



Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580

Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Relatório de Iniciação Científica referente ao Edital 01/2021

Nome do aluno: Matheus Assis Gussiardi

Assinatura do aluno: *Matheus Assis Gussiardi*

Nome do orientador: José Fernando Queiruga Rey

Assinatura do orientador:

Título do projeto: Revisão Bibliográfica sobre processos de Propriedades Térmicas e Estruturais de polímeros de alto desempenho, para prototipagem rápida por impressão 3D de partes do foguete da UFABC Rocket Design.

Palavras-chave do projeto: Polímeros, Alto Desempenho, Impressão 3D,

Foguete modelismo

Área do conhecimento do projeto: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Bolsista: Sim, PIC

Santo André

07 de outubro de 2022

Sumário

1 Resumo.....	2
2 Introdução.....	2
3 Fundamentação teórica.....	4
4 Metodologia.....	9
4.1 Materiais e Métodos.....	9
4.2 Etapas da pesquisa.....	10
5 Resultados e discussão dos resultados.....	10
5.1 Ferramentas de Busca.....	10
5.2 Análise dos Dados Encontrados atualizar.....	11
5.3 Materiais.....	14
5.3.1 Matrizes.....	14
5.3.2 Aditivos.....	14
5.3.2.1 TPU e PLA com Óxido de Grafeno.....	15
5.3.2.2 ABS com Nanoplaquetas de Grafeno.....	15
5.3.2.3 PLA com Nanotubos de Carbono.....	15
6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.....	16
Referências.....	16

1 Resumo

Para realizar a montagem do Projeto Polo, foguete subsônico da equipe de foguete modelismo UFABC Rocket Design, é necessário modelar por impressão em 3D duas peças, a Coifa e o Boat Tail. Estas peças são responsáveis por resistir a forças mecânicas e térmicas durante sua trajetória, por isso é necessário que sejam produzidas com materiais capazes de suportar as tensões mencionadas. A fim de encontrar um material ideal e acessível para a manufatura das peças, a revisão bibliográfica a seguir conta com o estudo do estado da arte referente tanto aos métodos de manufatura aditiva, em especial o método de modelagem de deposição fundida (FDM), quanto aos polímeros termoplásticos e seus compósitos utilizados atualmente. Obtendo essas informações, serão avaliados como diferentes polímeros reagem a extremas condições de temperatura. Após a análise do estado de arte, e estudo de alguns experimentos encontrados, conclui-se por meio dos resultados que o compósito sugerido para manufatura das peças é o TPU/PLA/GO.

2 Introdução

O Projeto Polo da UFABC Rocket Design conta com a manufatura aditiva para a confecção de algumas peças do foguete. Essas que são estudadas detalhadamente a fim de determinar qual é o melhor formato e material para aguentar todos os impactos sofridos pelas peças durante a trajetória do foguete. Em especial, a Coifa e o Boat Tail são elementos do foguete que sofrem grandes esforços aerodinâmicos, portanto precisam ser confeccionadas com materiais que resistam a essas forças. Originalmente no projeto, essas peças serão

produzidas por impressão 3D utilizando PLA como material revestidas com resina epóxi para aumentar a resistência, entretanto, esta pesquisa visa encontrar um material diferente que permita o Projeto Polo resistir a forças ainda maiores, a fim do foguete poder atingir distâncias e marcos maiores [1].

A coifa é uma peça de formato cônico localizado na região dianteira do foguete, ela deve reduzir a resistência ao movimento de arrasto. Portanto esta parte precisa ser construída com um material capaz de suportar a tensão e deformação dos esforços aerodinâmicos. O material deve ser mecanicamente resistente, para prevenir o deslocamento da camada limite, e evitar a formação de ondas de choque ao redor da peça [1].

O Boat Tail envolve o motor do foguete na parte traseira, de formato ogiva, essa peça aumenta a velocidade do foguete e diminui sua desaceleração, o que faz com que o foguete alcance maiores distâncias, aumentando a altitude máxima atingida, isto é o apogeu. A peça tem como principal função reduzir os impactos do arrasto de base, que é a baixa pressão que se forma na parte de baixo do foguete por causa do comportamento das moléculas da atmosfera com alta velocidade do ar [1]. Por ser localizada perto da área de vazão de gases do motor, a peça está sujeita a passar por altas temperaturas, o que pode causar deformação térmica. Portanto, é preciso procurar um material não só com características mecanicamente resistentes, mas termicamente resistentes também.

Para poder produzir essas peças é preciso fazer estudos com modelos e simulações para garantir que elas estarão apropriadas para o uso, cumprindo com suas diferentes funções e resistentes às diferentes forças durante a trajetória do foguete, para que não ocorram falhas. Por isso é necessário produzi-las com um material adequado, que possua as propriedades necessárias para aguentar todos estes impactos, e que possa ser utilizado no método de produção planejado.

A prototipagem rápida é um método de criação de um modelo para um produto, para que seja possível testar o produto de maneira rápida, visualizar suas possíveis falhas e problemas, e consertá-los. Ela pode ser dividida em dois tipos: A manufatura subtrativa, que consiste em pegar um bloco de determinado material e esculpi-lo a fim de chegar no formato desejado para a peça. E a manufatura aditiva, que constrói o produto a partir de camadas de material que são posicionadas uma em cima da outra, até formar a peça, para este trabalho, será relevante apenas a manufatura aditiva, em especial utilizando a modelagem de depósito fundido (FDM), que aquece um filamento de polímero e faz sua extrusão, para formar as camadas da peça.

A principal vantagem desta tecnologia para esta pesquisa é a possibilidade de utilizar uma grande variedade de materiais na prototipagem, o que permite uma maior abrangência de polímeros e compósitos que podem ser opções para a construção das peças do foguete desejadas, além disso, este método é considerado veloz e de baixo custo, sem comprometer com a qualidade das peças, apesar de limitar o tamanho das peças serem impressas e suas propriedades mecânicas, que dependem do tipo de polímero ou composto utilizado na produção.

Os polímeros são macromoléculas formadas por vários monômeros que se ligam formando longas cadeias de moléculas, é uma estrutura orgânica em sua maior parte. As propriedades dessas unidades são definidas conforme suas características, como peso, forma, estrutura e configuração molecular, além de suas isomerias e cristalinidade. Estas estruturas podem ser categorizadas entre termoplásticos (flexíveis, derretem no calor e endurecem no frio,

permitem processos reversíveis) e termofixos (são permanentemente rígidos, por isso muito resistentes) e alguns podem até ser os dois [2].

Os compósitos são compostos por dois materiais não necessariamente todos sendo polímeros, como objetivo de criar um material que atenda as propriedades necessárias para um projeto, que não pode ser encontrado em polímeros puros [2].

Este projeto de pesquisa tem como objetivo conhecer e compreender as características dos materiais poliméricos estudados, assim como suas resistências, principalmente suas resistências térmicas, para que seja possível selecionar um material ideal para a prototipagem da Coifa e do Boat Tail por meio da manufatura aditiva, para que a performance dessas peças seja aprimorada.

Para atingir este objetivo será realizado um levantamento bibliográfico buscando o estado da arte em propriedades térmicas de materiais poliméricos utilizados em sistemas de manufatura aditiva. Para isso, é necessário compreender as características das peças que serão produzidas, as técnicas atuais de manufatura aditiva, e as características dos polímeros e compósitos poliméricos, em especial os termoplásticos, que serão estudados a fim de decidir qual o melhor material e a melhor técnica para fabricar o produto desejado.

3 Fundamentação teórica

3.1 Manufatura Aditiva

Em meio aos anos 80, surge um novo método de manufatura de peças que traz uma grande inovação para as tecnologias de produção da época. Chamado de prototipagem rápida, este método conta com o uso de novas tecnologias, como softwares de Desenho Assistido por Computador (DAC), ou em inglês, Computer Aided Design (CAD), e a utilização das impressoras em 3D [3]. A prototipagem rápida, é também conhecida como manufatura aditiva, isso pois ao contrário da anteriormente conhecida manufatura subtrativa, onde é utilizado um pedaço de material desejado, e este é esculpido e transformado no produto desejado, a manufatura aditiva utiliza filamentos de um material previamente selecionado, e constrói o produto posicionando finas camadas de material uma em cima da outra, até chegar no resultado final desejado, de acordo com um modelo previamente projetado utilizando a técnica CAD. As vantagens deste método se dão pela grande variedade de materiais que se pode usar nos filamentos, não é necessária uma variedade de ferramentas para a produção da peça como na manufatura subtrativa, e o planejamento da peça ser feito exclusivamente por computação. Todos estes fatores contribuem com a velocidade de produção dos protótipos, que podem ser testados e modificados com muita mais facilidade e agilidade.

O método de manufatura aditiva pode ser dividido em 3 etapas. A primeira é a parte computacional, onde o design do produto é planejado com a ajuda de softwares de CAD. A segunda etapa consiste na produção da peça de fato, onde a informação do processo CAD é enviada para a impressora 3D, e a máquina inicia a construção da peça desejada, camada por camada. A terceira e última etapa consiste no pós processamento da peça, nela a peça já está formada, e agora é removida da máquina para receber os cuidados necessários antes de ser utilizada para seu propósito final.

3.1.1 Computer Aided Design

O início da produção de uma peça se dá pelo planejamento digital dela. Utilizando os softwares apropriados para CAD, é possível modelar o produto em 3D com todas as especificações, tamanhos e detalhes necessários. Também é possível estimar as tensões que serão sentidas nas peças e prever e resolver problemas antes da peça ser fisicamente produzida. O tipo de arquivo que carrega os dados do modelo é STL (standard triangulation language). Este formato faz com que a peça no programa seja formada por vários triângulos, a quantidade de triângulos determina a precisão dos detalhes na peça, quanto mais triângulos, mais precisão, em contrapartida, o tamanho do arquivo fica cada vez maior. Cada triângulo é descrito por coordenadas x, y e z no arquivo, o que torna possível para a impressora localizar os pontos e imprimir a peça exatamente como ela foi planejada no computador. Por fim, o software também divide a peça pronta em camadas de mesma espessura. Após todo esse processo, e com o arquivo finalizado, a informação é transmitida para a impressora, onde começa a segunda etapa.

3.1.2 Modelagem de Deposição Fundida

Para a segunda etapa da manufatura aditiva, existem diversas técnicas para transformar o modelo computacional em um objeto físico real. Entretanto, para este projeto, o foco será exclusivamente na técnica de Modelagem de Deposição Fundida (FDM). A técnica usa como materiais principais polímeros, sendo esses termoplásticos ou elastômeros. Para esta etapa, é necessário processar o polímero, isto é, prepará-lo para ser utilizado na máquina. Normalmente, este método precisa que o polímero seja derretido, para serem formados os filamentos do material, que são inseridos no bocal da impressora em 3D. A partir daí, o polímero sofre o processo de extrusão enquanto o bocal se movimenta para formar a primeira camada do objeto. A plataforma em que a peça é formada precisa ter uma temperatura baixa para ser capaz de resfriar o polímero recém extrusado. Na próxima camada, ocorre o mesmo processo, seguindo sempre o modelo produzido por CAD, os filamentos que são extrusados se fundem com os que já foram impressos, e o processo se repete até formar uma peça inteira no final. [4] Inicialmente, esta técnica era utilizada com o intuito de criar protótipos para testes e estudos, que não precisavam necessariamente ter características resistentes, mas com os avanços da tecnologia nessa área, a técnica pode também ser utilizada para as peças finais, quando se consegue encontrar um material que se adeque as necessidades tanto do processo de FDM, quanto às necessidades do projeto [5,6].

As temperaturas de derretimento dos polímeros utilizados são de extrema importância, pois o processo depende do derretimento e esfriamento dos polímeros. O ideal é que sejam utilizados polímeros com baixas temperaturas de derretimento, para que o processamento deles não prejudiquem suas características e resistências, por essa questão, apesar de ter uma grande variedade de polímeros que podem ser utilizados no processo, os mais comuns atualmente são Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poliacido láctico (PLA), Politereftalato de Etileno Glicol (PETG), Policarbonato (PC) e Nylon. Desses os mais apropriados para a prototipagem rápida são PETG e PLA [7]. Ao fazer estudos de comparação entre o PETG e o PLA, o PLA se mostra ser um material mais rígido e mecanicamente resistente do que o PETG, aguentando tensões maiores. Por outro lado, o PETG possui uma maior resistência e estabilidade térmica, e é um material mais flexível em comparação ao PLA [8].

3.2 Peças do foguete

Para a manufatura das peças selecionadas neste trabalho, é necessário fazer análises aerodinâmicas para entender como ela se comporta em sua trajetória, e as forças que a peça precisa resistir durante ela. Ambas as peças sofrem e tem como objetivo reduzir os impactos

causados pelas forças de arrasto, isto é, os impactos que a resistência do ar aplica no foguete. Para construir a peça ideal, é necessário se atentar ao formato, tamanho e material desejados para que a peça cumpra seu papel de modo eficiente. Para testar a qualidade e qualificações das peças, é possível utilizar tanto softwares de simulação computacional, quanto tuneis de vento, que simulam fisicamente os impactos da resistência do ar, velocidade e temperatura.

3.2.1 Coifa

A coifa é uma peça geralmente de formato cônico, localizada na parte dianteira do foguete. Por estar na frente, a coifa é a primeira parte do foguete a entrar em contato com o ar em suas altas velocidades, por isso, a peça enfrenta condições extremas de velocidade (por toda a fase de propulsão que dá impulso ao foguete) e temperatura (pelo aquecimento que a peça sente por causa da alta velocidade, densidade do ar e a diferença de temperatura entre a atmosfera e a superfície do foguete). Para reduzir o impacto do arrasto no foguete, o formato da coifa é muito importante, pois é ela que conecta a ponta do foguete até o corpo dele, e o comportamento do ar nesta trajetória pode influenciar muito nas forças sofridas. O ideal é que o movimento do ar nesta área seja o mais suave possível enquanto a velocidade do foguete aumenta, para evitar fricção, o formato mais comum de coifa é a ogiva, pois é um dos mais eficientes e fáceis de produzir ao mesmo tempo [9].

Tendo isso em mente, o grupo Rocket Design realizou diversos testes e estudos para decidir qual tamanho e formato seria o melhor para utilizar no Projeto Polo, para realizar as simulações, foram selecionados 4 tamanhos diferentes (20cm, 28cm, 36cm e 44cm) e 6 diferentes formatos (Power Series 0.5, Power Series 0.75, Cônica, Ogiva, Elipsoide, Série Parabólica e Série de Haack). As geometrias selecionadas melhores Power Series 0.5, Power Series 0.75 e a Série de Haack, e através de mais simulações e utilizando como parâmetro a estabilidade da peça, e o número de Mach, foi escolhida a coifa no formato Série de Haack com 40cm. Pela peça ser maior do que o limite da impressora, é necessário imprimir ela dividida em duas partes, e formular um encaixe para que a peça possa ser utilizada, é necessário estudar também como esta divisão afetará o desempenho da peça [1].

3.2.2 Boat Tail

O Boat Tail é uma peça em formato ogiva localizada abaixo do escape do motor. Por estar tão perto do motor, próximo de onde ocorre a combustão que propulsiona o foguete, a peça passa por extremas temperaturas, que podem até deformar a peça, caso ela não seja construída com um material resistente suficiente para aguentar esses impactos térmicos. A peça tem como função diminuir o arrasto de base, este efeito ocorre devido a separação de fluido na coifa, que percorre por todo o corpo do foguete, e se junta de novo próximo a base do foguete, essa junção forma uma área de baixa pressão embaixo do foguete, que gera o arrasto de base. Para reduzir este efeito, é conveniente que a base do foguete seja menor que o corpo, e é justamente isso que a peça faz, encurta a base do foguete [10].

A peça projetada para o Projeto Polo terá um formato parecido com a seção inferior da coifa, pois no software de projeção utilizado, o Inventor. A peça foi projetada como uma coifa de 400mm de comprimento, e foi seccionada posteriormente para o tamanho desejado de Boat Tail. Por causa das altas temperaturas, a peça pode além de ser revestida internamente com resina epóxi, assim como a coifa, pode também ser revestida internamente com um isolante térmico, entretanto, a equipe Rocket Design não definiu nenhum material específico para esta camada interna [1].

3.3 Polímeros e Termoplásticos

Como mencionado anteriormente, uma das limitações das técnicas de prototipagem rápida é o material utilizado para a produção das peças, uma vez que deve se escolher com cuidado um material que tenha características que satisfaçam as necessidades do produto, e seja possível utilizar nas máquinas de impressão 3D durante todo o processo. Os termoplásticos são polímeros muito utilizados nesta área da manufatura, principalmente ao realizar a técnica FDM. Eles são polímeros que resistem a altas temperaturas e tensões, isso se dá por conta de suas estruturas moleculares, que podem ser lineares e ramificadas, o que o torna um material flexível e resistente [2]. É possível também trabalhar com compósitos de termoplásticos, os compósitos são misturas de diferentes materiais, com o objetivo de criar um material que tenham as características necessárias para um projeto. Por possuir essas características, o uso dos termoplásticos para a ciência aeroespacial é muito comum.

Ainda que em geral, os termoplásticos são resistentes ao calor, a intensidade dessa resistência, assim como outras características variam entre os diferentes tipos de termoplásticos, então para determinar qual termoplástico usar é necessário estar atento a essas variações. As características térmicas de um compósito são diretamente relacionada a cristalinidade da matriz polimérica escolhida, para um polímero de alta cristalinidade, o compósito tende a possuir uma maior resistência ao calor. Também é importante considerar o impacto ambiental do material na hora de fazer a escolha, o foco das pesquisas científicas neste tópico estão em achar maneiras ecologicamente positivas de trabalhar com estes materiais, está em alta o estudo de polímeros com características biodegradáveis, como o PLA por exemplo, e seus possíveis compósitos [11].

3.3.1 Adição de fibras e Nanopartículas

É possível fazer ligas e misturas entre polímeros para formar novos compósitos com características diferenciadas. É possível também fazer alterações, como inserir fibras de diferentes materiais nos filamentos de plástico, ou adicionar nanopartículas, ambas técnicas com o intuito de fortalecer o material. Os compósitos reforçados com essas técnicas se tornam mais resistentes do que os termoplásticos puros, e são mais leves do que os metais [12]. Esta é uma característica muito interessante para as aplicações aeroespaciais, por conta da necessidade de materiais altamente resistentes, e da preocupação com as dimensões e peso dos foguetes construídos.

Para a técnica de polímeros compósitos com fibra, do inglês, Fibre Reinforced Polymer (FRP). São inseridas fibras no material, essas fibras podem ser tanto inseridas no processamento do polímero, a formação dos filamentos, ou podem ser inseridas diretamente no bocal da máquina, já no momento da impressão [13]. As fibras também são formadas por diferentes materiais, podem ser elas fibras de carbono, de vidro, kevlar ou fibras naturais, como madeira por exemplo. Ao inserir a fibra no polímero, o material obtém maior rigidez e força, ou até mesmo flexibilidade dependendo do material e da geometria interna da fibra. As fibras inseridas no material podem se encontrar continuamente ou descontinuamente dentro dos filamentos, é mais fácil inserir as fibras de modo descontínuo no polímero, mas o material não fica tão forte quanto ele poderia ficar com uma adição contínua de fibras, que por sua vez, é mais complicada de ser realizada [14]. De qualquer modo, ao fazer a técnica FRP no material, independentemente do tipo de fibra, a performance do material aumenta e suas resistências, principalmente as mecânicas, são favorecidas.

A técnica de adição de nanopartículas pode trazer vantagens para o material polimérico, mas é necessário realizá-la com atenção para que ela seja bem-sucedida. Ao fazer essa técnica com polímeros biodegradáveis, algumas de suas características podem ser enfraquecidas, portanto é necessário fazer um tratamento de funcionalidade eles, após a adição de nanopartículas, para que as vantagens sejam adquiridas sem prejudicar outras propriedades do material. Essa técnica consiste em se aproveitar das interações ocorridas entre as nanopartículas e a matriz polimérica, são essas ligações que trazem o fortalecimento do material. O motivo pelo qual essa técnica funciona tão bem é que por serem muitas partículas pequenas, sua área de superfície é muito grande, trazendo maior área de contato e mais interações, potencializando a performance do material. As nanopartículas realizam principalmente ligações covalentes, que são o que aumentam a força mecânica, e ligações de hidrogênio que se relacionam com aumento de resistência térmica em alguns casos. A dificuldade dessa técnica se dá pela necessidade de as nanopartículas serem distribuídas homogeneamente no material para o processo ser efetivo, o que é considerado o maior desafio da técnica [15].

3.4 Análise Térmica

Para obter um maior conhecimento das propriedades e limites de um polímero que se deseja utilizar em um projeto, é importante realizar análises térmicas no material. Uma análise térmica é um procedimento que possibilita conhecer as propriedades de um certo material, e prever como ele irá se comportar ao performar sua finalidade específica. Este estudo se torna ainda mais útil quando o material em questão não é apenas um polímero puro, mas sim compósitos de polímeros ou polímeros com adição de fibras, o que altera e aprimora as propriedades dos materiais.

Existem diversas técnicas de Análise Térmica, cada uma especificada para explorar propriedades diferentes, abaixo segue uma revisão das mais relevantes para este trabalho.

3.4.1 DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

As informações sobre a calorimetria de uma pequena amostra podem ser obtidas ao aplicar a técnica de DSC. A técnica é bem utilizada para avaliar as características de polímeros e fazer o estudo de sua entalpia. Também serve para determinar a temperatura de transição vítrea (TG), quando a TG é atingida as propriedades de um polímero podem ser alteradas, e ele passa a ser mais flexível. Além disso, a técnica também fornece as temperaturas de cristalização e fusão do material desejado e é capaz de determinar também a degradação do material ao ser exposto a altas temperaturas [16].

A máquina de DSC é composta por uma câmara onde fica uma amostra do material desejado e o material de referência, esta câmara é aquecida e resfriada de modo linear para obter as informações. Existe um sensor termodinâmico e o material de referência tem sua temperatura controlada computacionalmente. Para a análise, é realizado comparações da diferença de temperatura entre os dois materiais, seguindo os princípios de equilíbrio térmico da termodinâmica. Assim os dados são coletados e são organizados gráficos que fornecem os detalhes do comportamento do material e as informações mencionadas acima [17].

3.4.2 TGA – Análise Termogravimétrica

A técnica de análise termogravimétrica é utilizada para medir a massa de uma amostra. Ela é realizada a partir de uma termobalança que tem como função acompanhar as perdas ou ganhos de massa, que podem ser medidos tanto em função do tempo como em função da temperatura, com essas informações é possível estudar como a inserção de nanopartículas em uma matriz altera sua estabilidade térmica [16].

A máquina utiliza um forno que aquece a amostra em temperaturas controladas por um programador de temperatura, e uma termobalança que é capaz de medir o peso de uma massa conforme a temperatura muda ao longo do tempo, além disso existe um sensor de temperatura [18]. É possível determinar a composição de uma amostra de acordo com suas variações de massa ao longo da análise. Para polímeros reforçados com aditivos, esta técnica pode determinar o quão eficiente este reforço é, utilizando condições isotérmicas, sendo quanto mais alta for a temperatura em que o material começa a perder massa, maior é sua estabilidade térmica [19].

3.4.3 TMA – Análise Termomecânica

A fim de estudar a deformação de um material, é utilizado a técnica de análise termomecânica. Ela é utilizada para analisar mudanças mecânicas, como a expansão e contração de uma amostra, medindo mudança do comprimento ou volume de uma amostra de acordo com a variação da temperatura ou pressão. A técnica determina o coeficiente de expansão térmica linear (CLTE) que representa a variação de comprimento da amostra conforme as mudanças de temperatura, a força de Young, que representa a elasticidade de um material, e assim como a técnica DSC, também mede a temperatura de transição vítrea (TG) do material, entre outras propriedades, como a flexibilidade de um material ou como ele se comporta ao ser tensionado fazendo pequenas alterações na técnica de medição [17].

A máquina de TMA é uma plataforma que carrega a amostra do material, uma fornalha que fornece calor para o sistema, e o dispositivo que faz as medições de comprimento e volume que é capaz de detectar diferenças menores do que 10^{-8} metros [17]. Entretanto, os estudos realizados sobre esta análise mostram que em geral, os nano materiais deformam com mais facilidade do que os polímeros que não foram modificados, o que conta como uma desvantagem ao fazer adições de filamentos para o material desejado [16].

3.4.4 DTA – Análise Térmica Diferencial

A técnica de Análise Térmica Diferencial é parecida com a técnica DSC, porém ao invés de estudar a entalpia de uma amostra, a DTA mede as variações de temperatura de um material durante o seu aquecimento, de modo a estudar a calorimetria do material. O procedimento consiste em aquecer uma amostra de um material desejado juntamente com um outro material de referência, e comparar como as temperaturas variam de modos diferentes [16].

O dispositivo que realiza esta técnica é composto por um forno, e por uma balança térmica que mede a massa da amostra e do material de referência, revestido por um isolamento térmico. A análise fornece os picos de temperatura atingido são aquecimento e resfriamento da amostra, e temperaturas de mudança de estado físico, assim como também a temperatura vítrea do material. Esta técnica é simples e possibilita criar experimentos com condições de alta pressão ou vácuo, é utilizada para estudar materiais que possuem grande decomposição [20].

4 Metodologia

4.1 Materiais e Métodos

Para a realização desta revisão bibliográfica, foram feitas buscas e uma triagem dos artigos encontrados com o objetivo de selecionar aqueles que são pertinentes com o tema da pesquisa, e esses são analisados e classificados para definir se sustentarão os objetivos determinados. Como base para o levantamento bibliográfico, foi estudada e praticada a técnica de revisão sistemática, processo em que é reunido uma grande quantidade de informação sobre o assunto desejado, e este estado da arte é cuidadosamente analisado para utilizar artigos

relevantes e que colaborem para atingir os objetivos previamente definidos almejados, este método é relevante para tornar os resultados e conclusões da pesquisa mais confiáveis [21][22].

Para esta revisão bibliográfica, a principal base de dados utilizada foi a Scopus, a partir dela foram reunidos diversos artigos nos idiomas português e inglês. Os artigos foram encontrados a partir de combinações das seguintes “Thermoplastic”, “FDM”, “Additive Manufacturing”, “3D Printing”, “Technology”, “Materials Science”, “Engineering”, “Overview”, “Nose Cone”, “Boat Tail”, “Rocket”, “Prototyping”, “Polymers”, “Aerodynamic”, “PLA”, “ABS”, “CNT”, “GNP”, “GO”, “Thermal Analysis”, “DSC”. Dos artigos reunidos, foram utilizados apenas aqueles selecionados como relevantes para atingir os objetivos deste levantamento, isto é, aqueles que esclarecem e tem maior foco nas propriedades termodinâmicas de polímeros e técnicas de prototipagem rápida.

4.2 Etapas da pesquisa

Um modo de tornar a pesquisa menos exaustiva e mais eficiente é organizar e determinar no início do projeto as tarefas que precisam ser feitas e quando elas serão feitas. Para facilitar esta organização foi feito um mapa mental com todos os elementos e seus subtópicos necessários para a compreensão do tema.

- ☐ Compreensão dos temas trabalhados neste projeto, nesta primeira fase da pesquisa foi estudado o método de realização de uma revisão bibliográfica, utilizando a técnica de revisão sistemática a partir da leitura de artigos sobre este tema. Também foi fortalecida a base teórica necessária para a compreensão dos polímeros, utilizando o livro “Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.” de Callister.
- ☐ Pesquisa dos artigos de interesse para o projeto, promovendo a familiarização e a exploração da base de dados Scopus e de suas ferramentas, como filtros e palavras chaves, para encontrar as bibliografias contendo as informações necessárias para a pesquisa, referentes aos seguintes tópicos:
 - ☐ Peças do foguete, Boat Tail e Coifa, suas características e especificações.
 - ☐ Manufatura aditiva e seus diferentes métodos de produção.
 - ☐ Polímeros e compósitos poliméricos.
- ☐ Seleção dos artigos reunidos, e triagem deles, para que os arquivos utilizados na pesquisa sejam os mais pertinentes possíveis com o rumo da pesquisa, permitindo com que os objetivos pré-determinados sejam alcançados com êxito.
- ☐ Desenvolvimento do relatório.

5 Resultados e discussão dos resultados

Uma base de dados repleta de artigos, livros e informação é essencial para uma pesquisa de qualidade. A principal base de dados utilizada neste trabalho foi a Scopus, ela foi escolhida por conter diversas ferramentas que ajudam o usuário a encontrar as informações necessárias sem grandes dificuldades. Durante os meses iniciais desta pesquisa, foi desenvolvido o costume e a habilidade de utilizar as ferramentas existentes na base. Neste tópico, encontra-se informações sobre o funcionamento destas ferramentas, como elas foram utilizadas ao longo desta revisão e uma análise sobre os métodos de pesquisa para que as informações desejadas fossem encontradas dentro da base.

5.1 Ferramentas de Busca

Dentro da base de dados Scopus, é possível procurar os dados por meio de título, autores, palavras-chave, idioma, entre outras opções disponíveis. Ao longo da pesquisa, foi

notado que a busca por meio de palavras-chave é o modo mais apropriado de encontrar informações para este projeto. Após selecionar uma palavra-chave, a base de dados apresenta diversos artigos, revisões, livros, entre outras fontes de informação que utilizam esta mesma palavra-chave, a partir disso, é feita a leitura do título e do resumo para determinar e selecionar a fonte, caso as informações contidas nela sejam pertinentes com o tema da pesquisa.

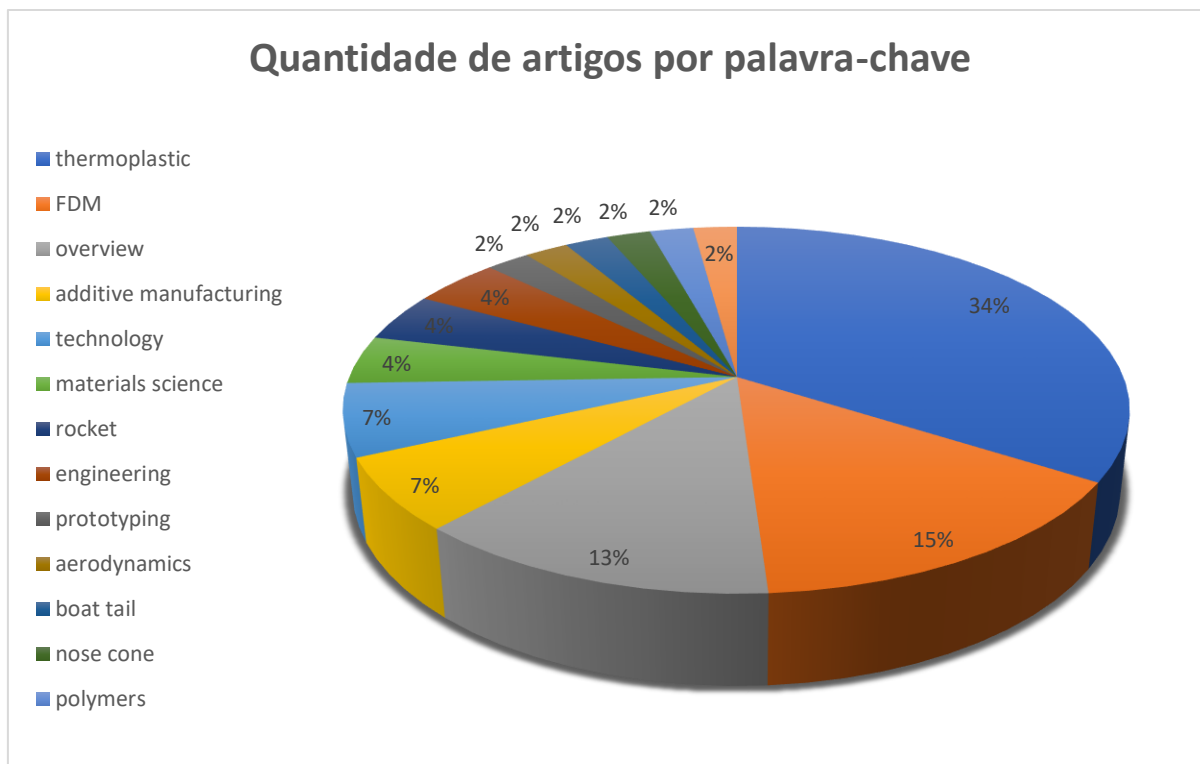
Uma estratégia para encontrar as informações necessárias é utilizar combinações de palavras chaves, ao invés de utilizar uma única palavra-chave por vez, deste modo é possível especificar mais e as chances da base de dados mostrar documentos mais próximos com o desejado é maior, entretanto, quanto mais específica a procura, menos resultados são mostrados, além disso, é necessário ter um conhecimento sobre quais são as palavras chaves comumente utilizadas dentro da área de pesquisa, quanto mais uma palavra é utilizada, consequentemente uma maior variedade de resultados aparece. Portanto é preciso encontrar um balanço entre quantos e quais termos serão utilizados na barra de pesquisa. Este equilíbrio foi desenvolvido ao longo da pesquisa, por meio de tentativas e erros, até serem encontradas os melhores termos e combinações.

A este ponto da pesquisa foi concluído que o ideal para encontrar uma variedade boa de artigos, que em sua maioria são minimamente relacionados com o tema desta revisão são combinações de duas ou no máximo três palavras-chave. Após utilizar este método, também é possível aplicar os filtros, para afunilar ainda mais os resultados. Os filtros podem ser acessados ao utilizar a função “Analisar resultados da busca”. Nela aparecem as opções de filtro e gráficos mostrando a quantidade de artigos que são encontrados em cada um deles. Para esta pesquisa, os filtros de ano e área de estudo foram considerados os mais eficientes para uso.

5.2 Análise dos Dados Encontrados atualizar

O primeiro passo para a busca de artigos foi determinar quais palavras-chave seriam utilizadas. Para encontrar informações sobre manufatura aditiva, as palavras utilizadas foram “Additive Manufacturing”, “Prototyping”, “3D Printing” e “FDM”. Para encontrar informações sobre as peças e os materiais poliméricos foram utilizadas “Thermoplastic”, “Polymers”, “Nose Cone” (para informações a respeito da Coifa) e “Boat Tail”. E para agregar a combinação de palavras-chave e contribuir para achar resultados mais relevantes foram utilizados os termos “Overview”, “Technology”, “Rocket”, “Engineering”, “Materials Science” e “Aerodynamics”. O Gráfico abaixo representa a quantidade de artigos selecionados que são atribuídos a partir das palavras-chave apresentadas, a fim de analisar quais destes termos foram mais relevantes para a pesquisa.

Figura 1 – Porcentagens referentes ao número de artigos selecionados de acordo com suas palavras-chave atribuídas.



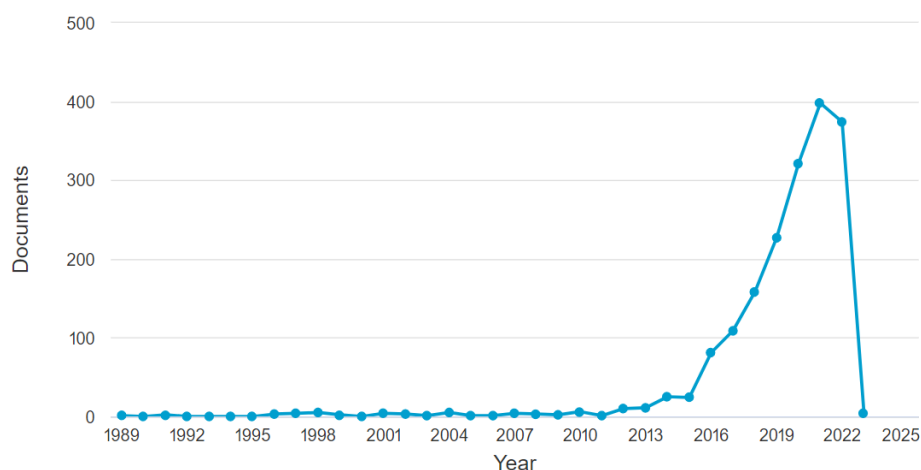
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser facilmente observado, os termos “Thermoplastic” e “FDM” foram os que mais contribuíram para encontrar artigos apropriados para os propósitos da pesquisa. Ao utilizar a palavra “Thermoplastic” são encontrados na base Scopus aproximadamente 74 mil resultados, apesar de ser bom ter uma grande quantidade de informações, este número é grande demais para poder analisar com cuidado todos os artigos, por isso, foi acrescentado o termo “FDM” na pesquisa, para criar uma combinação de palavras que reduzisse a quantidade de resultados, o que foi extremamente efetivo, pois foram encontrados 1,5 mil resultados desta maneira, o que possibilita uma avaliação mais cuidadosa sem comprometer com a variedade dos resultados. Para afunilar ainda mais estes resultados, foram utilizados filtros de área de pesquisa, como ciência de materiais e engenharia, e filtros de ano, principalmente para 2020 e 2021, deste modo as informações se tornam mais voltadas para o uso similar ao desta pesquisa, e as informações encontradas se mantêm o mais atualizadas possíveis. Este mesmo método foi utilizado todas as palavras-chave citadas e suas combinações, para encontrar a maior quantidade possível de informações relevantes.

Abaixo estão dois gráficos, fornecidos pela própria base de dados Scopus representando a quantidade de documentos dentro da busca pelas palavras-chave “Thermoplastic” e “FDM”, utilizando em um filtro de ano, e no outro filtros de área de pesquisa. É possível por meio destes, tanto selecionar as informações desejadas, quanto verificar em quais categorias do filtro estão concentradas uma maior quantidade de documentos.

Figura 2 – Quantidade de documentos por ano que utilizam a combinação de palavras-chave “Thermoplastic” e “FDM” de 2010 a 2022

Documents by year



Fonte: SCOPUS

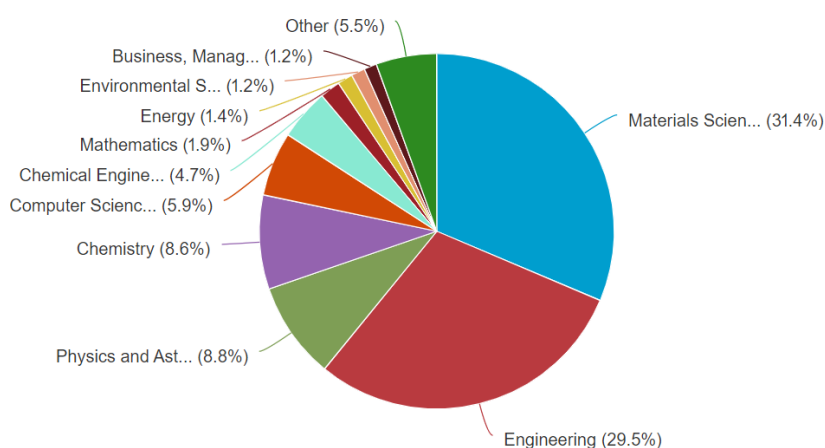
<https://www-scopus.ez42.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic#basic>

(Acesso em 07 de outubro de 2022).

É possível analisar com as pesquisas sobre termoplásticos e o método de modelagem de deposição fundida (FDM) ganham mais espaço no estado da arte a partir de 2015, crescendo continuamente, pois é a partir desta data que este tipo de tecnologia ganha mais atenção do mercado.

Figura 3 – Porcentagens referentes a quantidade de documentos em cada área de pesquisa utilizando a combinação de palavras-chave “Thermoplastic” e “FDM” de 2010 a 2022.

Documents by subject area



Fonte: SCOPUS

<https://www-scopus.ez42.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic#basic>

(Acesso em 07 de outubro de 2022).

Já neste gráfico é possível analisar que as áreas mais envolvidas com o método FDM e o uso de termoplásticos são a ciência de materiais e a engenharia. Nas pesquisas, o termo “Aerospace” ou “Aerodynamic” não apresentaram documentos significativos, tanto em questão de conteúdo quanto de quantidade, portanto, apesar de serem utilizadas esses termos nas buscas, nenhum artigo foi selecionado por meio destas palavras.

5.3 Materiais

5.3.1 Matrizes

Como mencionado anteriormente, para produzir um polímero composto, é necessário ter uma matriz, que será a base do material, e adicionar compósitos, que podem ser filamentos, fibras, partículas, nanopartículas entre outros materiais que contribuem para o aprimoramento da matriz escolhida. Os polímeros ABS e PLA são os mais comuns utilizados com matriz, isto por causa da qualidade de suas características juntamente com baixo custo. O livro “Polymers for 3D Printing” editado por Joanna Izdebska-Podsiadly traz uma lista dos principais compósitos de termoplásticos utilizados a técnica de impressão FDM [23]. Segue destes, os selecionados para esta revisão, sendo esses os que utilizam PLA ou ABS como matriz, e derivados de carbono e grafeno como reforço.

- Poliuretano / ácido polilático / óxido de grafeno (TPU/PLA/GO),
- Plaquetas de grafeno / acrilonitrila butadieno estireno (GNP/ABS),
- Nanotubos de carbono / ácido polilático (CNT/PLA),
- Múltiplas paredes de nanotubos de carbono / ácido polilático (MWCNT/PLA).

O acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é um polímero formado por três monômeros diferentes, que podem estar em proporções variadas a fim de alterar suas características, sendo de 15% a 50% acrilonitrila, 5% a 30% butadieno, e 40% a 60% estireno, sendo este o monômero responsável pela rigidez do polímero. Este material possui considerável resistência térmica e mecânica, que podem ser controlados de acordo com seu peso molecular e é considerado ter um bom equilíbrio entre estas duas qualidades.

O ácido polilático (PLA) é derivado de fontes renováveis, e por isso é considerado um plástico ecológico. Suas propriedades mecânicas podem variar e serem utilizadas em diferentes aplicações, pois o material consegue performar tanto de forma dura quanto elástica. Quando adicionado um composto, suas propriedades tendem a se tornar mais elásticas. Entretanto, a resistência térmica o polímero possui uma menor estabilidade térmica.

Ao comparar estes dois materiais, é possível perceber que apesar do PLA ser um material melhor para impressão em 3D, pois é capaz de imprimir mais detalhes, ele é mais suscetível a deformações térmicas, e não é tão resistente quanto o ABS. Deste modo, as características do ABS são melhores, além de também ser um material mais forte e mais durável.

5.3.2 Aditivos

Para fortalecer a matriz de um polímero, é comum ser utilizado derivados de carbono, como o Carbon Black (CB); Nanotubos de Carbono (CNT) e o Grafeno. Isto porque estes materiais possuem uma baixa densidade, e uma alta força de Young, o que permite que eles tenham massas leves sem comprometer com sua rigidez [24]. Estas opções são técnicas que não exigem equipamentos caros e uma mão de obra extremamente especializada, além de ter múltiplas aplicações, o que torna estas técnicas eficientes por um baixo custo, e por estes motivos elas vêm sendo muito utilizadas [25].

5.3.2.1 TPU e PLA com Óxido de Grafeno

Utilizando um composto na proporção 7:3 de TPU e PLA respectivamente, ao acrescentar diferentes quantidades de óxido de grafeno (GO) pode ser observado um aumento de 90°C na temperatura de degradação do material, além de melhorar a qualidade das estruturas cristalinas formadas, que também contribuem com a qualidade das propriedades térmicas. Essa informação foi obtida por meio de experimentos e análises de DSC e TGA, mostrando que as melhores quantidades de GO para serem acrescentadas são 2% e 5%. Já quanto a propriedades mecânicas, a quantidade ideal de GO para acrescentar é 0.5 wt% que pode aumentar em até 75.5% o módulo de tração e em 69,17% o ponto de rendimento, isto é, a tensão máxima que um material resiste antes de deformar [26].

Já em outro experimento utilizando uma proporção de 7:2 PLA e TPU respectivamente e 9 wt% de Óxido de Grafeno reduzido (rGO), a mistura dos materiais reduz as ligações de hidrogênio contidas no PLA, reduzindo as propriedades mecânicas, o experimento nada diz sobre as propriedades térmicas [27].

5.3.2.2 ABS com Nanoplaquetas de Grafeno

Um estudo levando 99.5% de ABS e 0.5% de Nanoplaquetas de Grafeno (GNP) indica que a quantidade de GNP inserida não foi suficiente para fazer grandes alterações, entretanto, o estudo mostra que acrescentar GNP e Nanotubos de carbono (CNT) na matriz é uma outra opção que traz resultados satisfatórios para o reforço do polímero. Por meio de DSC e TGA foi analisado que a temperatura vítrea e a temperatura com 3% de perda de massa têm um pequeno aumento, e o GNP em uma camada com 0.35mm de grossura pode aumentar em 18% o módulo de tração [28].

Em outro estudo utilizando 4 wt% de GNP na matriz foi observado o aprimoramento das características mecânicas, além de uma melhora na estabilidade térmica do material. As Nanoplaquetas de grafeno podem ser um material vantajoso pois possui grandes qualidades térmicas e mecânicas com um custo baixo [29].

5.3.2.3 PLA com Nanotubos de Carbono

No caso do PLA, ao acrescentar 6 wt% a temperatura de derretimento (TM) do polímero tem um bom aumento. , entretanto a qualidade da cristalização é comprometida e pode ocorrer de forma espontânea. Quanto as propriedades mecânicas, a resistência á tração aumenta em 64.12% e aumento de 29.29% em resistência á flexão [16].

Em outro experimento, realizado com diferentes concentrações de CNT (0.1%, 1%, 2% e 5%) Não é possível ver uma mudança significativa na TG ou na TM do material, entretanto, há uma melhora na qualidade da cristalização, com exceção do PLA5% que não possuiu mobilidade suficiente para ter a melhora em sua cristalização. A temperatura de degradação aumenta no máximo em 9°C nestas condições experimentais [30]. Com estas informações é possível interpretar que para o PLA demonstrar melhora em suas características térmicas é necessário inserir quantidades maiores que 5 wt% de CNT na matriz.

Já para os compósitos de PLA com múltiplas paredes de nanotubos de carbono (MWCNT) obteve um aumento significativo de resistência à tração apenas com uma concentração de 0.1% de MWCT [31]. Em outro estudo, analisando termicamente foi constatado que o composto de PLA E MWCNT são capazes de ficar estáveis até 270°C sem nenhuma perda de massa, e seu processo de degradação finaliza ao atingir 390°C. Este experimento foi realizado em diversas concentrações e a que mais se destacou foi 5 wt% de MWCT [32].

6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Conforme o demonstrado, todas as bases fundamentais, e todo o conhecimento previamente necessário para realizar esta pesquisa já foram explorados, estudados e compreendidos por meio de pesquisas e leituras de artigos, dentro dos seguintes tópicos:

- Métodos de Manufatura Aditiva (em específico modelagem de deposição fundida).
- Peças Coifa e Boat Tail que serão manufaturadas e suas especificações.
- Materiais poliméricos e seus compósitos.

Os métodos de realização de uma revisão bibliográfica também foram explorados e compreendidos, assim como a navegação pela base de dados, assim como suas ferramentas de busca, que foram utilizadas e praticadas ao longo de todas as etapas da pesquisa.

Ao explorar o estado da arte referente aos materiais selecionados, pode ser observado de acordo com experimentos que os compósitos formados por ABS/GNP e PLA/CNT não obtiveram grandes alterações nas propriedades das matrizes, em contrapartida, o composto formado por TPU/PLA/GO obteve o melhor desempenho na pesquisa, e por isso é o recomendado para a manufatura das peças desejadas.

Referências

- [1] Wilson Luiz de Oliveira Junior, Isadora dos Santos Damas, Gabriela Romero, Gabriel Ramos, Giovanna Gonçalves, Kelvin Moreira Vanderley. Preliminary Design Review -Projeto Polo - Departamento de Estruturas e Aerodinâmica-UFABC Rocket Design Technical Report, 2020
- [2] CALLISTER Jr, William D; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. Grupo Editorial Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [3] NEGI, Sushant; DHIMAN, Suresh; SHARMA, Rajesh Kumar. Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review. Journal of Manufacturing Technology Research, v. 5, n. 1/2, p. 75, 2013.
- [4] D. Valino, Arnaldo; Ryan C. Dizon, John; H. Espera, Alejandro; Chen, Qiyi; Messman, Jamie; C. Advincula, Rigoberto. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. Progress in Polymer Science, Volume 98, 2019
- [5] Cailleaux, Sylvain; Sanchez-Ballester, Noelia M.; Gueche, Yanis A.; Bataille, Bernard; Soulairol, Ian. Fused Deposition Modeling (FDM), the new asset for the production of tailored medicines. Journal of Controlled Release, Volume 330, p. 821-841, 2021.
- [6] White, James L.; Technology of Polymer Processing. Institute of Polymer Engineering, University of Akron, Akron, Ohio, U.S.A.
- [7] Mandala, Radhika; Bannoth, Anjaneya Prasad; Akella, Suresh; Rangari, Vijaya K.; Kodali, Deepa. A short review on fused deposition modeling 3D printing of bio-based polymer nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science, Volume 139, Issue 14, 2021
- [8] Santana, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. v. 23, n. 4, 2018.

- [9] Bakirci, Murat. Design and Aerodynamic Analysis of a Rocket Nose Cone with Specific Fineness Ratio. IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), pp. 80-85, 2021.
- [10] Gholap, T. B.; Salokhe, R. V.; Ghadage, G. V.; Mane, S. V.; Sahoo, ; and D. Computational Study on Base Drag Reduction for a Boat-tailed Axisymmetric Jet Nozzle Through Base Geometry Modifications. IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), pp. 1-5, 2021.
- [11] Neto, J.S.S.; de Queiroz, H.F.M.; Aguiar, R.A.A.; Banea, M.D. A Review on the Thermal Characterisation of Natural and Hybrid Fiber Composites. *Polymers* 13, 4425, 2021.
- [12] Dezaki, Mohammadreza Lalegani; Hatami, Saghi; Ariffin, Mohd Khairul Anuar Mohd. An overview of fused deposition modelling (FDM): research, development and process optimization. Emerald Publishing Limited, Volume 27, Issue 3, 2021.
- [13] Handwerker, M.; Wellnitz, J.; Marzbani, H. Review of mechanical properties of and optimisation methods for continuous fibre-reinforced thermoplastic parts manufactured by fused deposition modelling. *Prog Addit Manuf* 6, 663–677, 2021.
- [14] Zhuo, Peng; Li, Shuguang; Ashcroft, Ian A.; Jones, Arthur I. Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, Volume 224, 2021.
- [15] Colijn, Ivanna; Schroën, Karin. Thermoplastic bio-nanocomposites: From measurement of fundamental properties to practical application. *Advances in Colloid and Interface Science*, Volume 292, 2021.
- [16] Corcione, C.E.; Frigione, M. Characterization of Nanocomposites by Thermal Analysis. *Materials*, 5, 2960-2980, 2012.
- [17] Menczel, Joseph D. *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Denari, Gabriela Bueno; Cavalheiro, Éder Tadeu Gomes. *Princípios e aplicações de análise térmica*. São Carlos: IQSC, p. 40, 2012.
- [19] Sepe, Michael P. *Thermal analysis of polymers*. iSmithers Rapra Publishing, Volume 95, 1997.
- [20] Gedde U. W. *Thermal Analysis of Polymers, Drug Development and Industrial Pharmacy*, 16:17, 2465-2486, 1990
- [21] Borrego, Maura; Foster, Margaret J.; Froyd, Jeffrey E.; Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields. *Journal of Engineering Education*, Vol. 103, No. 1, p. 45–76, 2014.
- [22] Tranfield, David; Denyer, David; Smart, Palminder; Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, Vol. 14, p. 207–222, 2003.
- [23] Izdebska-Podsiadly, Joanna. *Polymers for 3D printing: Methods, properties, and Characteristics*. United Kingdom, William Andrew, 2022

- [24] Bortoli, L.S de; Farias, R. de; Mezalira, D.Z; Schabbach, L.M; Fredel, M.C. Functionalized carbon nanotubes for 3D-printed PLA-nanocomposites: Effects on thermal and mechanical properties. Volume 31, 2022.
- [25] Zahmi, Salem Al; Alhammadi, Saif; ElHassa, Amged, Ahmd, Waled. Carbon Fiber/PLA Recycled Composite. Polymers, Volume 14 Issue 11, 2022.
- [26] Chen, Qiyi; Mangadlao, Joey Dacula ;Wallat , Jaqueline; De Leon, Al; Pokorski , Jonathan K; Advincula, Rigoberto C. 3D Printing Biocompatible Polyurethane/Poly(lactic acid)/Graphene Oxide Nanocomposites: Anisotropic Properties. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017.
- [27] Guo, Rui; Ren, Zechun; Xu, Min; Cai, Liping. Preparation and properties of the PLA-based conductive biocomposites with the addition of rGO nanoplatelets. Materialstoday communication, Volume 32, 2022.
- [28] Ceretti, Daniel V. A; Fiorio, Rudinei; Waeleghe, Tom Van; Desmet, Arne; Florizoone, Bauke; Cardon, Ludwig; D'hooge, Dagmar R. Exploiting mono- and hybrid nanocomposite materials for fused filament fabrication with acrylonitrile butadiene styrene as polymer matrix. Applied Polymer SCIENCE. 2022
- [29] Trivedi, Dhairawat N.; Rachchh, Nikunj V. Graphene and its application in thermoplastic polymers as nano-filler- A review. Polymer, volume 240, 2022.
- [30] Ceregatti, Thaynara; Pecharki, Paloma; Pachekoski, Wagner M.; Becker, Daniela; Dalmonlin, Carla. Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films, Scielo Brasil, 2017.
- [31] Soad Z. Al Sheheri, Zahra M. Al-Amshany, Qana A. Al Sulami, Nada Y. Tashkandi, Mahmoud A. Hussein & Reda M. El-S. The preparation of carbon nanofillers and their role on the performance of variable polymer nanocomposites, Designed Monomers and Polymers, 22:1, 2019.
- [32] Dul, Sithiprumnea; Pegoretti, Alessandro; Fambri, Luca. Effects of the Nanofillers on Physical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites: Comparison of Graphene Nanoplatelets and Multiwall Carbon Nanotubes. Nanomaterials, 2018.