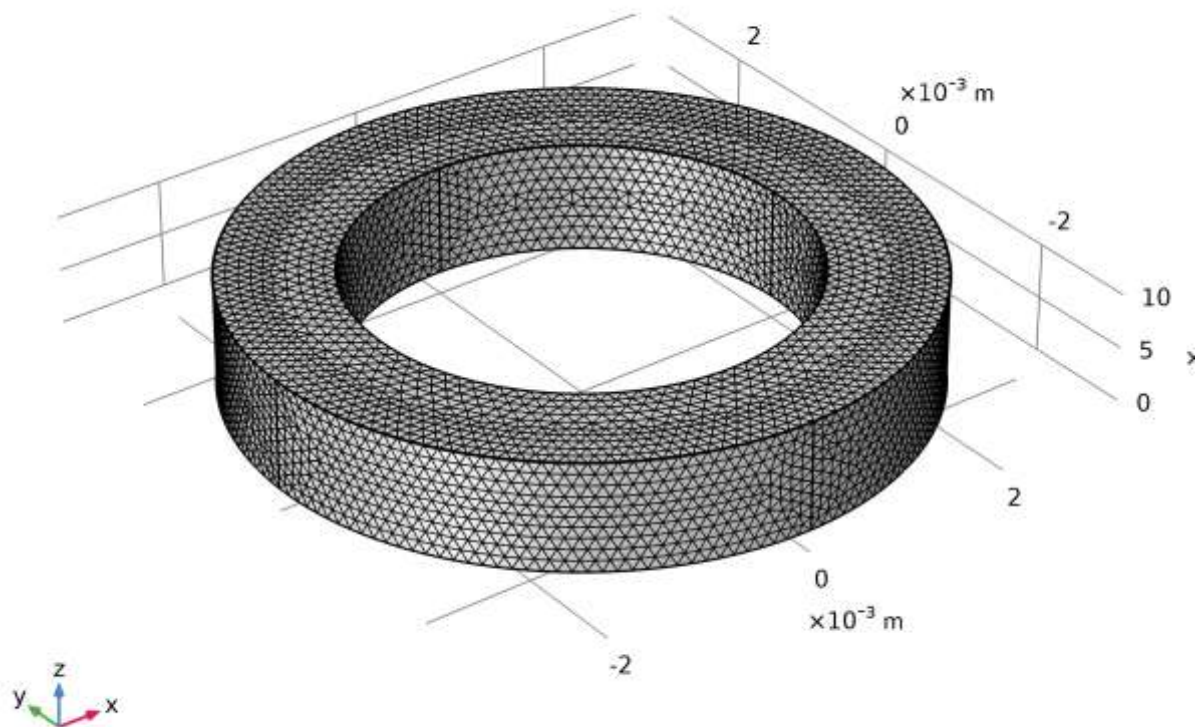
Embora constatado o aumento da condutividade térmica, fatores referentes ao processamento podem ter impactado o resultado, de modo a gerar condições distintas entre os corpos de prova, como é o caso do resultado da condutividade térmica do Reciclado a 2,5% e da virgem a 10%. Pode ter ocorrido a presença de vazios internos, devida a presença de gases durante o processo de termo moldagem.

6.4 Modelo Numérico

6.4.1 Temperatura de estagnação

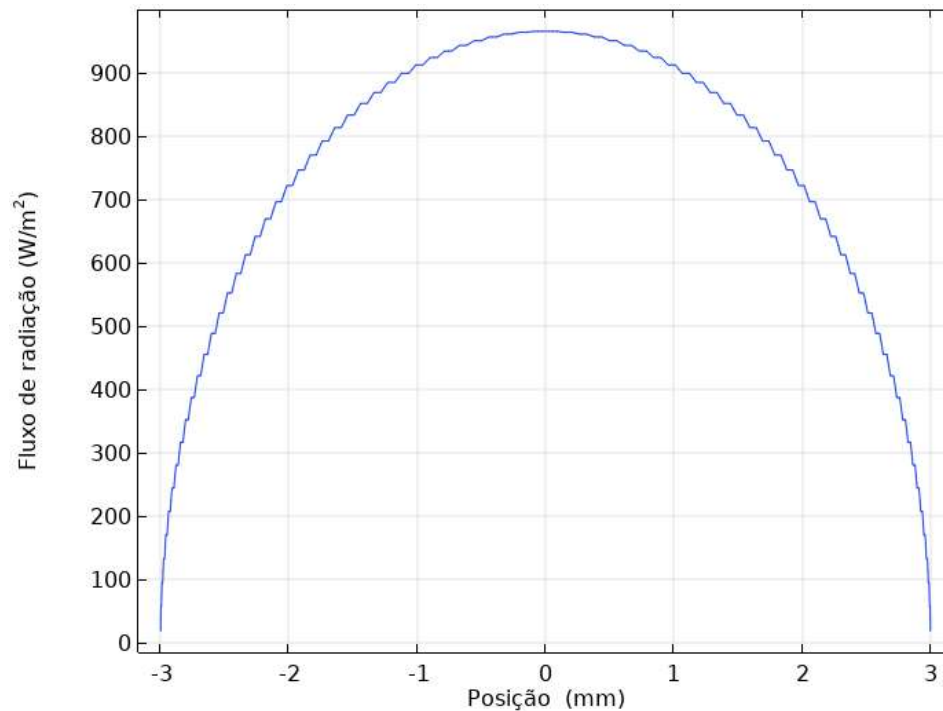
A condição de estagnação apresenta a maior temperatura que o coletor solar estaria sujeito durante sua utilização. Pelo fato do coeficiente convectivo ser dependente da temperatura da superfície, em modelo de convecção natural, foi utilizado o software *Comsol* para calcular o coeficiente convectivo em cada ponto da superfície externa do absorvedor. Na Figura 36 é apresentada a malha utilizada na simulação, composta por 150 mil elementos e na Figura 37 é apresentado o comportamento do fluxo térmico da radiação solar sob geometria cilíndrica.

Figura 36: Malha do componente simulado



Fonte: Autor, Comsol.

Figura 37: Distribuição da radiação solar na superfície superior

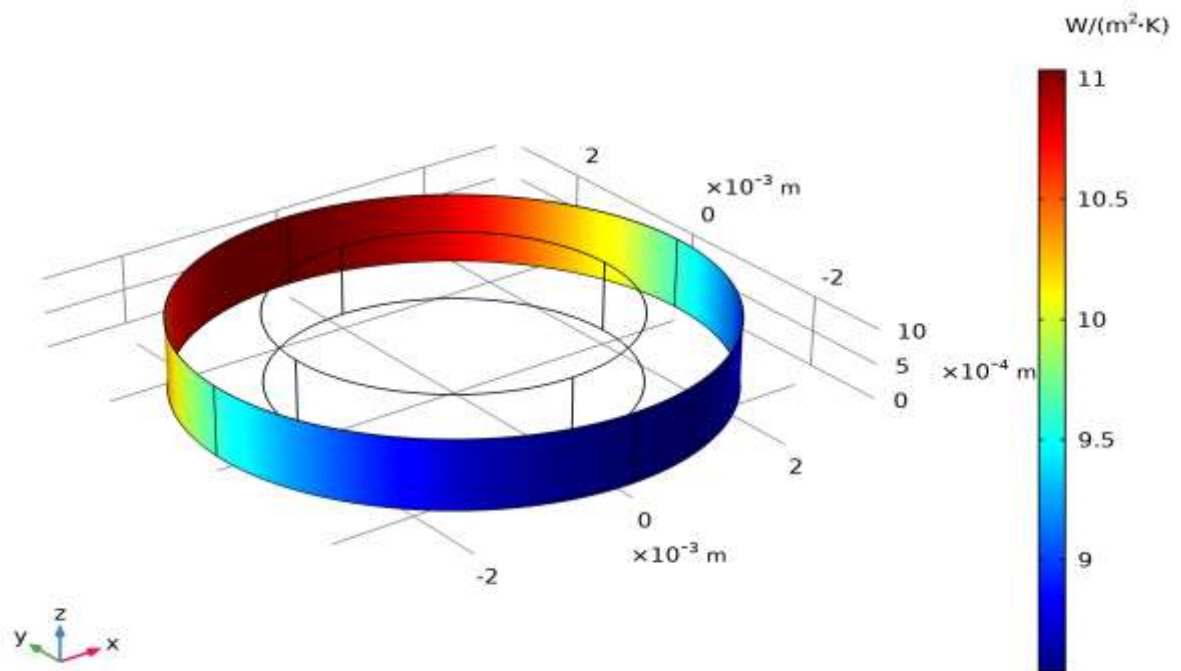


Fonte: Autor, Comsol.

Por tratar-se de uma superfície convexa, a distribuição do fluxo da radiação solar não é constante em todo coletor, devendo assim ser considerado a média do fluxo para as demais análises numéricas.

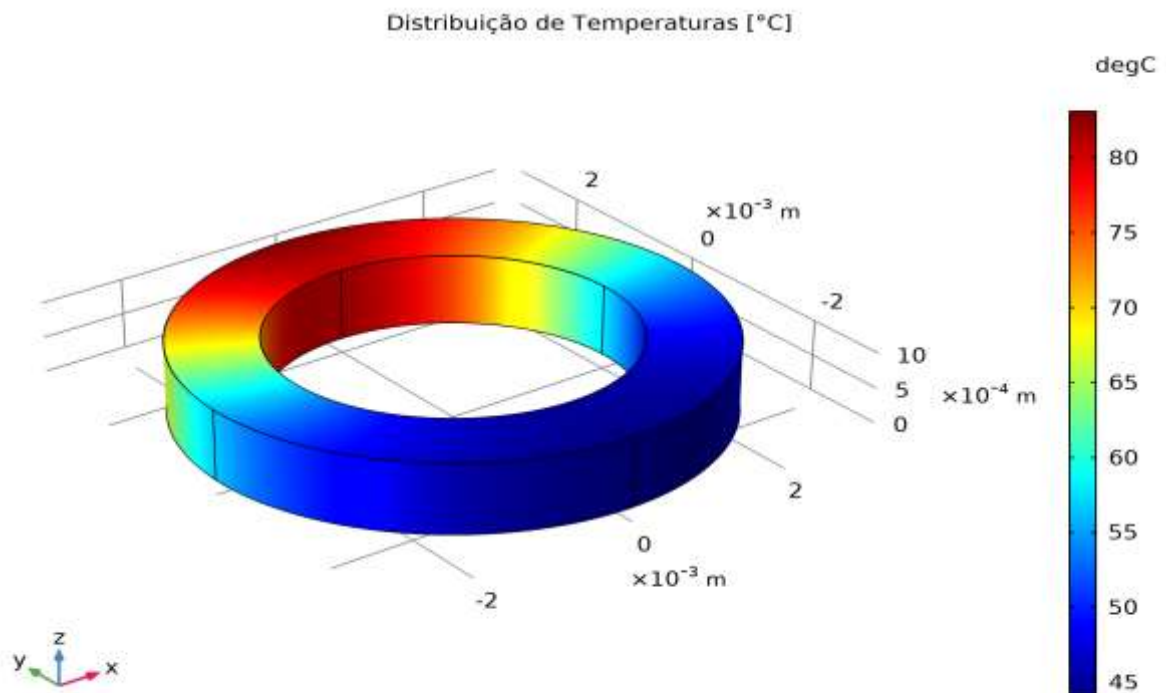
Na Figura 38 é apresentada a distribuição do coeficiente convectivo na superfície externa de um segmento do absorvedor. Já na Figura 39 é apresentada a distribuição da temperatura no sólido. Em ambas as figuras foi utilizado como a padrão a condutividade térmica $K=0,1\text{W/m K}$.

Figura 38: Coeficiente convectivo por convecção natural ($k=0,1 \text{ W/m K}$)



Fonte: Autor, Comsol.

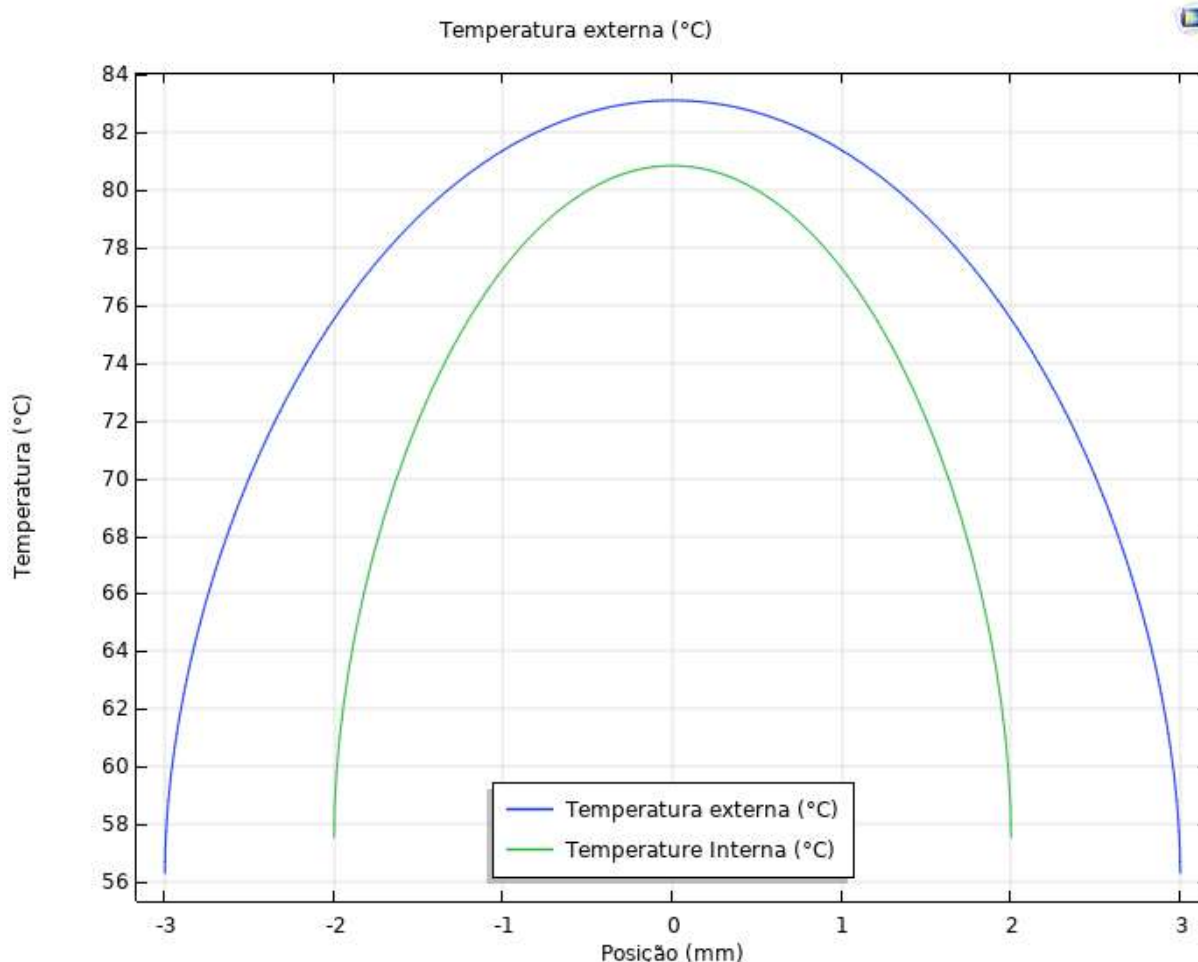
Figura 39: Distribuição de temperaturas em condição de estagnação ($k=0,1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$)



Fonte: Autor, Comsol.

É apresentado no gráfico da Figura 40 o comportamento da temperatura nas superfícies externa e interna para $k=0,1 \text{ W/m K}$. Sendo o eixo das abscissas a posição X em relação ao centro da tubulação. Somente é considerada a parte superior do absorvedor (região de incidência solar). A diferença entre a temperatura interna e externa é devida à resistência térmica de condução.

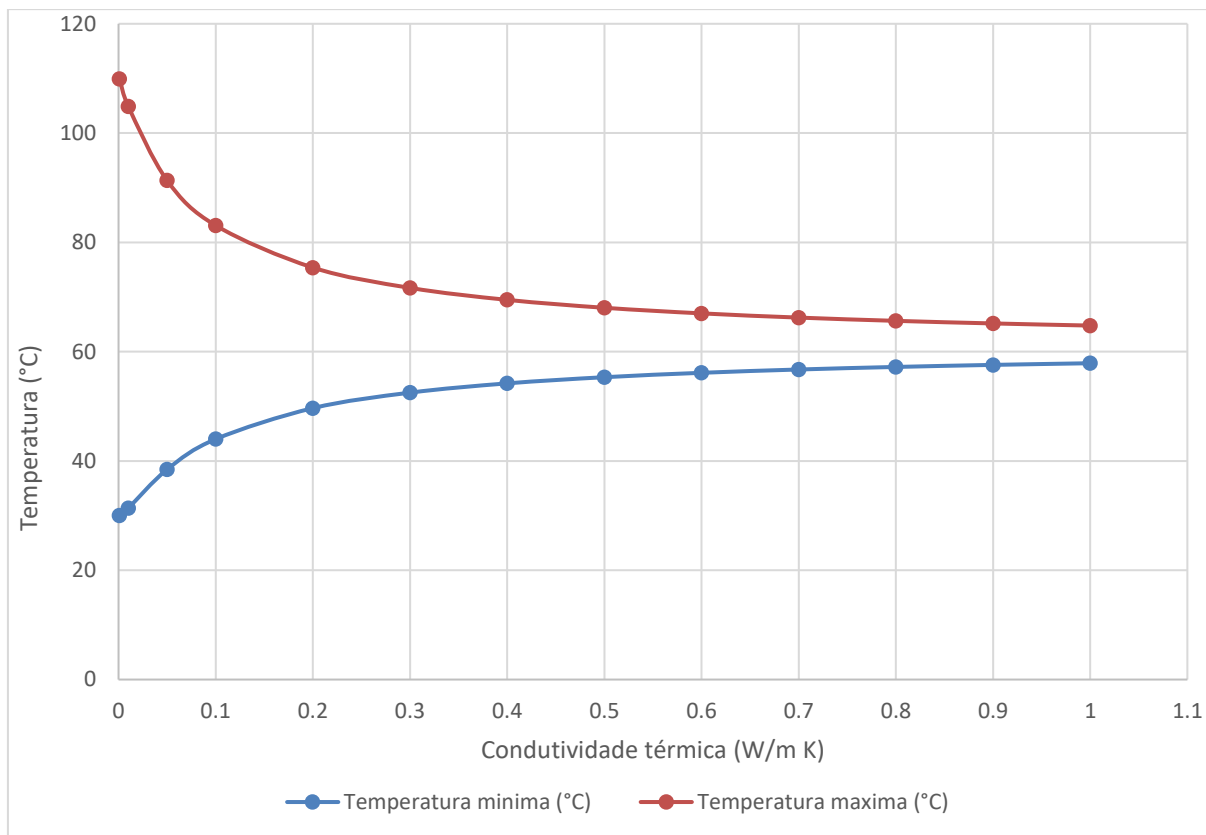
Figura 40: Distribuição de temperaturas em condição de estagnação ($k=0,1 \text{ W/m K}$)



Fonte: Autor, Comsol.

As simulações realizadas no *software* Comsol mostram a dependência da temperatura de estagnação do coletor em função da condutividade térmica do mesmo. No gráfico da Figura 41 são apresentadas as temperaturas máximas e mínimas que ocorrem no absorvedor em condição de estagnação considerando o intervalo de condutividade térmica de 0,001 a 1 W/m K . A temperatura máxima ocorre na parte superior da superfície externa, enquanto a temperatura mínima na parte interior da superfície interna.

Figura 41: Temperatura de estagnação em função da condutividade térmica do material



Fonte: Autor.

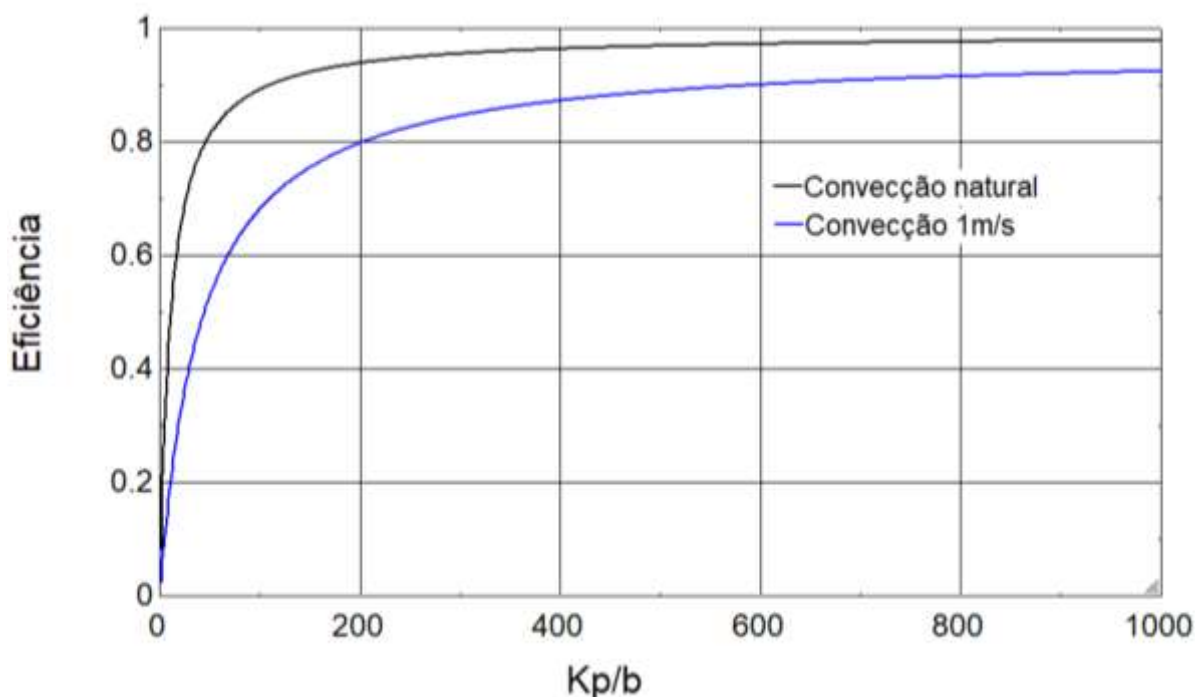
Assim, em materiais que apresentam condutividade térmica mais baixa, a temperatura a que estão expostos é maior. Como não foi possível evidenciar por meio da DSC fenômenos térmicos em temperaturas inferiores a 100°C, o ABS poderia ser utilizado mesmo sem aditivos. No entanto, devida à condutividade térmica inferior, estaria sujeito a temperaturas na ordem de 75°C, enquanto com grafite como aditivo seria possível reduzi-la para a 68°C. De modo geral, a degradação nos materiais poliméricos tendem a ocorrerem de maneira mais acentuada a medida que a temperatura a que estão expostos é aumentada. Sendo assim a diminuição da temperatura superficial, pode contribuir para a redução da degradação do material, aumentando assim a vida útil deste equipamento.

6.4.2 Fluxo térmico

Foi utilizado o modelo de Tsilingiris (2000), por meio da Equação (10), para calcular o comportamento da eficiência térmica, em função da relação Kp/b (razão entre a condutividade

do polímero e a espessura da parede), na condição de temperatura de entrada igual a ambiente. O resultado é apresentado no gráfico da Figura 42. Para a condição de convecção natural quando superior a 200 a eficiência térmica tende a estabilizar no valor máximo, já considerando convecção forçada a estabilidade ocorre em valores superiores.

Figura 42: Relação entre a eficiência e o Kp/b em coletor polimérico

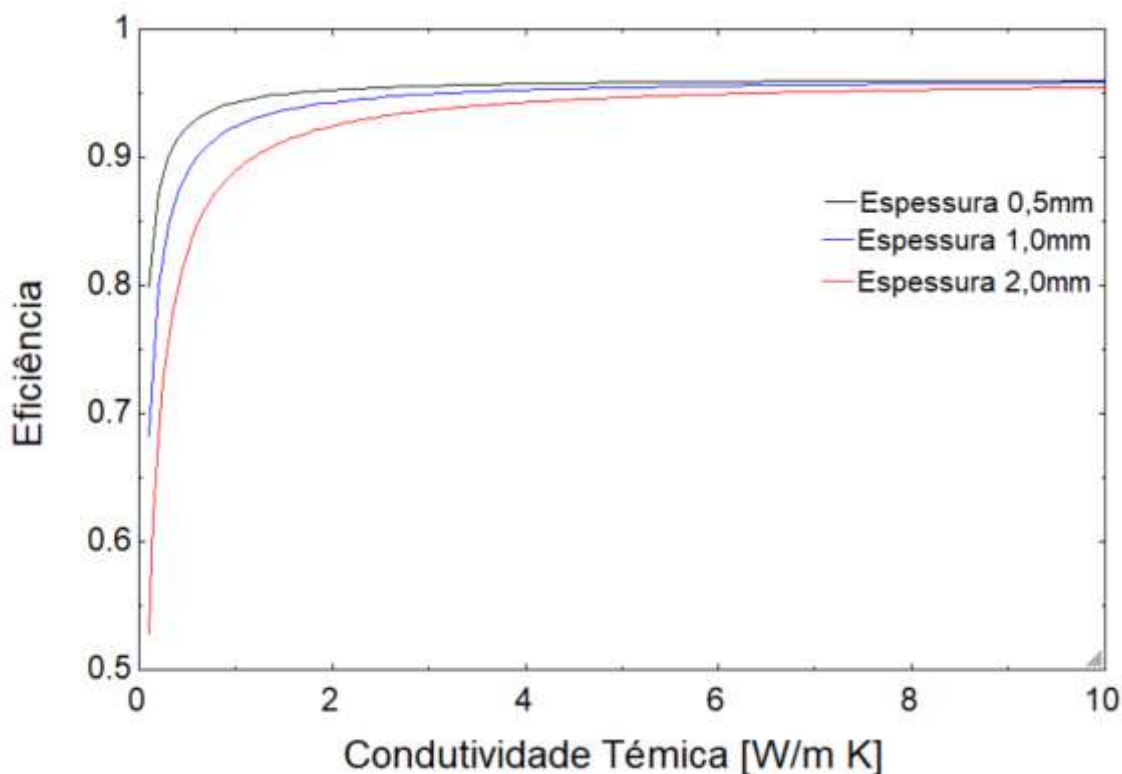


Fonte: Autor.

Avaliando o gráfico da Figura 42, é possível perceber a tendência à estabilidade na eficiência térmica para valores de Kp/b superiores a 200 para convecção natural, enquanto que na convecção forçada, a estabilidade ocorre com valores de Kp/b próximo de 600.

Utilizando a Equação (8) no *software* EES, variando a condutividade térmica do material de 0,1 a 10 W/m K, considerando as espessuras de 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm, foi calculada sua eficiência térmica. O resultado é apresentado na Figura 43. No caso do gráfico da Figura 43, a variação da eficiência térmica ocorre de modo acentuado para valores inferiores a 2 W/m K, não havendo ganhos significativos em condutividades superiores.

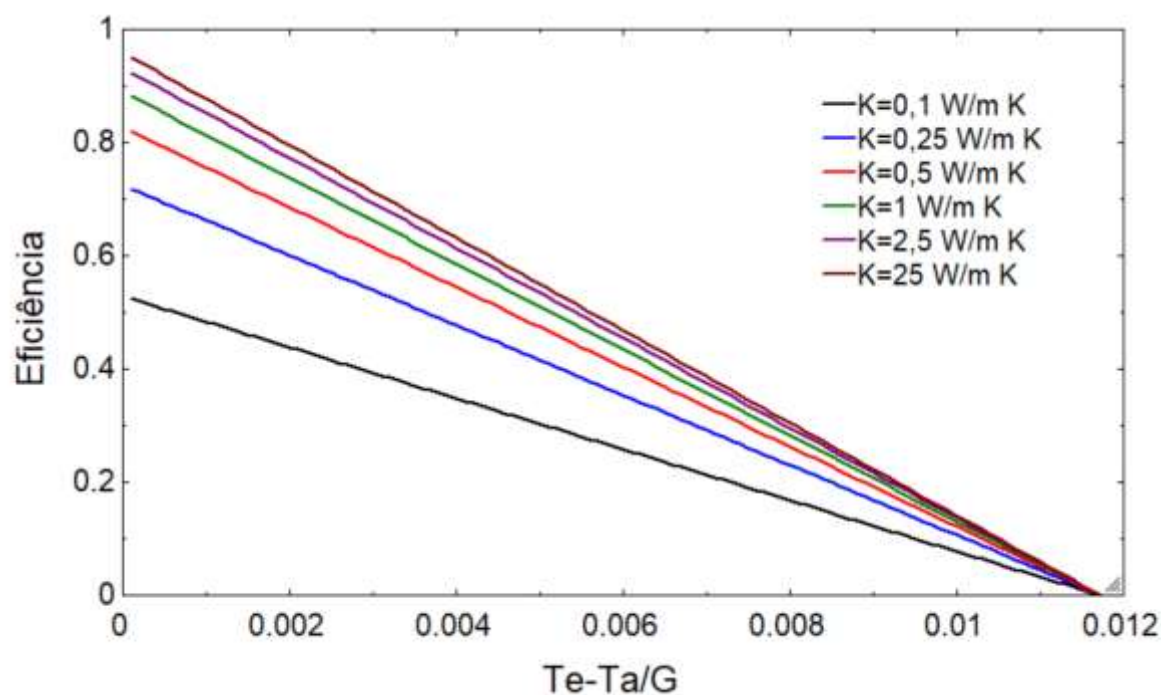
Figura 43: Relação entre a condutividade térmica e a eficiência



Fonte: Autor.

Foi traçado o gráfico de eficiência térmica, variando o parâmetro $T_e - T_a / G$ para as condutividades térmicas de 0,1W/m K, 0,25W/m K, 0,5W/m K, 1,0W/m K, 2,5W/m K e 25W/m K. Portanto, mesmo em condições de temperatura de entrada superiores, o ganho de desempenho se torna reduzido em condutividades superiores a 2 W/m K. O gráfico com os resultados do desempenho térmico é mostrado na Figura 44. Sendo o eixo das abscissas composto pelo termo $(T_e - T_a) / G$ e o das ordenadas pela eficiência térmica. Assim a razão da diferença entre a temperatura de entrada da água com a temperatura ambiente com a radiação solar mostra o comportamento da eficiência térmica. Mantendo a radiação solar constante, com o aumento da diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente, tem-se a queda do desempenho térmico. Com temperaturas de entrada da água próximas a temperatura ambiente, a eficiência térmica do sistema apresenta forte dependência da condutividade do material empregado, à medida em que a temperatura de entrada da água aumenta em relação a ambiente, a eficiência cai, convergindo para a mesma condição, independente da condutividade do material adotado. O programa contendo o memorial de cálculo é apresentado APÊNDICE A – Modelo EES.

Figura 44: Comportamento da eficiência térmica de coletores solares

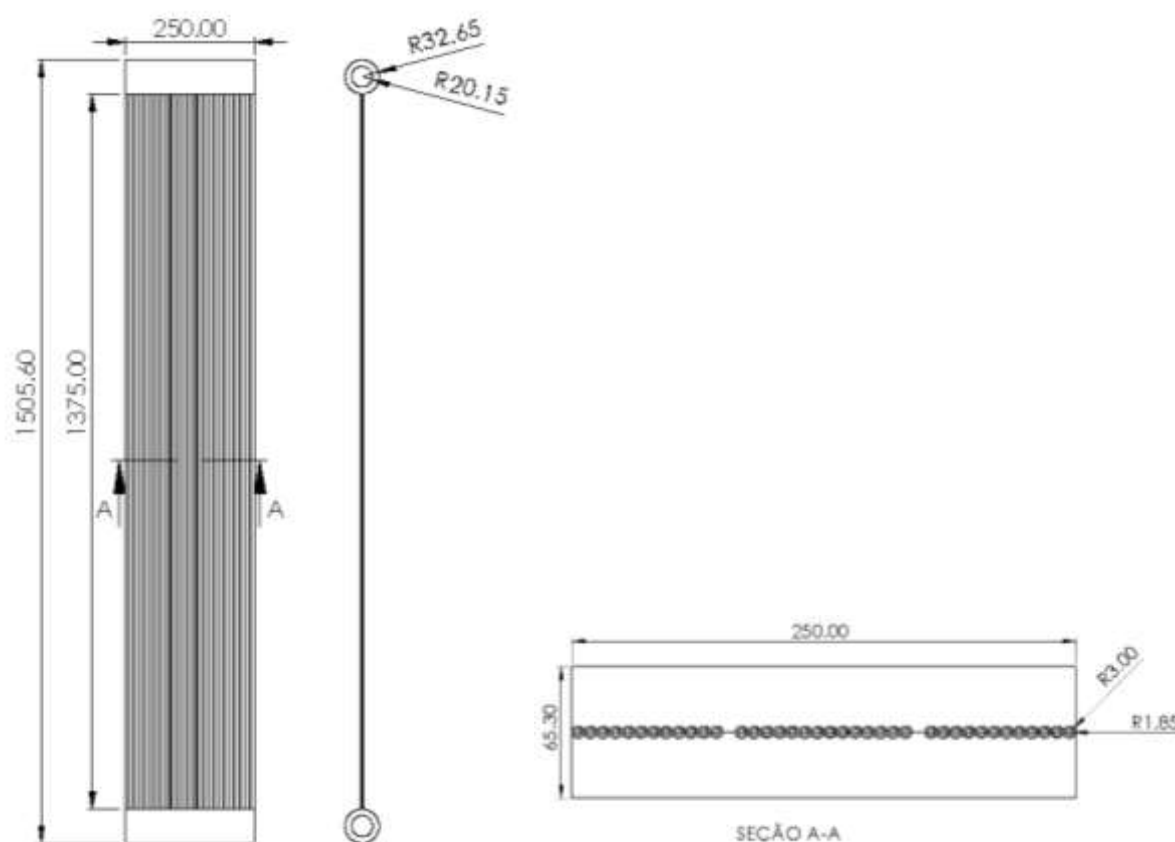


Fonte: Autor.

6.4.3 Desempenho térmico

Utilizando o modelo físico apresentado na Figura 20 como referência, foi desenvolvido o modelo virtual conforme o desenho mostrado na Figura 45.

Figura 45: Desenho do coletor solar polimérico



Fonte: Autor.

Utilizando o *software Ansys CFX*, foram gerados 2 domínios: o fluido interno, composto por água, e parte sólida, composta pelo ABS, sendo a condutividade térmica do material variada entre as simulações, conforme valores medidos. As informações referentes à quantidade de elementos e nós do domínio são mostradas na Tabela 8. Na Figura 46 é apresentada a vista isométrica do modelo utilizado nas simulações de desempenho térmico, sendo a parte inferior a esquerda a entrada de líquidos e superior, à direita, a saída. Já a Figura 47 contém o detalhamento da malha utilizada.

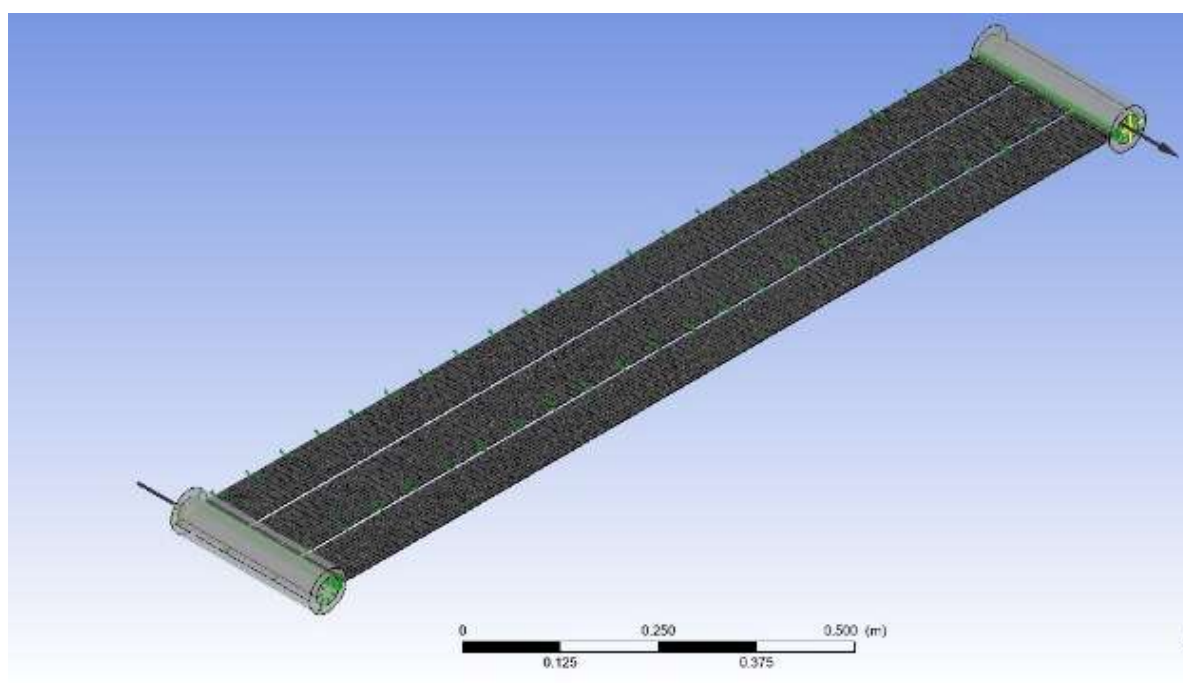
Tabela 8: Dados da malha utilizada nas simulações de desempenho térmico

Malha		
Domínio	Nós	Elementos
Água	205.099	587.007
Coletor	1.154.217	3.766.663
Total	1.359.316	4.353.670

Fonte: Autor.

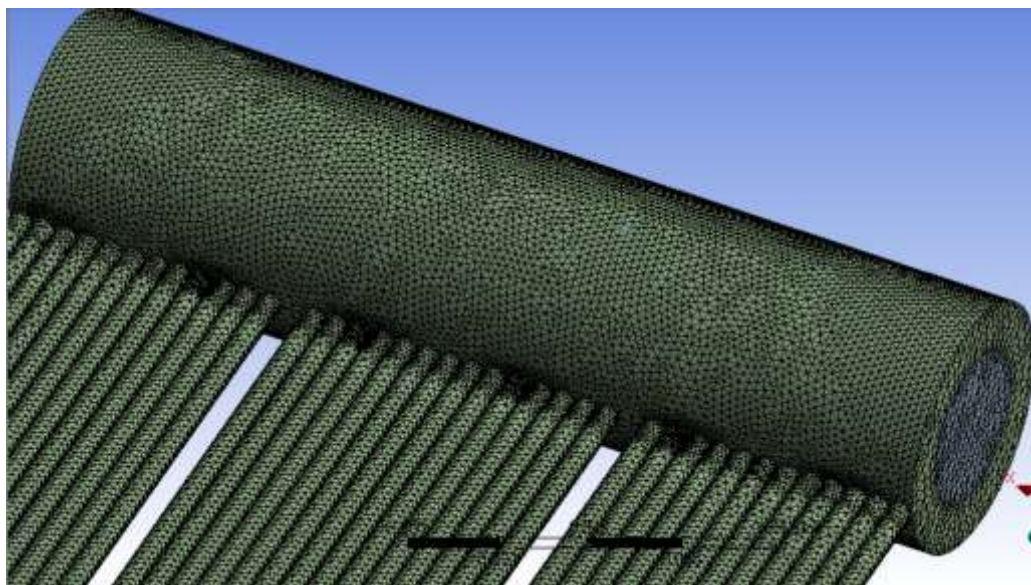
Foram realizados testes de convergência para a malha em 5 condições distintas de simulação. Foi utilizada a malha com 5.264.797 elementos, aumento de 17,3% do número de elementos. As variações de temperatura observadas na média da temperatura de saída, entre os casos simulados originalmente e os casos simulados com a malha refinada ficaram entre 0,002°C a 0,008°C. Como as variações no resultado entre a malha original e a malha refinada foram baixas, a malha de 4.353.670 elementos pode ser considerada de qualidade boa, uma vez que o refinamento não influenciou o resultado.

Figura 46: Modelo em 3D do coletor solar utilizado na simulação de desempenho térmico



Fonte: Autor, Ansys CFX.

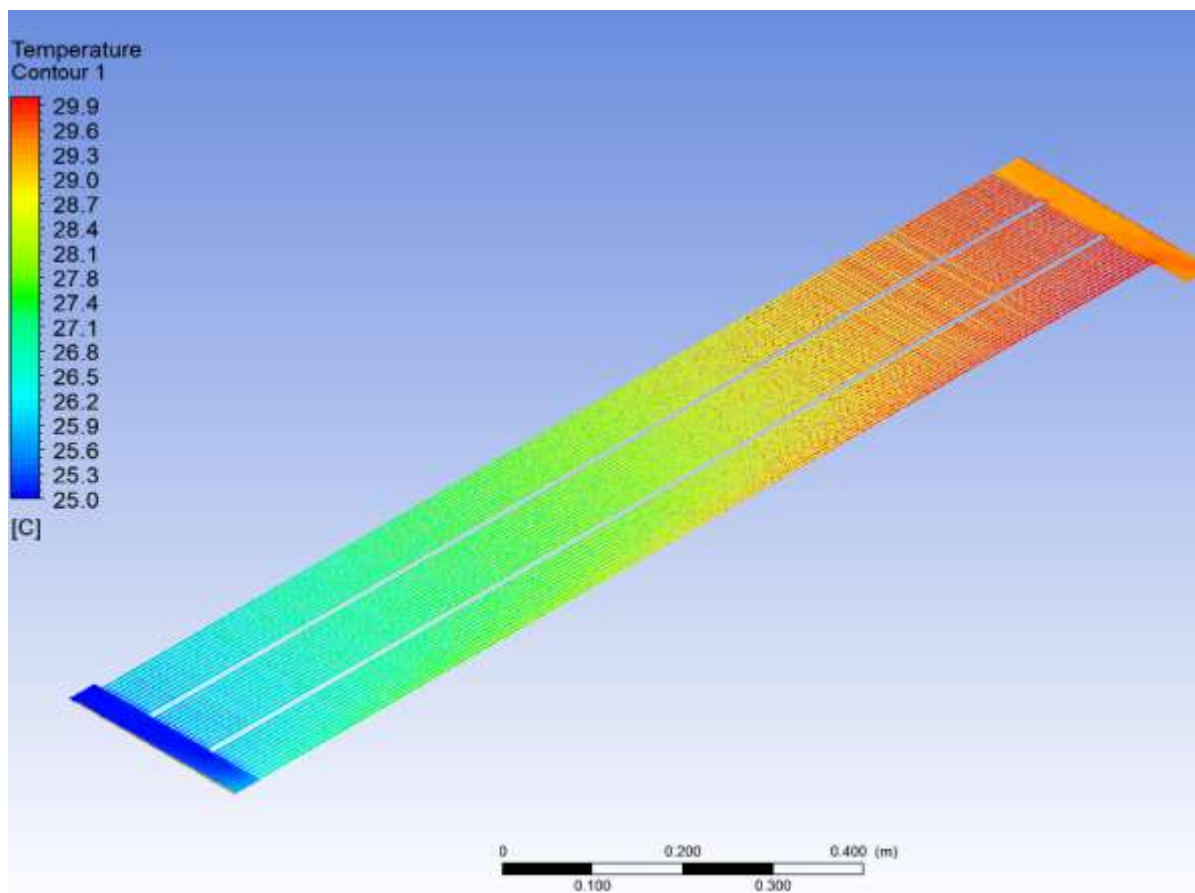
Figura 47: Detalhamento da malha



Fonte: Autor, Ansys CFX.

Para o cálculo da eficiência térmica foi aplicada a Equação (1) para cada situação de operação simulada sendo avaliada a temperatura média de saída do coletor. Na Figura 48 é apresentada a distribuição da temperatura da água no interior do coletor solar, considerando a condutividade térmica do coletor contendo ABS reciclado e 20% de grafite. A entrada da água está localizada na parte inferior a esquerda e a saída na parte superior à direita da figura. Com a incidência da radiação solar a água é aquecida conforme percorre o coletor solar. A água apresenta temperatura de entrada de 25°C e de saída de 29,5°C neste caso. Conforme a condutividade térmica a temperatura de saída da água foi sendo alterada.

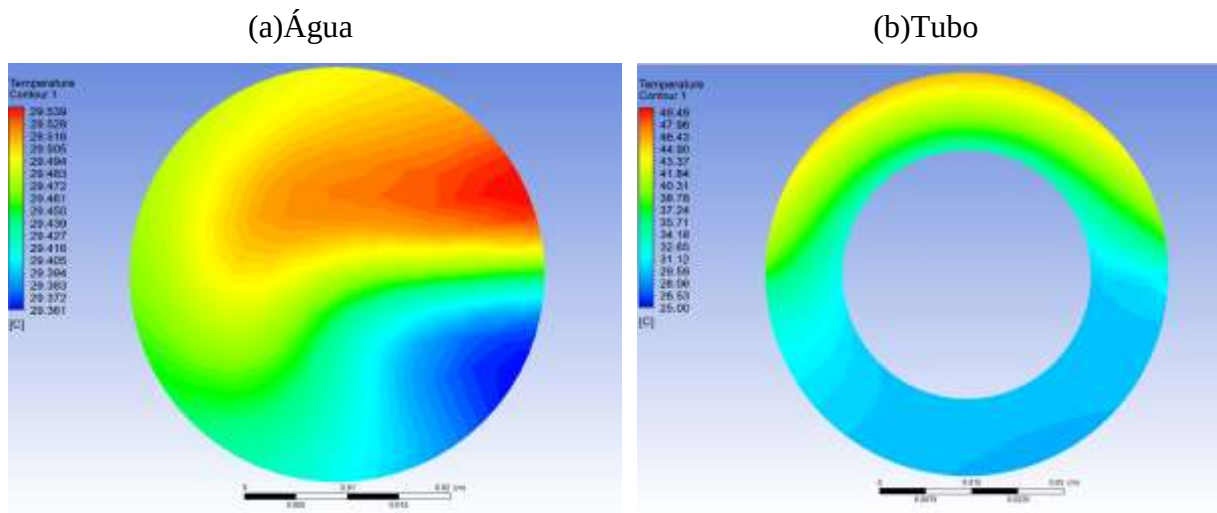
Figura 48: Distribuição da temperatura da água no interior do coletor



Fonte: Autor, Ansys CFX.

Na Figura 49 é apresentada a distribuição de temperatura na região de saída de água do coletor sendo, sendo à esquerda a distribuição na água e à direita no sólido. A radiação incide na parte superior da figura apresentada de modo que esta região apresenta temperatura superior e vai reduzindo à medida que se aproxima do fluido. Quanto maior a condutividade, menor a variação de temperatura entre as superfícies externas e interna, uma vez que o fluxo térmico é constante. Na Figura 49 é apresentada a região de saída do coletor solar para a condutividade térmica do coletor equivalente a do ABS reciclado com 20% de grafite (0,69 W/m K). Na Figura 49 (a) é mostrada a distribuição de temperatura da água no interior da tubulação, enquanto que, na Figura 49 (b) é mostrada a distribuição da temperatura na tubulação da saída.

Figura 49: Distribuição de temperatura na saída do coletor



Fonte: Autor, Ansys CFX.

Foram simuladas as condições de ABS virgem e reciclado, utilizando os valores de condutividade térmica obtidos nos testes executados. Utilizando a temperatura ambiente fixa em 25°C foram realizadas simulações considerando temperaturas de entrada da água em 25°C, 27,5°C, 30°C, 32,5°C e 35°C. Assim foi possível observar o comportamento do coletor em condições de temperatura superiores em que as perdas por convecção são maiores. Na Tabela 9 é apresentada a temperatura média de saída da água para cada condição simulada, bem como a diferença de temperatura (ΔT) entre as temperaturas de entrada e saída. Os resultados obtidos na condição de simulação com iterações até que resíduo RMS fosse inferior a 10^{-5} .

Tabela 9: Temperatura média de saída da água

Material	K (W/m K)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	ΔT (°C)
Reciclado 20%	0,69	25	29,47	4,47
		27,5	31,67	4,17
		30	33,85	3,85
		32,5	36,02	3,52
		35	38,18	3,18
Reciclado 10%	0,54	25	29,42	4,42
		27,5	31,61	4,11
		30	33,80	3,80
		32,5	35,97	3,47
		35	38,14	3,14
Reciclado 5%	0,43	25	29,40	4,40

		27,5	31,60	4,10
		30	33,79	3,79
		32,5	35,97	3,47
		35	38,13	3,13
Reciclado 2,5%	0,25	25	29,21	4,21
		27,5	31,41	3,91
		30	33,61	3,61
		32,5	35,79	3,29
		35	37,97	2,97
Reciclado 1%	0,37	25	29,36	4,36
		27,5	31,56	4,06
		30	33,75	3,75
		32,5	35,92	3,42
		35	38,09	3,09
Reciclado puro	0,21	25	29,12	4,12
		27,5	31,32	3,82
		30	33,52	3,52
		32,5	35,71	3,21
		35	37,90	2,90
Virgem 10%	0,38	25	29,32	4,32
		27,5	31,52	4,02
		30	33,71	3,71
		32,5	35,89	3,39
		35	38,06	3,06
Virgem 5%	0,60	25	29,44	4,44
		27,5	31,64	4,14
		30	33,83	3,83
		32,5	36,00	3,50
		35	38,16	3,16
Virgem 2,5%	0,48	25	29,39	4,39
		27,5	31,59	4,09
		30	33,78	3,78
		32,5	35,95	3,45
		35	38,12	3,12
Virgem 1%	0,36	25	29,30	4,30
		27,5	31,51	4,01
		30	33,70	3,70
		32,5	35,88	3,38
		35	38,05	3,05
Virgem puro	0,26	25	29,17	4,17
		27,5	31,38	3,88
		30	33,58	3,58

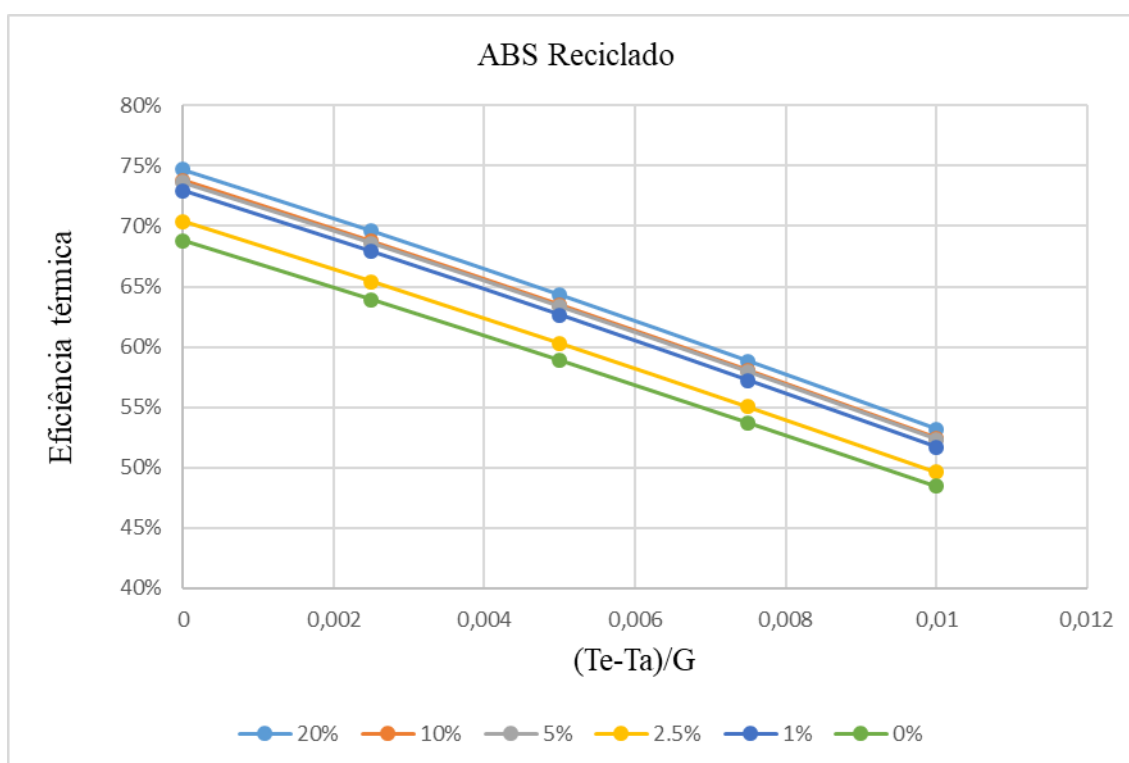
		32,5	35,77	3,27
		35	37,95	2,95

Fonte: Autor.

É observado por meio da Tabela 9 a relação entre a diferença de temperatura (ΔT) e a temperatura de entrada da água. Com o aumento da temperatura de entrada da água ocorre a diminuição do calor absorvido pelo coletor solar, reduzido assim o ΔT . É possível observar também que para a mesma temperatura de entrada o ΔT é maior a medida que a condutividade térmica do material é aumentada.

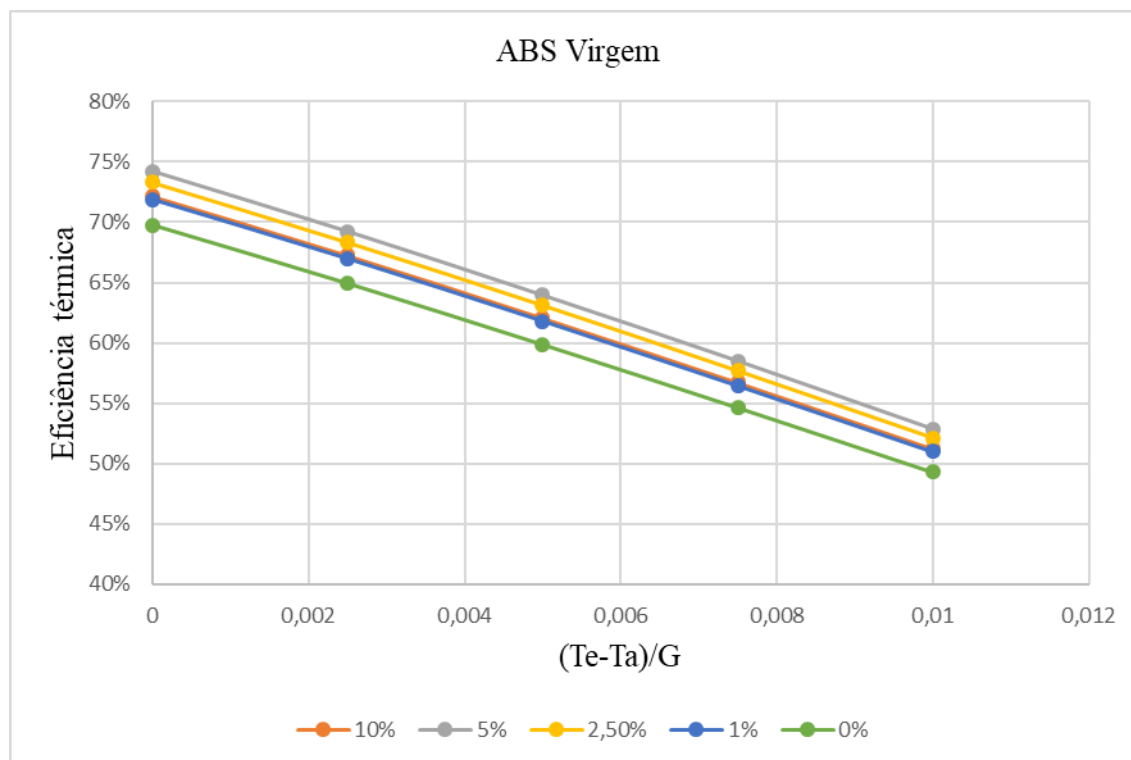
Foram aplicadas as Equações (1), (2) e (3) para a determinação do coeficiente de desempenho térmico para todas as condições presentes na Tabela 9. Foi aplicada regressão linear para a construção de gráfico de desempenho térmico do material, sob as diferentes condições de temperatura de entrada. Os resultados são apresentados nas Figura 50 e Figura 51.

Figura 50: Desempenho térmico dos coletores em ABS reciclado



Fonte: Autor.

Figura 51: Desempenho térmico dos coletores em ABS virgem



Fonte: Autor.

A partir da análise dos gráficos da Figura 50 e da Figura 51 pode-se confirmar a dependência do desempenho térmico do coletor solar com a condutividade térmica do material utilizado. No caso do reciclado existe um ganho de 5,4% no ponto médio ($(T_e - T_a)/G = 0,005$) utilizando 20% de aditivo, ao passo que, para o virgem, um ganho de 4,1%, utilizando 5% de aditivo no mesmo ponto. Na Tabela 10 é mostrada a eficiência térmica média dos coletores simulados, no ponto $(T_e - T_a)/G = 0,005$.

Tabela 10: Eficiência térmica média do coletor $(T_e - T_a)/G = 0,005$

Percentual de grafite	Eficiência térmica coletor solar	
	Virgem	Reciclado
Puro	59,9%	58,9%
1%	61,8%	62,7%
2,50%	63,1%	60,3%
5%	64,0%	63,3%
10%	62,1%	63,5%
20%	-	64,3%

Fonte: Autor.

7 CONCLUSÕES

O uso de aditivos, que apresentam elevada condutividade térmica, em polímeros na produção de coletores solares, apresenta a capacidade de modular a condutividade térmica do compósito gerado e, por conseguinte, variar o desempenho dos coletores solares. O ABS de origem reciclada, apresentou o valor de condutividade térmica de $0,21\text{W/m K}$ e quando dopado com 20% de massa de grafite obteve-se o valor de condutividade térmica da ordem de $0,69\text{W/m K}$, promovendo aumento de 3 vezes na mesma. Já para o ABS virgem, obteve-se condutividade térmica da ordem de $0,26\text{W/m K}$ e quando aplicado 5% de massa de grafite disperso obteve-se o valor de $0,60\text{W/m K}$, evidenciando aumento de 2,3 vezes na condutividade térmica. Apesar das flutuações nos valores de condutividades medidos, é possível observar que os valores experimentais tendem a convergir ao modelo de Bruggeman, conforme exposto por Chen, *et al.* (2016) para compósitos de matriz dispersa.

A partir dos valores obtidos, realizando simulação de desempenho térmico no *software Ansys CFX*, foi possível observar a dependência entre a condutividade térmica do material e o desempenho térmico de coletores solares. Sendo possível obter ganhos de desempenho térmico superiores a 5% quando utilizado o grafite com aditivo. Confirmando o modelo proposto por Tsilingiris (2000) que o desempenho térmico de coletores solares abertos aumenta com o aumento da condutividade térmica do material. No entanto, o ganho passa a ser irrisório quando a relação kp/b (razão entre a condutividade térmica e a espessura do material) é maior que 200.

O aumento da condutividade térmica do material reduz a temperatura de estagnação a que o coletor estaria sujeito. O ABS reciclado puro estaria sujeito a temperaturas na ordem de 75°C , enquanto que utilizando-se o grafite como aditivo, seria possível reduzi-la para a 68°C . Em temperatura menor o processo de degradação térmica é reduzido, porém é necessária análise mais profunda sobre o tema.

Apesar dos benefícios relativos ao uso do grafite como aditivo, sob o aspecto térmico do equipamento, o processamento torna-se mais complexo. Foi observada melhora na condutividade térmica. No entanto, em algumas condições pode ter ocorrido vazios internos e/ou variações na cristalinidade do material, que influenciaram na condutividade térmica. Tais parâmetros são de difícil controle, sendo recomendado a adoção de outros métodos de produção de corpos de prova (utilização de injeção plástica) ou outros métodos de medição de condutividade.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função das limitações encontradas durante a realização deste trabalho, algumas sugestões são propostas para que algumas questões possam ser melhor estudadas, compreendidas e exploradas. Dentre as sugestões destacam-se:

- Construção de corpos de prova por meio do processo injeção;
- Avaliação do comportamento da emissividade nos materiais;
- Avaliação da estabilidade química dos materiais desenvolvidos sob radiação solar por longo período de tempo;
- Construção de protótipo de coletor para testes experimentais;
- Utilização de grafenos e nano tubos como aditivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15747-1 Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solar. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, p. 11. 2009.

BURGER, N. et al. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. **Progress in Polymer Science**, n. 61, p. 1-28, 2016.

CALLISTER, J. . W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARLSSON, B. et al. A total cost perspective on use of polymeric materials in solar. **Applied Energy**, n. 125, p. 10-20, 2014.

CHEN, H. et al. Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications. **Progress in Polymer Science**, 2016. 41-85.

COSTA, L. L. M.; RODRIGUES, C. G. Estudo de resistência à tração e inflamabilidade de uma blenda polimérica reciclada de acrilonitrila-butadieno-estireno (abs) e poliestireno de alto impacto (hips), 2017.

DA SILVA, M. P. C. **Estudo dos Efeitos da Incorporação de Aditivos Estabilizadores à Radiação Ultravioleta Sobre as Propriedades Mecânicas e Térmicas do Polímero ABS**. Campinas. 2014.

DA SILVA, P. C. **Estudo dos Efeitos da Incorporação de Aditivos Estabilizadores à Radiação Ultravioleta Sobre as Propriedades Mecânicas e Térmicas do Polímero ABS**. CAMPINAS: UNICAMP, 2014.

DE PAOLI, M.-A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Fourth Edition. ed. University of Wisconsin- Madison: John Wiley & Sons, INC, 2013.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energetica no Brasil: Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso Classe Residencial**. [S.l.], p. 184. 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energetico Nacional: Relatório Síntese / Ano Base 2018**. Rio de Janeiro. 2019.

GREVESSES, N.; ANDERS, E.; WADDINGTON, J. Cosmic Abundances of Matter. **Amer**, New York, p. 1, 1988.

HAN, Z.; FINA, A. Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and their Polymer

Nanocomposites: A Review. **Progress in Polymer Science**, 2010. 914–944.

HIRAYAMA, D. **Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas**. Lorena: [s.n.], 2015.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, OCDE – ORGANIZATION FOR ECONOMIC. **World Energy Outlook**. Paris. 2008.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling**. OECD/IEA, 2012. Paris: [s.n.]. 2012.

KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2006.

KUESTER, S. **Preparação e Caracterização de Compósitos de Poli(Estireno-B-Etileno-Ran-Butileno-B-Estireno) com Grafite Expandido: Estudo Comparativo com Compósitos Contendo Negro de Fumo Condutor**. Florianópolis. 2013.

LEITÃO, J. M.; MACAGNAN, M. H.; ROCHA, T. L. Á. D. C. Estudo de Materiais Poliméricos para a Aplicação em Coletores Solares Planos. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 17 a 20 Abril 2018.

MARK, H. F. **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**. Third. ed. New Jersey: Wiley Interscience, v. 12, 2004.

MELO, L. <https://www.ecodebate.com.br/2009/09/21/aluminio-um-sorvedouro-de-energia-eletrica/>. **Eco Debate**, 2009. Acesso em: jan. 2019.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência: Premissas e Diretrizes Básicas**. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Brasília. 2011.

PANDEY, K. M.; CHAURASIYA, R. A Review on Analysis and Development of Solar Flat Plate Collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, January 2017. 641–650.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2^a. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PROCÓPIO, L. **Modelo Analítico para Avaliação do Desempenho Térmico e Elétrico de Módulos Fotovoltaicos Acoplados a Coletores Solares de Placa Plana Tipo**

Tubo-aleta e Serpentina. Belo Horizonte: , v. , 2017.

RAIMO,. **Aquecimento de água no setor residencial.** São Paulo: USP, 2007.

RAMSCHAK, T.; HAUSNER, R.; FINK, C. Polymeric materials in solar-thermal systems - performance requirements and loads. **Energy Procedia** **91**, 2016. 105 – 112.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática.** São Paulo: Artliber, 2011.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO. **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas.** Ministério de Minas Energia. [S.l.], p. 156. 2011.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO. **Plano Nacional de Eficiência: Premissas e Diretrizes Básicas.** Ministério de Minas Energia. [S.l.], p. 134. 2011.

SILVA, A. B. **Sistemas Nanoestruturados Condutores Baseados em Nanocompósitos Poliméricos Condutores e Mantas Eletrofiadas Condutoras.** São Carlos: , 2013.

THOMAS, R.; ROBERT, H.; CHRISTIAN, F. Polymeric Materials in Solar-Thermal Systems - Performance. **Energy Procedia**, 2016. 105 – 112.

TOULOUKIAN, Y. S. et al. **Thermophysical Properties of Matter-Thermal Conductivity-Nonmetallic Solids.** New York: CINDAS/Purdue University, v. v2, 1971.

TOULOUKIAN, Y. S.; DEWITT, D. P. **Thermal Radiative Properties - Non-metallic Solids.** NEW YORK: IFI/Plenum Data Corporation, v. Vol. 8, 1972.

TOULOUKIAN, Y. S.; DEWITT, D. P. **Thermophysical Properties of Matter v08_ Thermal Radiative Properties-Nonmetallic Solids.** NEW YORK: Purdue Research Foundation, 1972.

TSILINGIRIS, P. T. Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers. **Applied Thermal Engineering**, p. 1297-1314, 2000.

ZANIN , M.; MANCINI, D. **Resíduos Plásticos e Reciclagem: aspectos gerais e tecnologia.** 2ª. ed. São Carlos: Edufscar, 2009.

APÊNDICE A – Modelo EES

"Variáveis"

D_e=0.006 "Diâmetro externo 6mm"

V_ar=1 "Velocidade do ar externo"

esp=0.002 "espessura do material"

T_a=25 "Temperatura ambiente"

G=1000 "Radiação"

T_f=25 "Temperatura do fluido"

V_f=0.02 "velocidade do fluido"

"Condições"

b=esp

D_i=D_e-2*b "Diâmetro interno igual a Diâmetro externo menos 2 vezes a espessura"

U_b=U_t "coeficiente de perda térmica da base igual ao topo"

rho_ar=DENSITY(Air,T=T_a,P=101) "Densidade do ar"

mi_ar=VISCOSITY(Air,T=T_a) "Viscosidade do ar"

Re_ar=rho_ar*V_ar*D_e/mi_ar "Reynolds do ar"

K_ar=CONDUCTIVITY(Air,T=T_a) "Condutividade térmica do ar"

Pr_ar=PRANDTL(Air,T=T_a) "Numero de prandtl"

h_f1=h_f2

h_f=h_f1

rho_f=DENSITY(Water,T=T_f,P=101) "Densidade da água"

mi_f=VISCOSITY(Water,T=T_f,P=101) "Viscosidade da água"

Re_f=rho_f*V_f*D_i/mi_f "Numero de Reynolds da água"

k_f=CONDUCTIVITY(Water,T=T_f,P=101) "Condutividade térmica da água"

h_f=if(Re_f,2500,3.66*(k_f/D_i),0,0) "convecção interna caso laminar (Reynolds menor que 2500)"

U_t=(K_ar/D_e)*(0.3+((0.62*Re_ar^0.5*Pr_ar^(1/3))/(1+(0.4/Pr_ar)^(2/3))^(1/4))*(1+(Re_ar/282000)^(5/8))^(4/5)) "coeficiente convectivo externo"

"Dados para Gráficos"

Duplicate j=1,120

x1[j]=j*100

qe[j]=(1/(1+U_t*(1/x1[j]+1/h_f)))*(G-(U_t+U_b)*(T_f-T_a))

eta[j]=qe[j]/G "Eficiência com kp/b"

"Eficiência em função da condutividade do material com temperatura do fluido igual a do ar"

k_p[j]=j*0.1 "Variação da condutividade do material em passos 0,1"

q0.0005[j]=1/(1+U_t*(1/k_p[j]/(1/0.0005)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(k_p[j]/0.0005)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(k_p[j]/0.0005))))*(0))

q0.001[j]=1/(1+U_t*(1/(k_p[j]/0.001)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(k_p[j]/0.001)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(k_p[j]/0.001))))*(0))

q0.002[j]=1/(1+U_t*(1/(k_p[j]/0.002)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(k_p[j]/0.002)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(k_p[j]/0.002))))*(0))

eta0.0005[j]=q0.0005[j]/G "Eficiência com espessura de 0,5mm"

eta0.001[j]=q0.001[j]/G "Eficiência com espessura de 1,0mm"

eta0.002[j]=q0.002[j]/G "Eficiência com espessura de 2,0mm"

"Eficiência em função da condutividade do material variando a temperatura do fluido"

DeltaT[j]=j*0.1 "Variação da temperatura em passos 0,1"

x[j]=DeltaT[j]/G" Eixo X (Te-Ta)/G)"

qe0.1[j]=1/(1+U_t*(1/(0.1/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(0.1/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(0.1/esp))))*(DeltaT[j]))

qe0.25[j]=1/(1+U_t*(1/(0.25/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(0.25/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(0.25/esp))))*(DeltaT[j]))

qe0.5[j]=1/(1+U_t*(1/(0.5/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(0.5/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(0.5/esp))))*(DeltaT[j]))

qe1[j]=1/(1+U_t*(1/(1/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(1/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(1/esp))))*(DeltaT[j]))

qe2.5[j]=1/(1+U_t*(1/(2.5/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(2.5/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(2.5/esp))))*(DeltaT[j]))

qe25[j]=1/(1+U_t*(1/(25/esp)+1/h_f1))*(G-(U_t+U_b*(h_f2*(U_t+h_f1+h_f1*U_t/(25/esp)))/(h_f1*(U_b+h_f2+h_f2*U_b/(25/esp))))*(DeltaT[j]))

eta0.1[j]=qe0.1[j]/G " Eficiência com k=0,1W/m k"

eta0.25[j]=qe0.25[j]/G" Eficiência com k=0,25W/m k"

eta0.5[j]=qe0.5[j]/G" Eficiência com k=0,5W/m k"

eta1[j]=qe1[j]/G" Eficiência com k=1,0W/m k"

eta2.5[j]=qe2.5[j]/G" Eficiência com k=2,5W/m k"

eta25[j]=qe25[j]/G" Eficiência com k=25W/m k"

end

ANEXO A- BET Grafite

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction
for NOVA Instruments
©1994-2013, Quantachrome Instruments
version 11.03

**Analysis**

Operator: CEFET EngMat
Sample ID: A1
Sample Desc:
Sample weight: 0.0379 g
Outgas Time: 16.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)
Analysis Time: 252.9 min
Cell ID: 0

Date: 2018/09/27

Filename: sttn_A_20180927_4.cps
Comment: Naira - Marcello 05-09
Sample Volume: 1 cc
Outgas Temp: 200.0 C
Bath Temp: 273.0 K
Equil time: 60/60 sec (ads/des)
End of run: 2018/09/27 17:53:06

Report

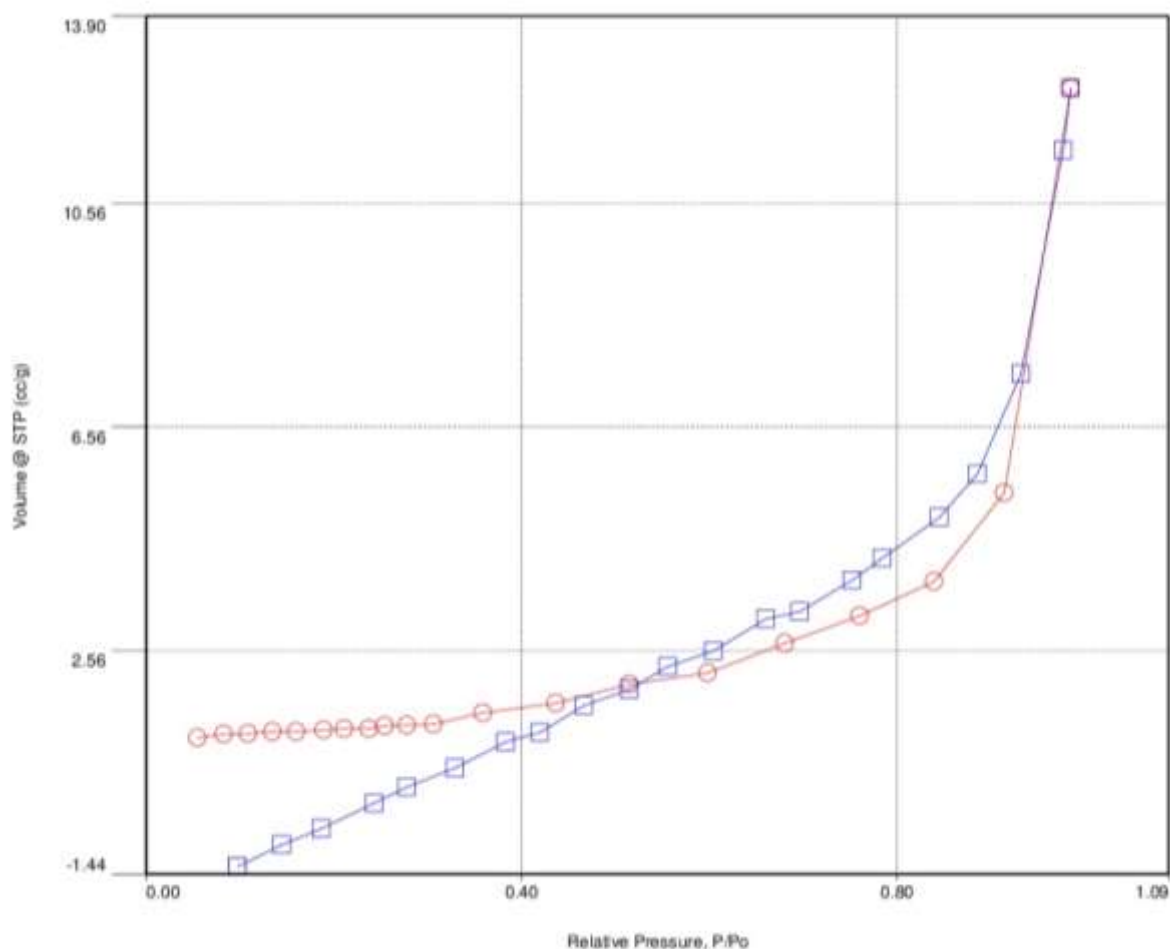
Operator: CEFET EngMat
sttn_A_20180927_4.cps
Naira - Marcello 05-09
1 cc
200.0 C
273.0 K
60/60 sec (ads/des)
2018/09/27 17:53:06

Date: 2018/10/22

Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)
Instrument: Nova Station A

Isotherm : Linear

Adsorbate		Data Reduction Parameters		
Nitrogen		Temperature	77.350K	Liquid Density: 0.808 g/cc
Molec. Wt.: 28.013		Cross Section:	16.200 Å ²	



Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction
for NOVA Instruments
©1994-2013, Quantachrome Instruments
version 11.03



Analysis

Operator: CEFET EngMat
Sample ID: A1
Sample Desc:
Sample weight: 0.0379 g
Outgas Time: 16.0 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Press. Tolerance: 0.100/0.100 (ads/des)
Analysis Time: 252.9 min
Cell ID: 0

Date: 2018/09/27

Filename: stn_A_20180927_4.qps
Comment: Naira - Marcelo 05-09
Sample Volume: 1 cc
OutgasTemp: 200.0 C
Bath Temp: 273.0 K
Equil time: 60/60 sec (ads/des)
End of run: 2018/09/27 17:53:06

Report

Operator: CEFET EngMat
stn_A_20180927_4.qps
Naira - Marcelo 05-09

Date: 2018/10/22

Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)
Instrument: Nova Station A

BJH Pore Size Distribution Adsorption

Data Reduction Parameters Data

t-Method
BJH/DH method
Adsorbate

Calc. method: de Boer
Moving pt. avg.: off
Nitrogen
Molec. Wt.: 28.013

Ignoring P-tags below 0.35 P/Po
Temperature 77.350K
Cross Section: 16.200 Å²

Liquid Density: 0.808 g/cc

BJH Pore Size Distribution Adsorption Data

Radius [Å]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [m²/g]	dV(r) [cc/Å/g]	dS(r) [m²/Å/g]	dV(logr) [cc/g]	dS(logr) [cc/g]
16.1043	1.8166e-04	2.2560e-01	6.5671e-05	8.1557e-02	2.4292e-03	3.0168e+00
19.2348	9.2405e-04	9.9752e-01	2.1242e-04	2.2087e-01	9.3823e-03	9.7555e+00
23.4690	1.1415e-03	1.1829e+00	4.3726e-05	3.7263e-02	2.3541e-03	2.0061e+00
29.5414	2.2687e-03	1.9459e+00	1.5718e-04	1.0641e-01	1.0639e-02	7.2027e+00
38.7249	3.2100e-03	2.4321e+00	8.4079e-05	4.3424e-02	7.4446e-03	3.8449e+00
55.0207	4.3116e-03	2.8326e+00	5.1488e-05	1.8716e-02	6.4400e-03	2.3409e+00
92.9111	7.2734e-03	3.4701e+00	5.4460e-05	1.1723e-02	1.1310e-02	2.4346e+00
385.8626	1.9322e-02	4.0946e+00	2.2668e-05	1.1749e-03	1.6405e-02	8.5030e-01

BJH adsorption summary

Surface Area = 4.095 m²/g
Pore Volume = 0.019 cc/g
Pore Radius Dv(r) = 19.235 Å