

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JONATHAN TEIXEIRA BRAIANI HIPOLITO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO POLÍMERO-SiC

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

JONATHAN TEIXEIRA BRAIANI HIPOLITO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO POLÍMERO-SiC

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO POLÍMERO-SiC

Jonathan Teixeira Braiani Hipolito

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 19/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

* A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Celso Aparecido Hipolito, que foi o único de minha família que apostou que eu não voltaria para casa sem o diploma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o criador de tudo e que me abençoou durante todo o período da graduação.

Aos meus pais Celso e Regina que além do apoio emocional durante os momentos mais difíceis também investiram e confiaram em mim.

A minha namorada, Vivieli, que me proporcionou os melhores momentos e as risadas mais sinceras que tive nos últimos anos, por ser meu porto seguro e nunca me deixar desistir, por isso, o mais sincero, obrigado.

A minha irmã Jhennifer que sempre torceu por mim e serviu de inspiração durante esses últimos cinco anos.

Aos meus amigos de infância, que me acompanham até hoje, Carol, Lidi, Isa, Matheus e Rafa.

Aos amigos que criei ao longo da graduação, pois sem eles nada disso teria tanta graça, Pietro, Willian, Douglas, Gustavo Copetti, Higor, Luiz Queiroz, Clayton, Guilherme, Lucas, Vinicius, Mineiro, Volmir, Sharlane e Paulo.

Ao meu orientador Dalmarino Setti, que compartilhou seus conhecimentos e auxiliou na busca por outros.

A professora Maria Nalu que me auxiliou e acompanhou durante esse último ano em todas as vezes que precisei.

Aos colaboradores dos laboratórios de mecânica e elétrica, Vitor Baldin, Vitor Vargas, Antônio, Cicero e Célio.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

HIPOLITO, Jonathan. Obtenção e caracterização de compósito polímero-SiC. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Este trabalho tem por objetivo obter um compósito de PBT-SiC e caracterizar suas propriedades, a proporção da mistura do compósito foi definida de acordo com a lei das misturas, foram produzidas duas composições com 5% e 10% de SiC. Durante o trabalho foram confeccionados dois moldes, um para obter corpos de prova para o ensaio de tração e outro para flexão, os corpos de prova foram ensaiados de acordo com as normas ASTM D638-03 e ASTM D792 respectivamente. Os ensaios de caracterização foram a determinação da massa específica, ensaio de tração e ensaio de flexão, a partir desses ensaios foi possível obter os módulos de tensão de ruptura à tração e a flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Os compósitos de PBT-SiC de 10% e 5% apresentaram valores de resistência à flexões menores do que o PBT puro, maiores valores de módulo de elasticidade, e menores módulos de tenacidade evidenciando a fragilização da matriz de PBT devido a adição de SiC.

Palavras-chave: Compósito. PBT. Carbetto de silício. Polímero. Termoformagem.

ABSTRACT

HIPOLITO, Jonathan. Obtainment and characterization of polymer-SiC composite. 51 f. Final paper- Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

This work aims to obtain a composite of PBT-SiC and to characterize its properties, the proportion of the composite mixture was defined according to the law of the mixtures, two compositions were produced with 5% and 10% SiC. Two molds were made, one for tensile test specimens and one for flexure, the specimens were tested according to ASTM D638-03 and ASTM D792 respectively. The characterization tests were the determination of the specific mass, tensile test and flexural test; from these tests, it was possible to obtain the tensile modulus and flexural modulus, modulus of elasticity and tenacity. The composites of 10% and 5% PBT-SiC showed lower flexural modulus values than pure PBT, higher modulus of elasticity, and lower modulus of tenacity, evidencing the embrittlement of the PBT matrix due to the addition of SiC.

Keywords: Composite. PBT. Silicon carbide. Polymer. Thermoforming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – BMW i3 leva PBT na estrutura	18
Figura 2 - Características geométricas e espaciais das partículas de fase dispersa que podem influenciar nas propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, (e) orientação.....	20
Figura 3 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.....	21
Figura 4 – Aeronave Super – Tucado EMB 314.....	25
Figura 5– Equipamentos para mistura simples – (a) misturador de duplo cone, (b) misturador em V.	26
Figura 6 - Curva tensão x deformação	28
Figura 7 - Comportamento típico da curva tensão-deformação até a fratura do material, ponto F.	29
Figura 8 - Representação do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e materiais dúcteis até a fratura.	30
Figura 9 – Exemplo de ensaio de flexão	32
Figura 10- Medidas corpo de prova.....	36
Figura 11- Dimensões do corpo de prova para flexão.....	37
Figura 12 – Misturas de 10% e 5% de SiC respectivamente	39
Figura 13 - Molde para moldagem por fusão pronto	40
Figura 14 - Lamina de compósito.....	41
Figura 15 – Matriz de corte de corpo de prova e corpos de prova de tração com 10% de SiC	41
Figura 16 – Corpos de prova de flexão: puro, 10% e 5% de SiC respectivamente ...	42
Figura 17 – CP's de 10% de SiC rompidos	44
Figura 18 - Ensaio de flexão com CP de 5 % de SiC.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do SiC à temperatura ambiente	15
Tabela 2 – Classificação dos principais termoplásticos comerciais	17
Tabela 3 – Parâmetros da mistura do compósito	34
Tabela 4 – Dimensões do corpo de prova, tipo I	36
Tabela 5 – Dimensões do corpo de prova para flexão	37
Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com 10% de SiC ...	44
Tabela 8– Resultado do ensaio de flexão	45
Tabela 9 – Resultado do ensaio de flexão	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CARBETO DE SILÍCIO (SIC)	15
2.2 POLÍMEROS	16
2.2.1 PBT	17
2.3 COMPÓSITOS	19
2.3.1 Compósitos reforçados com partículas	21
2.3.2 Compósitos poliméricos	22
2.4 COMPÓSITO PBT-SIC	24
2.5 APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS	25
2.6 MISTURA SIMPLES	26
2.7 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	26
2.7.1 Termoformagem	26
2.8 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	27
2.8.1 Ensaio mecânicos	27
2.8.2 Ensaio de tração	27
2.8.4 Ensaio de flexão	31
2.8.5 Determinação da massa específica	32
MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MATERIAIS	33
3.2 OBTENÇÃO DO MOLDE PARA OBTER CP DE TRAÇÃO	33
3.3 OBTENÇÃO DO MOLDE PARA OBTER CP DE FLEXÃO	33

3.4 PROCESSO DE MISTURA.....	33
3.5 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO	34
3.5.1 Obtenção da lamina de compósito para tração	34
3.5.2 Obtenção do corpo de prova para flexão	34
3.6 CARACTERIZAÇÃO	35
3.6.1 Determinação da massa específica	35
3.6.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	35
3.6.3 ENSAIO DE FLEXÃO.....	36
3.6.3.1 Determinação do módulo de elasticidade.....	37
3.6.3.2 Determinação do módulo de tenacidade	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 MISTURA.....	39
4.2 MOLDES	39
4.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	40
4.3.1 Obtenção da lamina de compósito	40
4.3.2 Corte do corpo de prova para tração.....	41
4.3.3 Retirada dos corpos de prova de flexão	42
4.4 MASSA ESPECÍFICA.....	43
4.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	43
4.6 ENSAIO DE FLEXÃO	44
5 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Após décadas de uso restrito em alguns setores da indústria, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas, os compósitos poliméricos estruturais, também denominados avançados, têm ampliado a sua utilização em diferentes setores da indústria moderna, com um crescimento de uso de 5% ao ano. Atualmente, a utilização de estruturas de alto desempenho e com baixo peso tem sido feita nas indústrias automotiva, esportiva, de construção civil, entre outras (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Felizmente a tecnologia de novas aeronaves e estruturas de engenharia mais leves estão na beira de uma revolução, com a mudança de metais como material base para estruturas híbridas que é baseada em polímeros reforçados com fibras que são misturados com elementos metálicos.

Não é à toa que a indústria aeronáutica investe em pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais, o mundo está cada vez mais conectado, e tornar essas conexões mais baratas é o objetivo e ambição de todos.

A grande dificuldade de se utilizar materiais mais leves é manter a segurança que os já empregados proporcionam, por isso, devemos escolher materiais que possuam as mesmas ou melhores propriedades dos antigos e realizar uma série de testes para comprovar a veracidade do estudo.

O cerâmico SiC possui alta dureza como uma de suas principais características, o polímero PBT (Polibutileno Tereftalato) possui boa ductilidade e tenacidade, baixa densidade e resistência térmica aceitável, o que torna esses materiais excelentes objetos de estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A fim de obter mais lucro reduzindo custos, as empresas buscam diminuir o peso de seus produtos sem comprometer as propriedades mecânicas que suas estruturas requerem, compósitos vem sendo alvo de pesquisa há algum tempo e já apresenta resultados significativos (HELMS; LAMBRECHT,2004).

Um estudo recente realizado por Helms e Lambrecht (2004), diz que 100 Kg de redução de massa em uma aeronave que percorra grandes distâncias acarretam em uma economia de 667 GJ/ano, tendo que a energia específica por litro

é de 35 MJ/litro temos uma economia de 19.000 litros de combustível por ano a cada 100 Kg de redução na massa de um avião.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo produzir um compósito PBT-SiC e caracterizar o mesmo em relação às propriedades mecânicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral o trabalho é dividido nos seguintes objetivos específicos: (i) determinar os parâmetros da mistura PBT-SiC; (ii) confeccionar o dispositivo de moldagem por fusão; (iii) obter corpos de prova de tração e flexão; (iv) caracterizar os compósitos obtidos em relação as propriedades mecânicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARBETO DE SILÍCIO (SiC)

O carbetto de silício (SiC) é um material cerâmico amplamente utilizado nas indústrias de refratários, de fundição e de abrasivos, em diversas aplicações, devido às suas propriedades mecânicas, elétricas e químicas exclusivas, como resistência à corrosão, dureza e resistência química a muitos materiais (LIMA, 2011).

As propriedades do SiC variam de acordo com o método de obtenção do mesmo, porém são propriedades comuns do SiC elevada dureza e resistência mecânica, alta temperatura de fusão, inércia química e elevadas resistências ao choque térmico e oxidação (CHIMELLI, 2010).

A Tabela 1 abaixo lista algumas propriedades do SiC à temperatura ambiente.

Tabela 1 – Propriedades do SiC à temperatura ambiente

Propriedade	Sinterização Convencional	Prensado a quente
Densidade Teórica (g/cm ³)	3,2	3,20
Módulo de Elasticidade (GPa)	207 – 483	207 – 483
Limite de Resistência à Tração (MPa)	230 – 825	96 – 520
Tenacidade à Fratura (MPa. \sqrt{m})	4,8 – 6,1	4,8
Coefficiente de Expansão Térmica (10E6 (°C) ⁻¹)	4,6	4,5
Conductividade térmica (W/m.K)	85	71
Calor Especifico (J/Kg.K)	670	590
Resistividade Elétrica (W.m)	1,0E9	1,0E9

Fonte: (“GUBERNAT, A.; STOBIERSKI, L.; LABAJ, P.. *Microstructure and mechanical properties of silicon carbide pressureless sintered with oxide additives. Journal Of The European Ceramic Society*, p. 781-789. , 2007.).

2.2 POLÍMEROS

Polímeros são compostos químicos de pesos moleculares elevados, constituídos pela associação de muitas moléculas pequenas, iguais ou de vários tipos diferentes, unidas umas às outras por ligações covalentes.

Os polímeros podem ser divididos em três categorias principais, termoplásticos, termorrígidos e elastômeros.

Os polímeros termorrígidos ou termofixos são polímeros que sob aquecimento amolecem uma só vez e sofrem cura (transformação química irreversível) e ficam rígidos (GONÇALVES, 2006).

Ao se aquecer novamente o material não amolece mais, acaba se deteriorando antes da fusão, entretanto, sua reciclagem é possível, porém, para outras finalidades e não as mesmas que possuía antes (GONÇALVES, 2006).

Os elastômeros são polímeros que podem ser alongados até duas vezes o seu comprimento e retornam de forma rápida ao seu tamanho original quando retirado a pressão, são conhecidos como borrachas (GONÇALVES, 2006).

Segundo Gonçalves (2006) o termoplástico é um dos mais encontrados no mercado, um dos motivos, é que pode ser reutilizado várias vezes, possui como característica principal a capacidade de amolecer e fluir quando exposto a um aumento de temperatura e pressão

Os termoplásticos são divididos em três principais aplicações, uso geral, engenharia e uso especial, a Tabela 2 a seguir mostra a classificação dos principais termoplásticos comerciais (MCQUINTON, 1980, apud FILHO, 2002).

Tabela 2 – Classificação dos principais termoplásticos comerciais

Termoplásticos		
Uso Geral	Engenharia	Uso especial
Polietileno de baixa densidade (LDPE)	Nailons (PA 6, PA 66)	Polieter-eter-cetona (PEEK)
Polietileno de alta densidade (HDPE)	Policarbonato (PC)	Polieterimida (PEI)
Polipropileno (PP)	Polioxifenileno (PPO)	Poliamidaimida (PAI)
Policloreto de vinila (PVC)	Poliacetal (POM)	Cristais Líquidos (LCP)
Polimetacrilato de metila (PMMA)	Polietileno tereftalato (PET)	Politetrafluoretileno (PTFE)
Poliestireno (PS)	Polibutileno tereftalato (PBT)	Polisulfonas (PSF)
Poliestireno de alto impacto (HIPS)		

Fonte: (“*Designing with Engineering Plastics*”, *Plastics Engineering*, pp. 18-25, 1980).

Os termoplásticos de engenharia possuem alto desempenho e caracterizados por um excelente equilíbrio das principais propriedades físicas, mecânicas e químicas para aplicações de engenharia, podemos citar as principais propriedades sendo, elevada dureza, tenacidade e resistência ao impacto, resistência a se deformar plasticamente, resistência a fadiga, estabilidade dimensional, resistência química e ao envelhecimento sob intempéries (COELHO FILHO, 2002).

2.2.1 PBT

O PBT, Polibutileno Tereftalato é um termoplástico, semi-cristalino usado na maioria das vezes para moldagem por injeção para aplicações de Engenharia (RESINEX, 2018).

Por causa da sua longa sequência de grupos metileno se repetindo nas unidades poli (butilenos tereftalato), as cadeias são mais flexíveis e menos polares do que poli (tereftalado de etileno), o que leva a baixos valores de ponto de fusão em torno de 224 °C e temperatura de transição vítrea em torno de 22 a 43 °C (CHANDA e ROY, 2006).

A baixa temperatura de transição vítrea facilita uma rápida cristalização quando resfriado no molde, permitindo ciclos de injeção com tempos baixos e velocidades altas (CHANDA e ROY, 2006).

Segundo Chanda e Roy (2006) possui bastante uso como material de Engenharia, devido a sua estabilidade dimensional, principalmente na água, possui alta resistência mecânica e excelentes propriedades elétricas, a lubrificação da resina resulta em uma ótima resistência ao desgaste.

Aplicações típicas do PBT são sistemas hidráulicos, buchas de rolamento, rodas dentadas, parte exterior de automóveis e peças sob o capô, partes elétricas como conectores (CHANDA e ROY, 2006).

Indústrias automobilísticas utilizam o PBT em suas estruturas, como a própria BMW que inovou usando o PBT na estrutura de suas portas, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – BMW i3 leva PBT na estrutura



Fonte: (Fairbanks, Marcelo. **Plástico nos automóveis: Inovar-auto abre caminho para ampliar as aplicações dos polímeros na indústria automobilística nacional**. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/plastico-nos-automoveis-inovar-auto-abre-caminho-para-ampliar-aplicacoes-dos-polimeros-na-industria-automobilistica-nacional>>. Acesso em: 16 de junho de 2018, 21:01.)

2.3 COMPÓSITOS

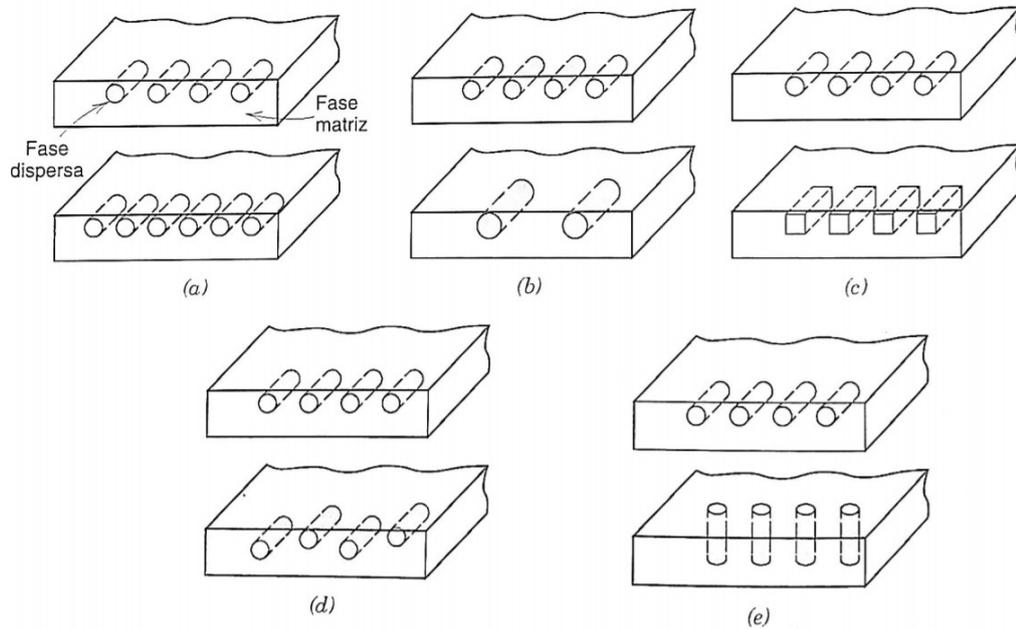
Compósito é um material multifásico com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas por materiais existentes, tais como, ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais (CALLISTER, 2002).

Engenheiros responsáveis pela indústria aeronáutica, automobilística e naval buscam constantemente materiais que tenham baixa densidade, sejam resistentes, rígidos e que possuam resistência a abrasão e impacto sem serem facilmente oxidados, as combinações e faixas de propriedades ainda estão sendo estudadas a partir do desenvolvimento de novos materiais compósitos (CALLISTER, 2002).

Basicamente podemos dizer que um compósito é um material composto de mais de uma fase e que combina propriedades mecânicas dessas distintas fases a fim de obter um material com as melhores propriedades possíveis para determinada aplicação (CALLISTER, 2002).

A maioria dos compósitos é formada pela combinação de dois materiais distintos, no qual, um é chamado de matriz e o outro de fase dispersa, as propriedades dos compósitos são uma função das propriedades de seus constituintes, das quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, geometria da fase dispersa é a forma das partículas, tamanho e o método de distribuição pela matriz, que pode ser observado na Figura 2 a baixo (CALLISTER, 2002).

Figura 2 - Características geométricas e espaciais das partículas de fase dispersa que podem influenciar nas propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, (e) orientação.



Fonte: (Richard A. Flinn e Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 4th edition, 1990).

Os compósitos são divididos em três divisões principais, que são compósitos reforçados com partículas, com fibras e compósitos estruturais. Para os compósitos reforçados com partículas possuem as mesmas dimensões de partículas em todas as direções, já os reforçados com fibra possuem uma grande razão entre o comprimento e diâmetro, essa subdivisão pode ser mais bem visualizada com o fluxograma visto na Figura 3 (CALLISTER, 2002).

Figura 3 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.



Fonte: (William D. Callister Jr, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 5ª edição, 2000)

2.3.1 Compósitos reforçados com partículas

Na Figura 3 os compósitos com partículas grandes e reforçadas por dispersão são as duas subclassificações dos compósitos reforçados por partículas, a diferença entre elas está no mecanismo do reforço ou do aumento na resistência. Na maioria dos compósitos a fase particulada (reforço) é mais dura e mais rígida do que a matriz, essas partículas do reforço restringem o movimento da matriz, com isso a matriz transfere parte da tensão aplicada para as partículas (CALLISTER, 2002).

O mecanismo do aumento de resistência é semelhante ao processo de endurecimento por precipitação, onde as pequenas partículas dispersas dificultam o movimento das discordâncias. Desse modo a deformação plástica é restringida fazendo com que o limite de escoamento e de resistência à tração bem como a dureza aumentem (CALLISTER, 2002).

Os compósitos reforçados por partículas são resultantes da introdução de reforçastes que possuam uma razão de aspecto (relação entre a maior e menor dimensão do corpo L/D) menor que 3. As cargas particuladas (reforço) podem estar na forma de partículas, escamas ou plaquetas. As que estão em forma de partículas

são materiais sólidos que adicionados ao polímero em quantidade suficiente alteram as suas propriedades físicas e/ou mecânicas (BARRA, 2006).

2.3.2 Compósitos poliméricos

Segundo Rabello (2000) compósitos que utilizam matriz polimérica são compósitos onde é desejável alguma ductilidade e ao se adicionar reforçadores na matriz polimérica podemos obter outras propriedades como, maior estabilidade dimensional somada com uma menor retração de moldagem, menor dependência das propriedades com a temperatura, maior rigidez e dureza, menor fluência e custo.

Para a obtenção do compósito é necessário haver uma interação entre a matriz e o reforço, transferindo os esforços mecânicos entre si (RABELLO, 2000).

Segundo Rabello (2000) além das características geométricas e espaciais da fase dispersa temos outros fatores que influenciam as propriedades dos compósitos poliméricos, que são, propriedades dos componentes individuais e composição, interação entre as fases, razão de aspecto e porosidade da carga, dispersão da fase reforçada.

Quando fabricamos um compósito temos o objetivo de obter um material que tenha propriedades mecânicas intermediárias das diferentes fases constituintes, esse comportamento pode ser previsto pela regra das misturas, que é demonstrada pela Equação (1):

$$P_c = P_m * V_m + P_d * V_d \quad (1)$$

Em que:

P é a propriedade procurada;

c é o índice que se refere ao compósito;

m é o índice que se refere a fase matriz;

d é o índice que se refere a fase dispersa.

A transferência de tensão entre o polímero e o material reforçador ocorre através da região de contato, chamada de interface. Uma boa aderência resulta em boas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e resistência mecânica.

Para alcançar a aderência do material reforçador com a matriz polimérica utilizamos de algumas técnicas, as mais utilizadas são:

Adsorção e molhamento: um molhamento eficiente da carga pelo polímero remove o ar incluso e cobre todas as suas protuberâncias. Este mecanismo, que depende das tensões superficiais dos componentes, fica impossibilitado de ocorrer quando há camadas de água na superfície da carga, fato comum em cargas hidrofílicas. A adsorção e molhamento da carga pelo polímero também influem no estado conformacional das macromoléculas (alterando a temperatura vítrea) e na cristalização do polímero, podendo atuar como nucleantes heterogêneos. (RABELLO, 2000).

Inter difusão: É possível formar uma ligação entre duas superfícies poliméricas pela difusão de moléculas de uma fase para a outra. Em compósitos isto pode ocorrer quando as fibras são pré-cobertas com um polímero antes de serem incorporadas pela matriz. A resistência da ligação depende do grau de emaranhamento molecular gerado, que é facilitado com a presença de plastificantes ou solventes (RABELLO, 2000).

Atração eletrostática: Ocorre quando duas superfícies possuem cargas elétricas opostas, como nos casos de interações ácido-base e ligações iônicas. A resistência da ligação depende da densidade de cargas elétricas. Embora não seja um mecanismo decisivo, tem grande importância em alguns tipos de tratamentos superficiais da carga (RABELLO, 2000).

Ligação química: É a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre geralmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que servem de ponte entre o polímero e o reforço, como resultado de sua dupla funcionalidade. A resistência da interface depende do número e tipo de ligações químicas presentes (RABELLO, 2000).

Adesão mecânica: É resultado do preenchimento pelo polímero dos entalhes da carga, que é na verdade rugosa, com cantos vivos, cavidades e outras irregularidades. A resistência desta ligação tende a ser baixa, a menos que haja um grande número de ângulos de reentrância na superfície da carga (RABELLO, 2000).

Das formas de adesão expostas acima a adsorção e a ligação química são as formas mais significativas de se obter reforço. Considerando a falta de afinidade inerente entre o polímero (orgânico) e a carga (geralmente inorgânica), a modificação superficial da carga com agentes de acoplamento tem grande importância no

desenvolvimento do compósito. O agente de acoplamento promove a união química entre as fases ou altera a energia superficial da carga para permitir um molhamento eficiente (RABELLO, 2000).

Razão de aspecto e porosidade da carga: Quando a razão de aspecto é alta a transferência de tensões entre a matriz e reforço é mais eficiente, com isso temos que o reforço mais eficiente são as fibras, seguidas por escamas ou plaquetas e por último, partículas esféricas (razão de aspecto igual a 1) (RABELLO, 2000).

O tamanho das partículas é importante pois define a área de contato com a matriz, geralmente ao se diminuir o tamanho da partícula aumentamos a resistência do compósito (RABELLO, 2000).

Dispersão da fase reforçadora: Uma boa distribuição das partículas pela matriz é uma condição necessária para se obter propriedades mecânicas melhores. É normal que as partículas reforçadoras se aglomerem, formando agregados, impedindo o envolvimento pela matriz o que gera concentração de tensões e redução das propriedades mecânicas.

A mistura deve ser realizada em equipamentos que promovam boa dispersão como extrusora de dupla rosca ou misturadores internos (RABELLO, 2000).

2.4 COMPÓSITO PBT-SiC

Compósitos com matrizes poliméricas são utilizados devido a propriedades únicas como baixo peso, custo inferior, facilidade de processamento e diversas variações em sua composição (YUAN *et al.*, 2018).

Um grande número de diferentes polímeros vem sendo utilizado na manufatura aditiva, porém, a produção e aplicação desses produtos enfrentam alguns desafios como: propriedades mecânicas inferiores, baixa estabilidade térmica e consistência e repetitividade limitadas (YUAN *et al.*, 2018).

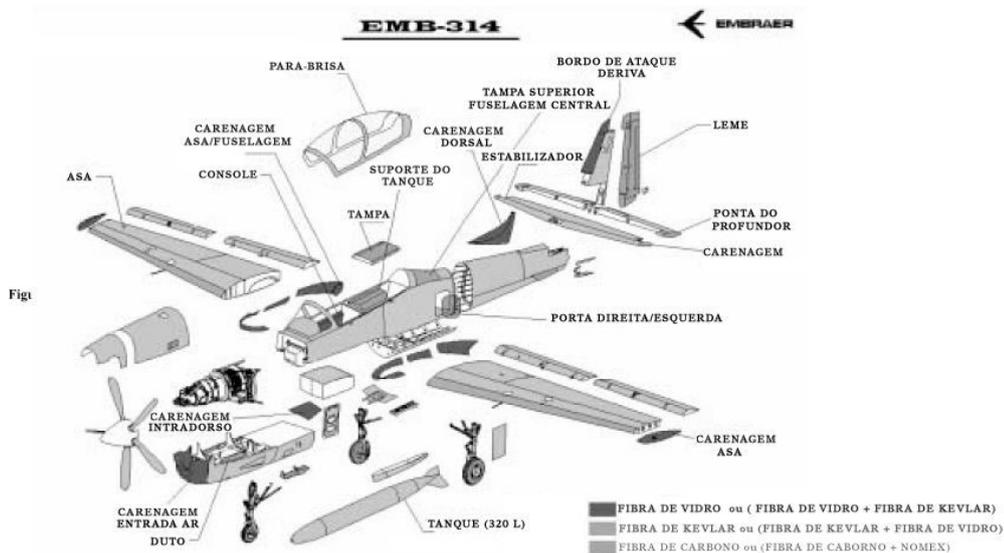
O aditivo tem grande influência no resultado final do compósito, de encontro com isso nós temos o carbetto de silício (SiC), que possui propriedades superiores como dureza a elevada temperatura, resistência a oxidação e estabilidade na sua microestrutura sob irradiação, atualmente há um esforço na pesquisa e desenvolvimento em compósitos com SiC para uso aeronaves e reatores de potência de fusão (KOTANI *et al.*, 2002).

Compósitos poliméricos permitem um material alternativo para aplicações na engenharia e uso doméstico, compósitos nano poliméricos são constantemente estudados devido a uma melhora em sua performance quando uma pequena quantidade de nano partículas é adicionada na matriz, compósitos com SiC como aditivo tem diversas aplicações, como: mecânica, automobilística, marítima, aparelhos e embalagens (SELVAM; RAVI; RAJA, 2017).

2.5 APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS

A Embraer é uma das empresas que investem em novos materiais, podemos ver o super-tucano EMB – 314 que é uma aeronave turboélice de ataque leve e treinamento avançado, que incorpora os últimos avanços em aviônicos e armamentos, neste modelo foi usado diversos materiais compósitos, como podemos ver na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Aeronave Super – Tucano EMB 314

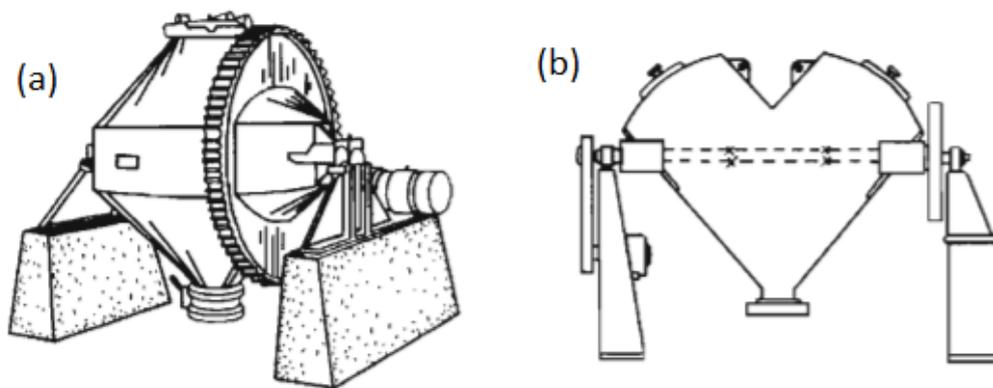


Fonte: (Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, nº 2, 2000).

2.6 MISTURA SIMPLES

O método mais simples é realizado por tamboreamento, onde o polímero é alocado junto com o aditivo e posto a girar por tempo determinado (15 minutos a 1 hora), promovendo a mistura distributiva dos materiais. Os mais utilizados são o misturador de duplo cone e o em V, conforme Figura 5 (RABELLO, 2000).

Figura 5– Equipamentos para mistura simples – (a) misturador de duplo cone, (b) misturador em V.



Fonte: (Rabello, M., Aditivos de polímeros, 2000, e Rodriguez, 1984)

2.7 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Diversos processos de fabricação são utilizados para se obter peças plásticas, dependendo do tipo de produto desejado, matéria prima utilizada e escala de produção (CHANDA e ROY, 2006).

Como há uma grande variedade de processos, este trabalho ira focar no processo utilizado para atingir o objetivo geral.

2.7.1 Termoformagem

Quanto aquecido, termoplásticos ficam moles e podem ser moldados em qualquer formato dado, a termoformagem pode ser realizada de três maneiras principais, (a) moldagem com vácuo, (b) moldagem por pressão, (c) moldagem mecânica. Em geral a termoformagem é mais indicada em casos onde o molde possui uma grande área e paredes finas (CHANDA e ROY, 2006).

Neste trabalho iremos focar no processo (a) moldagem com vácuo, que é o que iremos nos basear para atingir os objetivos gerais.

No processo de moldagem com vácuo o termoplástico é simplesmente preso contra o molde e então é aquecido até começar a ficar macio, quando chega a este ponto o molde é fechado e o ar da cavidade é removido com o auxílio de uma bomba de vácuo, forçando o polímero a entrar nos contornos do molde, o vácuo é mantido até a peça começar a ficar rígida (CHANDA e ROY, 2006).

2.8 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

2.8.1 Ensaio mecânicos

O projeto de engenharia, principalmente de um componente mecânico requer um amplo conhecimento dos materiais disponíveis para a concepção do mesmo. Para isso são utilizadas ferramentas que simulam o mais próximo possível as condições reais de serviço, essas ferramentas, também conhecidas como ensaios mecânicos consideram a natureza da carga aplicada, duração desta carga e as condições ambientais.

A carga aplicada pode ser de tração, compressão ou cisalhamento e o seu valor pode ser constante ao longo do tempo ou variar em um dado intervalo de tempo.

A temperatura é uma das propriedades que se destaca dentro das condições ambientais que simulam situações reais de serviço. (CALLISTER, 2002)

2.8.2 Ensaio de tração

O ensaio consiste em aplicar uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova especificado por norma até a ruptura. É um dos ensaios mais utilizados na indústria dos componentes mecânicos devido a fornecer diversas propriedades mecânicas de maneira relativamente barata e rápida (DALCIN, 2007).

Com este ensaio é possível afirmar que praticamente todas as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até se atingir a carga máxima próxima ao final do ensaio. O Equipamento que realizara o ensaio de tração deve ter suas calibrações em dia e possuir uma boa precisão para se garantir bons resultados (CALLISTER, 2002).

Segundo Callister (2002) normalmente os corpos de prova possuem a seção reta circular, porém corpos de prova retangulares também são utilizados. Durante os ensaios a deformação fica limitada a região central do corpo de prova, o corpo de prova é preso pelas extremidades nas garras de fixação do equipamento de ensaio. A máquina de ensaio de tração é programada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, medindo continuamente e simultaneamente a carga instantânea aplicada e os alongamentos resultantes, com o auxílio de extensômetros.

A partir das cargas aplicadas e da leitura do alongamento em cada ponto, a máquina gera um gráfico que mostra a relação entre a força aplicada e as deformações ocorridas no corpo de prova. Com esses dados podemos obter a tensão correspondente por meio da Equação (2):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

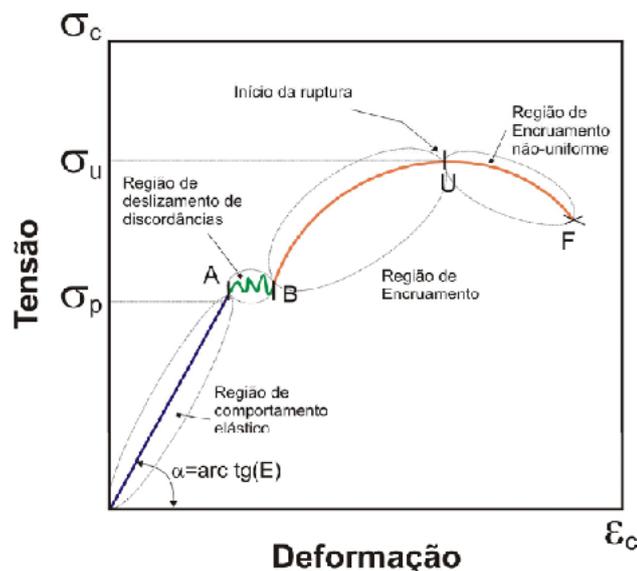
Em que:

F é a força aplicada (N) ;

A_0 é a área inicial (m²) .

Retirando os dados obtidos ao se aplicar a Equação (2) se pode obter o gráfico conhecido como tensão-deformação apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Curva tensão x deformação

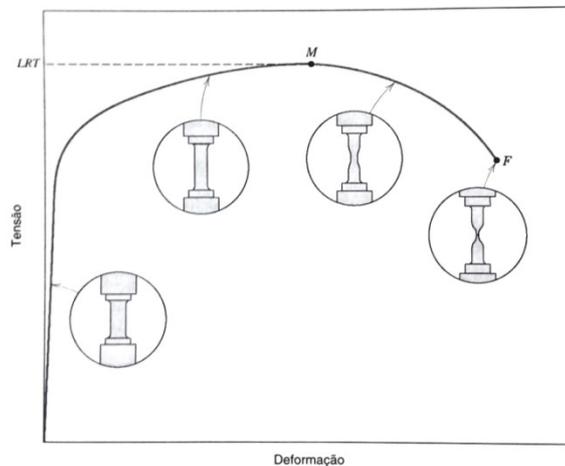


Fonte: (G.B Dalcin, *Ensaio dos materiais*, 2007)

A maioria das estruturas são projetadas para assegurar que apenas uma deformação elástica ocorra, por isso o ponto onde o material deixa de se deformar elasticamente e passa a se deformar plasticamente é muito importante, esse ponto, é onde a tensão atinge um valor chamado de tensão limite de escoamento (CALLISTER, 2002).

Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo, conhecido como limite de resistência à tração (LRT), e então diminui até a ruptura do material, este comportamento fica evidenciado na Figura 7 (DALCIN, 2007).

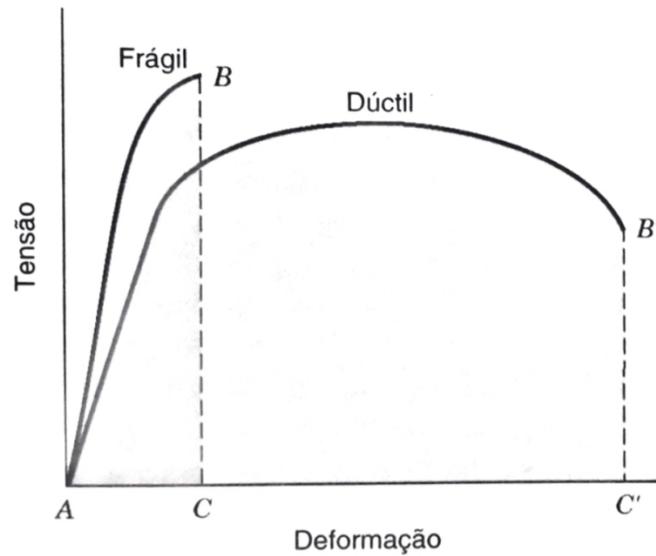
Figura 7 - Comportamento típico da curva tensão-deformação até a fratura do material, ponto F.



Fonte: (William D. Callister Jr, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 5ª edição, 2000)

A ductilidade é outra propriedade mecânica muito importante e também pode ser obtida pelo ensaio de tração, ela nos diz quanto que o material deformou plasticamente antes de romper, um material que possui uma pequena deformação plástica antes de romper é dito, frágil (CALLISTER, 2002). Esse comportamento pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Representação do comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e materiais dúcteis até a fratura.



Fonte: (William D. Callister Jr, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 5ª edição, 2000)

A ductilidade é expressa quantitativamente como alongamento percentual ou redução da área percentual. O alongamento percentual é a porcentagem que o material deformou plasticamente antes de romper e é calculado com base na Equação (3) (CALLISTER, 2002).

$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que:

l_f é o comprimento do corpo de prova no momento da ruptura(m) ;

l_0 é o comprimento útil inicial(m) .

A redução de área percentual é expressa pela Equação (4).

$$RA\% = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) * 100 \quad (4)$$

Em que:

A_0 é a área original da seção reta(m^2) ;

A_f é área da seção reta no momento da fratura(m^2) .

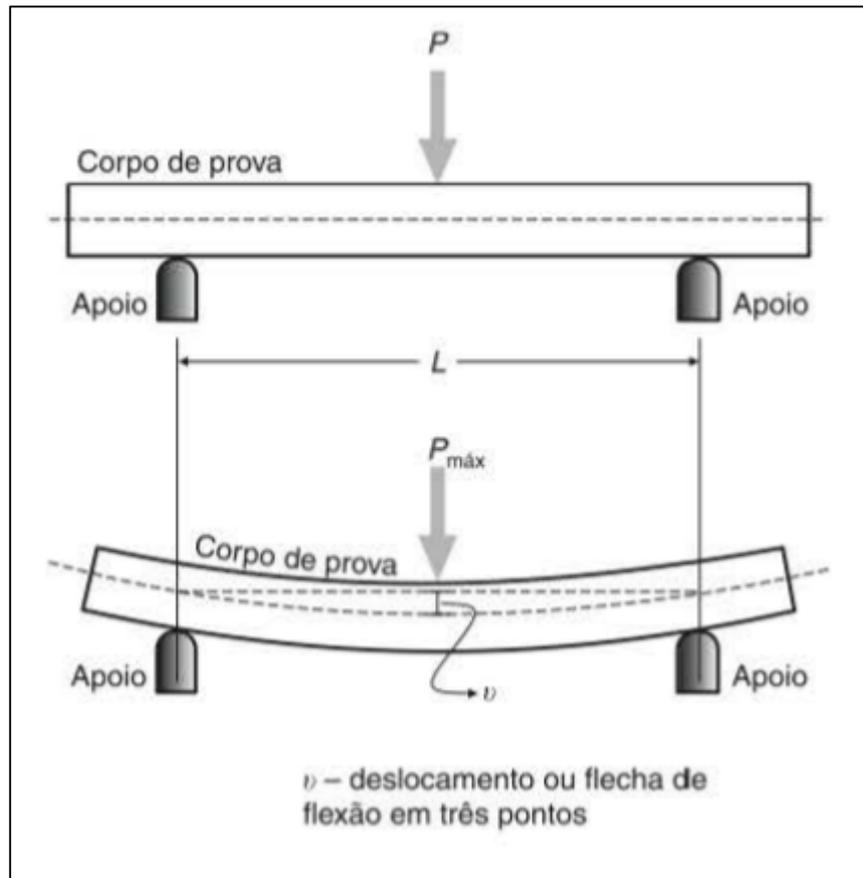
2.8.4 Ensaio de flexão

Consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada, a qual pode estar na condição bi apoiada ou engastada em uma das extremidades. Mede-se o valor da carga versus a deformação máxima, ou a flecha (v), deslocamento dos pontos de aplicação de carga, atingida na flexão. É muito utilizado na indústria de cerâmicos, em concreto e madeira, metais duros, como ferro fundido, aço ferramenta e aço rápido, devido ao fato de fornecer dados quantitativos da deformação que esses materiais podem sofrer quando sujeitos a cargas de flexão (GARCIA, 2012).

Existem três tipos principais desse ensaio: o ensaio de flexão em três pontos, em que a barra a ser testada é bi apoiada nas extremidades e a carga é aplicada no centro do comprimento do corpo de prova; o ensaio de flexão em quatro pontos, em que a barra a ser testada é bi apoiada nas extremidades e a carga é aplicada em dois pontos na região central do comprimento, separados por uma distância padronizada; e o chamado método engastado, que consiste em engastar uma extremidade do corpo de prova e a aplicação da carga na outra extremidade (GARCIA, 2012).

Os principais resultados do ensaio de flexão são: resistência à flexão (σ_f), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência em flexão (U_r) e módulo de tenacidade em flexão (U_t). É bastante empregado para o controle das especificações mecânicas de componentes. Os resultados fornecidos pelo ensaio de flexão podem variar com a temperatura, a velocidade da aplicação da carga, defeitos superficiais e características microscópicas e, principalmente, com a geometria da seção transversal da amostra, um exemplo de como o ensaio de flexão é executado pode ser visto na Figura 9 (GARCIA, 2012).

Figura 9 – Exemplo de ensaio de flexão



Fonte: (Garcia, Amauri, Ensaio dos Materiais, 2ª edição, 2012)

2.8.5 Determinação da massa específica

A massa específica absoluta é definida como a quantidade de massa por uma unidade de volume, e apresentada na Equação (5).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Em que:

ρ é a densidade ($\frac{kg}{m^3}$);

m é a massa medida (Kg);

V é o volume (m^3).

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a confecção do compósito foram utilizados os seguintes materiais: (i) Polibutileno Tereftalato, marca CELANEX 1600A – PBT; (ii) Carbetto de silício (SiC) marca REIBACHER SCHLEIFMITTEL BRASIL Ltda; (iii) aço AISI 1020; (iv) resistência cartucho 300 W x 110V.

3.2 OBTENÇÃO DO MOLDE PARA OBTER CP DE TRAÇÃO

O molde foi obtido a partir de duas placas de aço 1020 e foi usinado de forma com que fosse possível a obtenção de uma chapa que permita a remoção de 3 corpos de prova por vez, além disso, o mesmo tem quatro furos passantes para que as resistências sejam alocadas.

3.3 OBTENÇÃO DO MOLDE PARA OBTER CP DE FLEXÃO

O molde foi obtido a partir da uma chapa de aço 1020 com 5 mm de espessura, cinco pedaços desta chapa foram cortados e foram unidos para se obter a cavidade para necessária a confecção dos corpo de prova de flexão.

3.4 PROCESSO DE MISTURA

A mistura do compósito (SiC + PBT) foi obtida por fusão em forno seguida de cisalhamento com bastão de vidro, a mistura era deixada no forno até ponto de fusão (243 °C) e deixada por 10 minutos, após esse tempo era retirada do forno e aplicado cisalhamento para homogeneizar a mistura, após o cisalhamento a mistura retornava ao forno e o processo era repetido por cinco vezes para homogeneização, os parâmetros de obtenção da mistura podem ser conferidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da mistura do compósito

Teor de SiC em peso (%)	Tempo dentro do forno (min)	Tempo de cisalhamento (min)	Quantidade de ciclos	Temperatura (°C)
10	10	2	5	243
5	10	2	5	243

Fonte: Autoria própria.

A proporção da mistura foi baseada na lei das misturas, Equação (1), para o trabalho se utilizou duas proporções diferentes a fim de comparar os resultados obtidos, além do próprio PBT puro.

3.5 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO

3.5.1 Obtenção da lamina de compósito para tração

O processo de fabricação da lâmina de compósito foi baseado na termoformagem, a mistura do compósito foi despejada dentro do molde retangular e aplicamos pressão de 6 MPa por uma prensa P100001 BONEVAU, manual, uniaxial, com capacidade de 100 toneladas, após a aplicação da pressão as resistências foram ligadas e controladas até a temperatura de injeção do PBT utilizada comercialmente, que é de 243 °C.

O molde foi mantido nessa temperatura durante 5 minutos e então as resistências foram retiradas e o resfriamento ao ar começa onde permaneceu por 30 minutos, somente após esse tempo a lâmina de compósito foi retirada.

3.5.2 Obtenção do corpo de prova para flexão

Os corpos de prova para flexão foram obtidos a partir do molde obtido na etapa 3.3, o molde com o material foi inserido na mufla a uma temperatura de 243 °C e mantido lá até a completa fusão do material.

Após retirar do forno o compósito foi ajustado a fim de obter as medidas propostas pela norma ASTM D790.

3.6 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização do compósito foi realizada a partir de diversos ensaios, a fim de descobrir diferentes propriedades e caracterizar o material.

3.6.1 Determinação da massa específica

Este ensaio seguiu a norma ASTM D792.

Com a temperatura da água obtida no experimento e de posse da norma conseguimos determinar a massa específica da água e com isso utilizar a Equação (6):

$$me = \frac{A * \rho_{\text{água}}}{B} \quad (6)$$

Em que:

me é a massa específica do corpo de prova ($\frac{g}{cm^3}$);

$\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água no momento do experimento ($\frac{g}{cm^3}$);

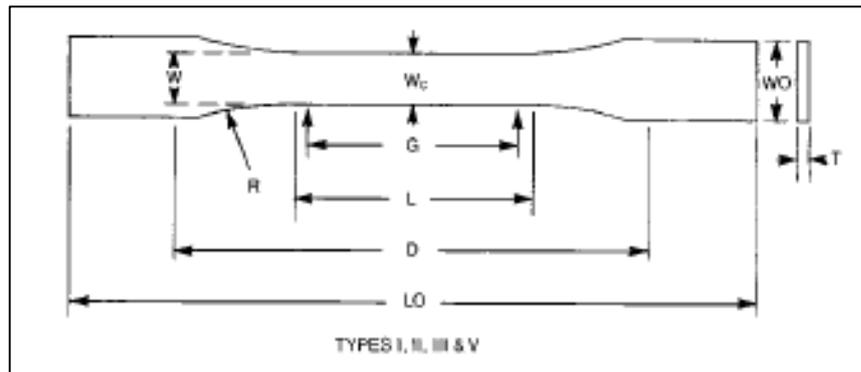
A é a massa do corpo “seco” (g);

B é a massa do corpo submerso (g).

3.6.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado com o auxílio da norma ASTM D638-03 específica para teste de tração para materiais poliméricos e foi realizado por uma máquina universal de ensaios TIME modelo WDW100E. Os corpos de prova foram cortados da placa de compósito por uma matriz de corte seguindo as medidas da norma ASTM D638-03 podem ser vistos na Figura 10 e Tabela 4.

Figura 10- Medidas corpo de prova



Fonte: ASTM D638-03

Tabela 4 – Dimensões do corpo de prova, tipo I

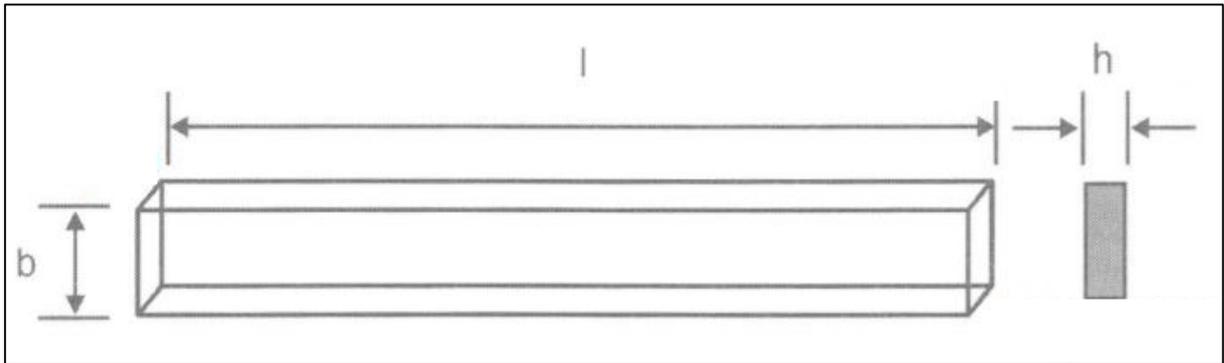
Legendas	Dimensões, mm
W – Largura da seção útil	13 +- 0,5
L – Comprimento da seção estreita	57 +- 0,5
WO – Largura da "cabeça"	19 + 6,4
LO – Comprimento Total	165
G – Comprimento útil	50 +- 0,25
D – Distância entre as cabeças do corpo de prova	115 +- 5
R – Raio do fillet de concordância	75 +- 1
T – Espessura	7 ou menos

Fonte: ASTM D638-03

3.6.3 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão foi realizado com o auxílio da norma ASTM D790 específica para teste de flexão para materiais poliméricos e será realizado por uma máquina universal de ensaios TIME modelo WDW100E. Os corpos de prova apresentam dimensões de acordo com a norma ASTM D790, as dimensões podem ser conferidas na Figura 11 e pela Tabela 5.

Figura 11- Dimensões do corpo de prova para flexão



Fonte: ASTM D790

Tabela 5 – Dimensões do corpo de prova para flexão

Legendas	Dimensões, mm
h – Espessura	> 1,6
l – Comprimento	127
b – Altura	12,7
L – Distância entre apoios	16*h

Fonte: ASTM D790

A tensão de flexão é obtida por meio da Equação (7).

$$\sigma_f = \frac{M * c}{I} \quad (7)$$

Em que:

σ_f é a tensão de flexão (MPa) ;

M é o momento fletor causado pela carga aplicada (N * mm) ;

c é a distância do ponto de aplicação até a linha neutra (mm) ;

I é o momento de inércia (mm⁴) .

3.6.3.1 Determinação do módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada com o auxílio da norma ASTM D790 e foi realizado por uma máquina universal de ensaios TIME

modelo WDW100E. O módulo de elasticidade foi calculado a partir da flecha máxima obtida pelo deslocamento da mesa, e o módulo pode ser calculado com a Equação (8) fornecida pela norma ASTM D790:

$$E = \frac{L^3 * P}{4 * v_{m\acute{a}x} * b * h^3} \quad (8)$$

Em que:

E é o módulo de elasticidade(MPa) ;

L^3 é a distância entre apoios(mm) ;

P é a carga no momento da flecha máxima”(N) ;

$v_{m\acute{a}x}$ é a flecha máxima(mm) ;

b é a largura do CP(mm) ;

h é a espessura do CP(mm) .

3.6.3.2 Determinação do módulo de tenacidade

A determinação do módulo de tenacidade foi realizada com o auxílio da norma ASTM D790 e foi realizado por uma máquina universal de ensaios TIME modelo WDW100E.

O módulo de tenacidade foi calculado a partir da Equação (9) fornecida pela norma ASTM D790:

$$U_{tf} = \frac{2 * P * v_{m\acute{a}x}}{3 * S * l} \quad (9)$$

Em que:

U_{tf} é o módulo de tenacidade em flexão ($\frac{N*m}{m^3}$) ;

P é a carga máxima atingida (N);

$v_{m\acute{a}x}$ é a flecha máxima (m);

S é a área da seção transversal do CP(m²);

l é o comprimento do CP (m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MISTURA

As misturas obtidas pelo processo descrito na seção 3.4 apresentaram porosidade e leve degradação, a mistura obtida foi cortada em pedaços menores para que depois fossem novamente fundidos no molde. As amostras de 10% e 5% podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12 – Misturas de 10% e 5% de SiC respectivamente



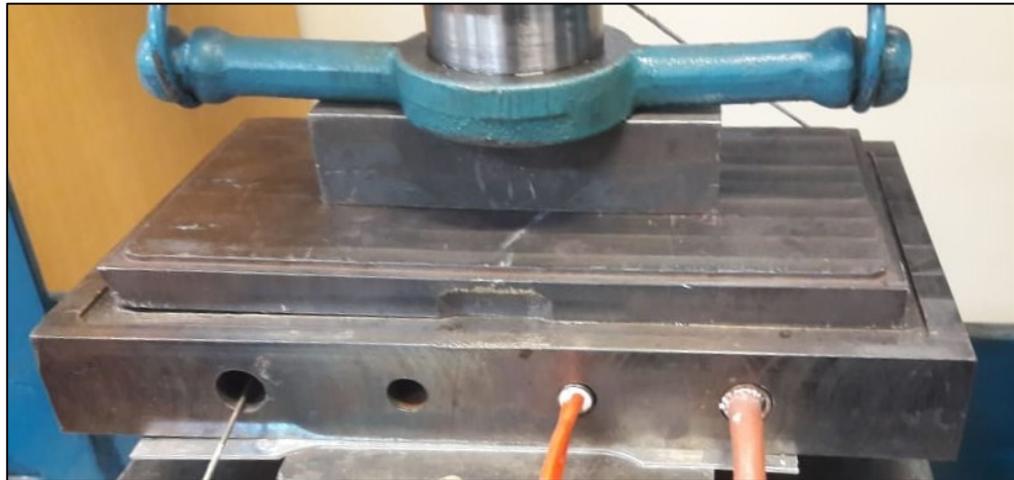
Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 12 observa-se que as amostras apresentaram poros em sua composição, que pode ter sido ocasionado devido ao método de obtenção da mistura.

4.2 MOLDES

O molde apresentado na Figura 13 foi obtido a partir da usinagem de dois tarugos de aço 1020, a usinagem foi feita em uma máquina Veker MVK 800 do laboratório de usinagem CNC da UTFPR – PB.

Figura 13 - Molde para moldagem por fusão pronto



Fonte: Autoria própria.

O molde para obter corpos de prova de flexão foi obtido a partir da união de partes de aço 1020 obtendo uma cavidade retangular com 5 mm de profundidade, 14 mm de largura e 160 mm de comprimento.

4.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.3.1 Obtenção da lamina de compósito

Os corpos de prova foram obtidos a partir da lâmina de compósito (Figura 14) e a partir desta os corpos de prova para o ensaio de tração foram obtidos.

Figura 14- Lamina de compósito

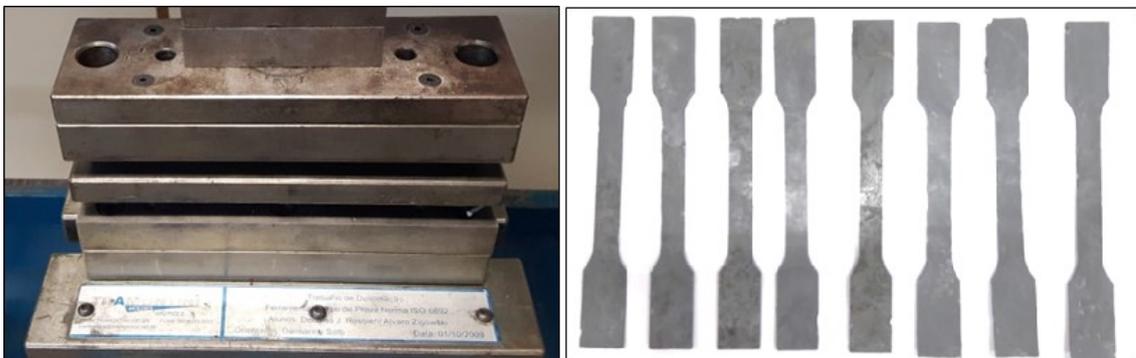


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Corte do corpo de prova para tração

O corpo de prova foi obtido a partir de uma matriz de corte da UTFPR – PB e ambos podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15 – Matriz de corte de corpo de prova e corpos de prova de tração com 10% de SiC



Fonte: Autoria própria

4.3.3 Retirada dos corpos de prova de flexão

Os corpos de prova de flexão foram moldados e lixados de acordo com a norma ASTM D790, os corpos de prova com 5% e 10% de SiC e de PBT puro podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16– Corpos de prova de flexão: puro, 10% e 5% de SiC respectivamente



Fonte: Autoria própria

4.4 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados da massa específica dos corpos de prova foram obtidos de acordo com a Equação (6) e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica obtida dos corpos de prova

Corpos de prova	Massa específica ($\frac{g}{cm^3}$)	% em relação a massa específica teórica*	Desvio Padrão
10%_SiC	1,35	90	0,010149
5%_SiC	1,29	92	0,019219
PBT Puro	1,29	99	0,01021

Fonte: Autoria própria.

* Massas teóricas em g/cm^3 do PBT 1,31, 5% SiC 1,40 e 10% de SiC 1,50.

O resultado encontrado foi próximo do resultado esperado, porém, poderia ter sido melhor se conseguíssemos evitar os poros presentes nas misturas.

4.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados dos corpos de tração para a composição com 10% de SiC são apresentados na Tabela 7. Os corpos de prova da mistura de 10% de SiC apresentaram fragilidade, dos 9 corpos de prova obtidos dessa mistura quatro quebraram durante a execução do ensaio, a Figura 17 apresenta os corpos de prova após o ensaio. Os corpos de prova para tração com 5% de SiC não foram produzidos por problemas com o molde.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com 10% de SiC

Corpos de prova	Desvio Padrão	Tensão de ruptura (MPa)	Desvio Padrão
10%_SiC	53,75	15,01	3,11

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – CP's de 10% de SiC rompidos



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos com o ensaio de tração não obedeceram a lei das proporções apresentada na Equação (1), segundo essa lei a tensão de ruptura deveria ser: $\sigma_r = 0,90 * 21MPa + 0,10 * 240MPa = 42,9 MPa$. O resultado obtido foi 26,93 % do valor esperado, o que pode ser explicado pelos seguintes fatores: (i) o procedimento adotado para a mistura não foi capaz de garantir a homogeneidade entre o PBT e o reforçante SiC; (ii) o material acabou se degradando um pouco durante o processo da mistura, ao retirar e colocar de novo no forno para cisalhar a mistura; (iii) a pressão utilizada na fabricação das laminadas foi insuficiente o que pode ter resultado na presença de poros o que pode ter acentuado a fragilidade.

4.6 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma ASTM D790 e com o auxílio das Equações (7) e (8) os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 8 e 9, o aparato utilizado no ensaio é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Ensaio de flexão com CP de 5 % de SiC



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8– Resultado do ensaio de flexão

Corpos de prova	Desvio Padrão	Resistência à flexão (MPa)	Desvio Padrão
10%_SiC	14,01	14,64	4,00
5%_SiC	30,04	25,68	11,45
PBT Puro	18,45	29,12	4,89

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de flexão

Corpos de prova	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Módulo de Tenacidade (Pa)	Desvio Padrão
10%_SiC	1,10	0,38	1006,72	255,46
5%_SiC	0,91	0,27	3577,36	2089,70
PBT Puro	0,59	0,29	6347,92	2203,25

Fonte: Autoria própria.

Os resultados fornecidos pelo ensaio de flexão demonstram que o SiC fragilizou a matriz de PBT. Os valores do módulo de tenacidade reforçam essa observação, conforme aumenta o teor de SiC maior é a fragilidade da amostra, o que resulta em uma menor energia absorvida até o rompimento.

O resultado da resistência à flexão está dentro da faixa encontrada na Matweb (2018) sobre o Polybutileno Tereftalato puro que é de 22 à 255 MPa, os valores do módulo de elasticidade também se aproximaram do esperado, que era de 0,420 à 21,9 GPa. Os resultados obtidos com ensaio de flexão podem ser atribuídos aos mesmos problemas identificados em relação aos corpos de prova de tração, ou seja, presença de poros internos devido ao processo de obtenção, degradação do material e falta de homogeneidade da mistura.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de produzir um compósito PBT – SiC e caracterizar suas propriedades mecânicas destaca-se as seguintes conclusões:

A mistura e os parâmetros da mistura do compósito foram obtidos, porém a mistura não se encontrou completamente homogênea.

Foram confeccionados moldes para produzir placas e barras para os ensaios de tração e de flexão respectivamente.

Foram obtidos corpos de prova para tração com 10% de SiC, com o resultado médio de 15,01 MPa. Os corpos de prova para tração com 5% de SiC não foram produzidos por problemas com o molde.

O aumento da massa específica ficou mais evidente no compósito de 10% de SiC, apresentando média de 1,35 g/cm³ seguido de 1,29 g/cm³ para o compósito de 5% e para o PBT puro.

A média da resistência a flexão dos materiais foram: 14,64 MPa para o compósito de 10% de SiC, 25,68 MPa para o compósito de 5% de SiC e 29,12 MPa para o PBT puro, esses valores estão coerentes pois conforme maior o percentual de SiC na mistura mais frágil a mesma fica, o resultado é consistente com os resultados do módulo de elasticidade e do módulo de tenacidade.

O módulo de elasticidade é maior nos compósitos com maior teor de SiC, os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram: 1,10 GPa para o compósito de 10% de SiC, 0,91 GPa para o compósito de 5% de SiC e 0,59 GPa para o PBT puro.

O módulo de tenacidade é menor nos compósitos com maior teor de SiC, os valores obtidos para o módulo de tenacidade foram: 1006,73 Pa para o compósito de 10% de SiC, 3577,37 Pa para o compósito de 5% de SiC e 6347,92 Pa para o PBT puro.

De maneira geral o compósito com 5% de SiC apresentou melhores resultados do que o compósito com 10% de SiC, tornando-o mais interessante do ponto de vista industrial.

Como sugestão de trabalhos futuros poderia se realizar a caracterização desses compósitos à temperaturas mais elevadas e também se realizar o ensaio de condutividade elétrica.

REFERÊNCIAS

ASTM D638-03, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, www.astm.org

ASTM D792-00, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, www.astm.org

ASTM E384-17, **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
BARRA, G.; **Compósitos Poliméricos**. Apostila Curso EMC 5706 (EMC-UFSC), 2004.

BATISTA, Ana Claudia de Melo Caldas. **Comportamento Mecânico de Compósitos Poliméricos Híbridos: Estudos Experimentais, Analíticos e Numéricos**. 2017. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 584 p.

CARVALHO, Leandro Gomes de. **Um estudo cinético da precipitação de compostos intermetálicos e da reversão da martensita em aços maraging 300 e 350**. 2016. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CHANDA, Manas; ROY, Saliik.. **Plastics Technology Handbook**. 4. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.

CHIMELLI, CaioPezzi. **Processamento, caracterização e propriedades do carbeto de silício (SiC) obtido por sinterização em fase líquida**. 2010. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

COELHO FILHO, Paulo Roberto de Carvalho. **Comportamento dos Termoplásticos POM e PBT em contato com combustíveis**. 2002. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica - Mg, Belo Horizonte, 2002.

COMPTON, A. H.; ALLISON, S. K., **x-Ray in Theory and Experiment**; D. Van Nostrand Company, 1967.

CORREA, Carlos A.; YAMAKAWA, Roberto S.; HAGE JUNIOR, Elias. Determinação de Temperatura de Transição Dúctil-frágil de Plásticos Através de Testes de Impacto

Instrumentado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 9, n. 1, p.76-84, Jan. 1999.

CULLITY, B. D. **Elements of X-RAY DIFFRACTION**. 2. ed. Notre Dame: Addison Wesley, [199-?]. 569 p.

DALCIN, GabrieliBortoli. **Ensaio dos Materiais**. Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007. 41 p.

FAIRBANKS, Marcelo. **Plástico nos automóveis: Inovar-auto abre caminho para ampliar aplicações dos polímeros na indústria automobilística nacional**. 2018. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/plastico-nos-automoveis-inovar-auto-abre-caminho-para-ampliar-aplicacoes-dos-polimeros-na-industria-automobilistica-nacional/>>. Acessoem: 16 jun. 2018.

Future Aircraft Structures : From Metal to Composite Structures, Chapter 1.

GARCIA, Amauri. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Campinas: LtcGenio, 2012. 384 p.

GONÇALVES, Gilberto Generoso. **O Polímero como elemento esturural::** Comparativo entre a eficiência mecânica do material e os materiais convencionais de construção civil. 2006. 125 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Francisco, Itatiba, 2006.

GONÇALVES, Paula Fernanda Almeida. **Obtenção e caracterização de compósitos poliméricos biodegradáveis obtidos via extrusão a partir de PLA (ácido polilático), amido de mandioca, glicerol e bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

HELMS, Hinrich; LAMBRECHT, Udo.**Energy savings by light-weighting-II**.2. ed. Heidelberg: InstitutFürEnergie- UndUmweltforschung Heidelberg GmbH, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 180: Plastics - Determination of Izodimpact strength**. 3 ed. Geneva: Iso, 2000. 10 p.

KOTANI, Masaki et al. Consolidation of polymer-derived SiC matrix composites: processing and microstructure. **Composites Science And Technology**, Kyoto, p.2179-2188, jul. 2002.

LIMA, Antonio Bastos Torres; KAHN, Henrique; GOUVÊA, Douglas. **Aplicações de cargas minerais em polímeros**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [20--?].

LIMA, Tatiana Chaves Fontes; TENORIO, Jorge Alberto Soares. Utilização de matéria-prima aglomerada na produção de carbureto de silício em escala-piloto. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto , v. 64, n. 3, p. 341-345, Sept. 2011 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672011000300013&lng=en&nrm=iso>.access on 15 Sept. 2018.

McQuiston, H. **Designing with engineering plastics**. PlastEng 1980; 36: 18–25.

MATWEB. **Overview of materials for Polybutylene Terephthalate (PBT), Unreinforced, Molded**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=781bd0e9d0854fd5a919866c39ea3065&ckck=1>>. Acesso em: 02 out. 2018.

NICOLAIS, Luigi; MEO, Mchele; MILELLA, Eva. **Composite Materials: A Vision for the future**. New York: Springer, 2011. 227 p.

NUFFIELD, E. W.. **X - Ray Diffraction methods**. New York: Wiley, 1966.
OLIVEIRA, HelingtonNeves de. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos para Aplicação em Deck**. 2013. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

PARUCKER, Moisés Luiz. **Desenvolvimento de materiais compósitos de baixo coeficiente de atrito com partículas de lubrificante sólido dispersas em matriz metálica a base de níquel**. 2008. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

RABELLO, Marcelo. **Aditivção de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2000. 244 p.

RESCH, J. **PhD. Thesis**. Leoben, 1994.

RESINEX (Portugal) (Ed.). **PBT – POLIBUTILENO TEREFTALATO**. 2018. Disponível em: <<http://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/pbt.html>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras: Uma abordagem prática**. 3. ed. Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2010. 30 p.

SANTOS, Clayton Pereira da Silva; BICHARA, Jorge Ricardo Ribeiro. **Estudo Experimental das Propriedades Mecânicas para Compósito em Fibra de Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP – CarbonFiberReinforcedPolymer)**. 2015. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, CEFET, Rio de Janeiro, 2015.

SCHUTT, Bruno Eduardo Pereira. **Novas Aplicações de Peças Plásticas em Substituição às Peças Metálicas na Indústria Automotiva**. 2014. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2014.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e Estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Estadual do Norte do Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

SELVAM, R.; RAVI, S.; RAJA, R..Fabrication of SiC particulate reinforced polyester matrix composite and investigation. **IopConference Series: Materials Science AndEngineering**, Chennai, fev. 2017.

SUBBARAO, E. C.; CHAKRAVORTY, D. MERRIAM, M. F. e SINGHAL, L. K. **Experiencias de Ciências dos Materiais**, São Paulo: Editora da USP, 1973.

YUAN, Shangqin et al. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. **Progress In Polymer Science**. Singapore, p. 1-28. nov. 2018.