

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAYANE DE SOUZA FERNANDES

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE IMPRESSÃO NA RESISTÊNCIA AO
IMPACTO DO ABS PROCESSADO POR MANUFATURA ADITIVA**

BELO HORIZONTE

2022

RAYANE DE SOUZA FERNANDES

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE IMPRESSÃO NA RESISTÊNCIA AO
IMPACTO DO ABS PROCESSADO POR MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

BELO HORIZONTE

2022

RAYANE DE SOUZA FERNANDES

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE IMPRESSÃO NA RESISTÊNCIA AO
IMPACTO DO ABS PROCESSADO POR MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 12/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos (Orientador)

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães (CEFET-MG)

Profa. Dra. Mayra Aparecida Nascimento (CEFET-MG)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Célia e Geraldinho, e ao meu irmão, Renan, pelo apoio constante ao longo de todos os anos de graduação, pela compreensão, pelos momentos de conforto e abraços. São meus maiores pontos de referência, esperança e porto seguro.

A toda minha família, tios, primos, avós e cunhada, por estarem sempre presentes.

Aos meus amigos de graduação que estão presentes comigo desde o primeiro semestre, Eduardo, Thaís, Tatiana e Frederico, e a todos os outros que fiz ao longo da jornada, dentro e fora do CEFET, e que dividiram momentos de alegrias e angústias. Aos amigos que fiz no estágio e que me ajudaram a seguir essa reta final com mais leveza. À minha amiga Lidyane, que está sempre ao meu lado e me apoia em todos os momentos da minha vida.

Ao Magno Costa, João Victor Ribeiro e Marcus Pereira, pela ajuda e disposição na construção deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. João Paulo Santos, pela orientação deste trabalho e ter sido uma referência desde o PET- Engenharia de Materiais.

Aos demais professores presentes na banca, Prof.^a Aline Magalhães e Prof.^a Mayra Nascimento, e a todos os professores do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, e demais servidores da instituição, pela rica contribuição em minha formação.

RESUMO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, é uma técnica de processamento de materiais que permite a obtenção de peças únicas e de geometrias complexas. O método mais comum é a modelagem por deposição fundida, em que um filamento é aquecido a temperaturas superiores a temperatura de fusão e então é conformado em um formato previamente desenhado com o auxílio de softwares. O acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um dos principais polímeros utilizados na impressão 3D, devido a facilidade e temperatura favoráveis de processamento, e boas propriedades mecânicas. O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da temperatura de impressão na resistência ao impacto Izod do ABS. Realizou-se a impressão em três temperaturas diferentes (210 °C, 230 °C e 240 °C) e em seguida, foi feito o ensaio de impacto Izod. Os resultados demonstram uma leve diminuição na resistência ao impacto Izod do ABS com o aumento da temperatura de impressão. Esse resultado é consequência do início da degradação térmica das cadeias do ABS e do aumento da fluidez do polímero, causando defeitos superficiais e vazios entre as camadas impressas. Apesar dos resultados obtidos, a redução da resistência ao impacto não se mostra significativa em termos de comportamento mecânico do ABS, uma vez que a degradação térmica é expressiva a maiores temperaturas, resultado que pode ser observado em comparação com outros estudos presentes na literatura. Os valores de resistência ao impacto obtidos foram baixos, quando comparados com os valores de referência, e são consequência da baixa densidade de preenchimento das amostras.

Palavras chave: manufatura aditiva, ABS, resistência ao impacto, temperatura, degradação.

ABSTRACT

Additive manufacturing, or 3D printing, is a materials processing technique that allows the production of unique parts with complex geometries. The most common method is fused deposition molding, in which a filament is heated to temperatures above the melting temperature and then formed into a shape previously designed with the aid of software. Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) is one of the main polymers used in 3D printing, due to its favorable processing ease and temperature, and good mechanical properties. The present work aims to evaluate the influence of printing temperature on the Izod impact strength of ABS. Printing was performed at three different temperatures (210 °C, 230 °C and 240 °C) and then the Izod impact test was performed. The results show a slight decrease in the Izod impact strength of ABS with increasing printing temperature. This results from the onset of thermal degradation of the ABS chains and increased fluidity of the polymer, causing surface defects and voids between the printed layers. Despite the results obtained, the reduction in impact strength is not significant in terms of ABS mechanical behavior, since the thermal degradation is significant at higher temperatures. This result can be observed in comparison with other studies in the literature. The impact strength values obtained were low, when compared to the reference values, and are a result of the low infill density of the samples.

Key words: additive manufacturing, ABS, impact strength, temperature, degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Desenho esquemático da técnica FDM de impressão 3D	12
Figura 3.2 – Vazios entre filamentos depositados	14
Figura 3.3 - Estados físicos e transições térmicas em polímeros amorfos	15
Figura 3.4 – Estrutura química do ABS	17
Figura 3.5 – Tipos de copolímeros, em que A e B representam monômeros	17
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas executadas	19
Figura 4.2 – Dimensões dos corpos de prova testados	20
Figura 4.3 – Corpos de prova impressos	20
Figura 5.1 – Resistência ao Impacto (KJ/m^2) do ABS em função da temperatura de impressão	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros de impressão utilizados	21
Tabela 5.1 – Valores médios de resistência ao impacto Izod para as amostras de ABS determinados a partir do ensaio de impacto	22

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
°C	Graus Celsius
FDM	Modelagem por deposição fundida
FFF	Fabricação com Filamento Fundido
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MA	Manufatura Aditiva
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
m/s	Metros por segundo
MPa	Mega Pascal
J	Joules
J/cm	Joules por centímetro
KJ/m ²	Kilojoules por metro quadrado
PLA	Poliácido Láctico
SAN	Estireno-Acrilonitrila
TGA	Termogravimetria
T _{dec}	Temperatura de decomposição
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _f	Temperatura de fluxo
T _m	Temperatura de fusão cristalina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
	2.1 Objetivo Geral	11
	2.2 Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
	3.1 Manufatura Aditiva	12
	3.2 Temperatura e Processamento de Polímeros Termoplásticos	15
	3.3 Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
	4.1 Procedimento Geral do Trabalho Desenvolvido	19
	4.2 Material	19
	4.3 Métodos	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6	CONCLUSÕES	26
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, é uma técnica de processamento de materiais poliméricos que vem ganhando força desde a sua criação, na década de 1980 (RAMIAN; RAMIAN; DZIOB, 2021). É uma técnica capaz de replicar, com alta precisão, um modelo de geometria complexa, desenhado com o auxílio de um software computadorizado. E, ao contrário de outros métodos de processamento, como a moldagem por injeção, por exemplo, não exige a fabricação de um molde, que demanda uma produção em massa para cobrir os custos de investimentos. Por isso, a impressão 3D é uma técnica muito utilizada na impressão de protótipos e modelos de peças únicas.

Os polímeros mais comumente utilizados nesse método de processamento são o polímero ácido lático (PLA) e o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), sendo este último objeto de estudo no presente trabalho. Sua temperatura de fusão é baixa o suficiente (cerca de 137 °C) para ser impresso e é um polímero conhecido por sua resistência química, resistência ao calor e resistência ao impacto (RAMIAN; RAMIAN; DZIOB, 2021).

O ABS, devido à grandeza de suas propriedades, é considerado um plástico de engenharia, e possui diversas aplicações, como aparelhos eletrônicos, capacetes de proteção individual, brinquedos e peças automobilísticas (LI et al., 2020).

Para obter uma peça por impressão 3D, vários parâmetros podem ser controlados, tais como: temperatura de impressão, temperatura da mesa em que o material será depositado, velocidade de impressão, diâmetro do filamento, diâmetro do bico, espessura da camada impressa, orientação das camadas e preenchimento da amostra.

A variação da temperatura de impressão pode garantir diferentes resultados de propriedades mecânicas da peça produzida, uma vez que degradação térmica das cadeias é resultado da temperatura em que o polímero é exposto ou processado. Por sua vez, a degradação se relaciona intimamente com as propriedades mecânicas do material, uma vez que se refere à integridade das cadeias poliméricas e de suas ligações químicas (RABELLO, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estabelecer a influência da temperatura de impressão de um *grade* específico de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) na resistência ao impacto Izod.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar mecanicamente as amostras de ABS por meio de ensaio de impacto Izod;
- Analisar a influência da temperatura de impressão na resistência ao impacto do ABS;
- Comparar com outros estudos existentes na literatura que relacionam influência de temperatura na resistência ao impacto Izod do ABS.

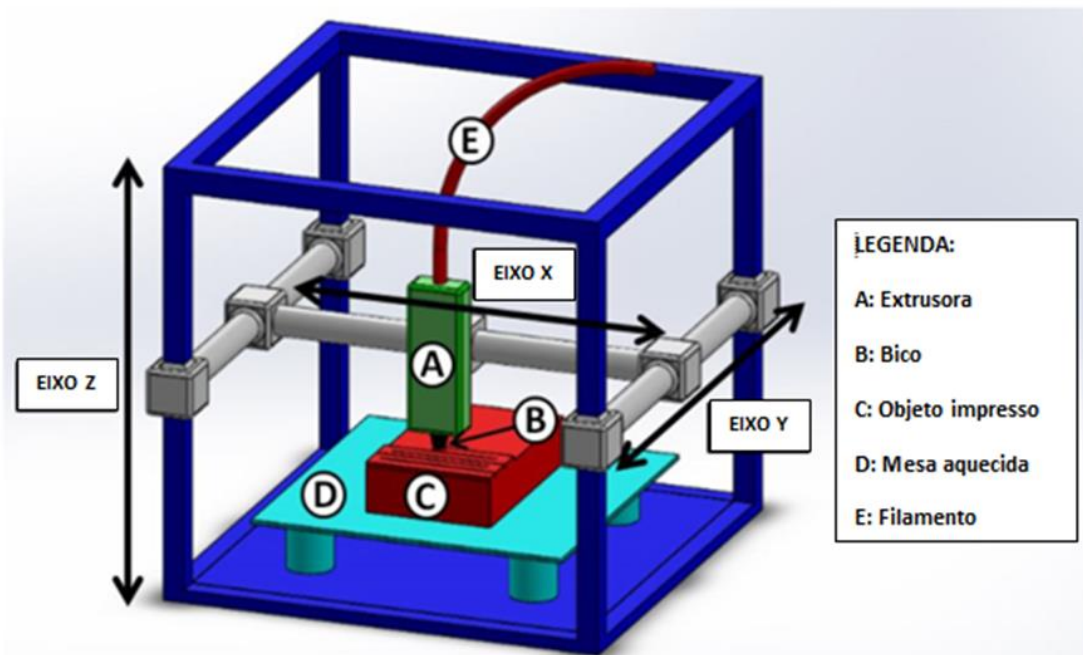
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA), ou impressão 3D, é uma tecnologia de obtenção de peças poliméricas, principalmente, com formatos geométricos complexos, desenhados previamente através de um software, a partir da deposição por camadas, de um filamento ou resina (DUL; FAMBRI; PEGORETTI, 2016; ROSENZWEIG et al., 2015).

A técnica mais comum é a modelagem por deposição fundida (FDM), em que um filamento de um polímero termoplástico é aquecido a temperaturas superiores à temperatura de fusão do polímero e, esse fundido é submetido a um processo de extrusão, sendo depositado camada por camada em uma mesa aquecida previamente, para melhorar as propriedades de adesão e contração térmica do polímero. Os polímeros mais comumente utilizados para impressão 3D são o ABS e o PLA (RAMIAN; RAMIAN; DZIOB, 2021). A Figura 3.1 demonstra o processo de FDM.

Figura 3.1 - Desenho esquemático da técnica FDM de impressão 3D



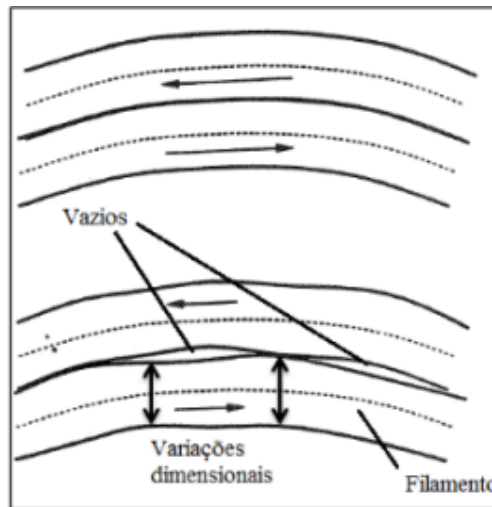
Fonte: Traduzido de Mazzanti; Malagutti; Mollica, 2019.

A técnica FDM, também conhecida por fabricação com filamento fundido (FFF), é a mais popular quando se trata de impressão 3D, por possuir um baixo custo e ser capaz de alcançar elevadas velocidades de impressão, quando comparada com outras técnicas de MA. Porém, exige filamentos de alta qualidade, uma vez que as forças aplicadas na alimentação, de tensão e compressão, e o aquecimento do material demandam uma matéria prima com altas estabilidades mecânicas e térmicas (SOUZA, 2020).

Através da impressão 3D é possível obter peças únicas, com alta precisão dimensional e complexidade geométrica. As propriedades do material impresso podem ser controladas de acordo com os parâmetros de impressão da máquina, que são divididos em três categorias: parâmetros de processamento, como temperatura de extrusão (também chamada de temperatura de impressão ou temperatura do bico), temperatura da mesa e velocidade de impressão; parâmetros estruturais, como espessura da camada, densidade de preenchimento, geometria do preenchimento, número de camadas e ângulo de impressão; e parâmetros da geometria de extrusão, como diâmetro do bico e o diâmetro do filamento (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLICA, 2019). Atualmente, as aplicações de materiais impressos via MA incluem engenharia civil, engenharia de tecidos, engenharia automotiva e engenharia aeroespacial (RAMIAN; RAMIAN; DZIOB, 2021).

A temperatura de impressão é um parâmetro importante na determinação de propriedades mecânicas do produto final. Os materiais processados via FDM apresentam resultados inferiores quando comparados a outros métodos de processamento, como a moldagem por injeção, devido a presença de vazios inerente ao método, causado pela falha no preenchimento completo de material entre as camadas depositadas (PEREIRA, 2019). A figura 3.2 demonstra a presença de vazios em uma amostra impressa. Mazzanti, Malagutti e Mollica correlacionaram diversos parâmetros de impressão e suas influências nas propriedades dos polímeros impressos via FDM. A temperatura de impressão está diretamente relacionada com a fragilidade do produto, e pode ser solucionada ao expor o polímero a menores temperaturas de extrusão. Assim como a fragilidade, foi possível observar uma maior degradação da matriz com maiores temperaturas de impressão (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLICA, 2019).

Figura 3.2 – Vazios entre filamentos depositados



Fonte: Pereira, 2019.

A impressão de blocos completamente preenchidos, ou seja, com uma densidade de preenchimento de 100% pode levar mais de 24 horas para ser completada, considerando um cubo de arestas iguais a 20 cm. Para reduzir o tempo de impressão e o consumo de material, muitas peças são impressas com menores densidades de preenchimento. Entretanto, esse é um parâmetro importante na determinação das propriedades mecânicas do material obtido por MA. Quanto maior a densidade de preenchimento do produto, melhor é o seu desempenho em termos de propriedades mecânicas (SOUZA, 2020).

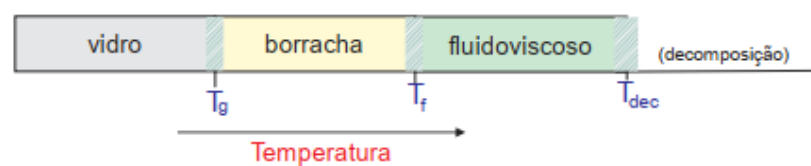
Em comparação com métodos clássicos de processamento de polímeros, como a moldagem por injeção, por exemplo, a manufatura aditiva permite que haja um menor esforço em planejamento de processo e produção para alcançar o produto com a geometria e propriedades desejadas. Além disso, métodos clássicos exigem a fabricação em massa de um produto para compensar os custos iniciais de investimento, ao contrário da impressão 3D, que permite a fabricação de protótipos, por exemplo. Entretanto, ainda existem desafios relacionados à utilização do método de impressão 3D, como por exemplo, a limitação em termos de processamento de materiais cerâmicos e metálicos, e a utilização de peças impressas em aplicações estruturais, uma vez que os estudos relacionados à manufatura aditiva e as propriedades dos materiais processados por esta técnica começaram a ser caracterizadas recentemente, visto que a impressão 3D é uma tecnologia recente, tendo início na década de 1980 (MOSTAFAEI et al., 2021).

3.2 Temperatura e Processamento de Polímeros Termoplásticos

Polímeros termoplásticos são aqueles cuja arquitetura molecular é linear e/ou ramificada, diferente dos termorrígidos e elastômeros, que possuem estrutura reticulada. A ausência de reticulações permite a solubilização e a fusão do material, garantindo sua capacidade de ser processado e reprocessado (RABELLO, 2021).

O processamento de um polímero é fator determinante nas propriedades do material a ser obtido. A temperatura da extrusora e da mesa de resfriamento influenciam na morfologia e cristalinidade da peça, por exemplo (RABELLO, 2021). A temperatura de transição vítrea (T_g) de um plástico é a faixa de temperatura na qual as cadeias adquirem mobilidade. Abaixo dessa temperatura, a energia interna não é suficiente para que haja rotação nas ligações químicas das cadeias poliméricas e o polímero é um material rígido (RABELLO, 2021). Enquanto isso, a temperatura de fusão cristalina (T_m), é a faixa de temperatura na qual ocorre a destituição dos cristais existentes na estrutura do material, e acima dessa temperatura, o polímero se torna fluidoviscoso. A presença de T_g está relacionada a polímeros amorfos, enquanto a existência da T_m se relaciona a polímeros cristalinos. Polímeros que apresentam as duas faixas de temperatura são os chamados semicristalinos, em que há presença de fase amorfa e de fase cristalina em sua estrutura (RABELLO, 2021). Em um polímero amorfo, há a presença da temperatura de fluxo (T_f), em que o polímero passa a apresentar o comportamento de um fluido altamente viscoso. A T_f é, muitas vezes, a temperatura mínima de processamento de polímeros amorfos, pois abaixo dessa temperatura, apesar da mobilidade adquirida ao passar pela T_g , o fluxo ainda é limitado (RABELLO, 2021). A figura 3.3 mostra os estados físicos e as transições térmicas em um polímero amorfo, sendo T_{dec} a temperatura de decomposição, em que ocorre a decomposição das cadeias poliméricas.

Figura 3.3 - Estados físicos e transições térmicas em polímeros amorfos



Fonte: Rabello, 2021.

A temperatura de decomposição é a temperatura em que o polímero começa a se degradar e depende diretamente da força das ligações químicas presentes na cadeia. Por isso, é o limite em termos de processamento. A faixa de temperatura entre T_f e T_{dec} , é também chamada de “janela de processamento”, pois é nessa faixa de temperatura que o material possui mobilidade e capacidade de fluxo suficiente para ser conformado (RABELLO, 2021).

Em um estudo de 2022 que analisou a degradação térmica do ABS e a correlação com as propriedades mecânicas do material, é possível observar que há medida que o polímero é submetido a uma maior temperatura, a sua resistência ao impacto é menor, causado pela degradação da cadeia (TIGANIS et al., 2002).

O polibutadieno, presente no ABS, possui maior contribuição na degradação das cadeias poliméricas. Ocorre a abstração de átomos de hidrogênio em carbonos em posições insaturadas, levando a formação de produtos carboxílicos e hidroxílicos, na presença de oxigênio. Isso pode levar a defeitos na estrutura do polímero e criar pontos concentradores de tensão, além de aumento de ligações cruzadas, e, conseqüentemente, da densidade (TIGANIS et al., 2002).

Outro estudo, de 2022, demonstrou que o aumento da temperatura de impressão do ABS acarreta em uma diminuição da resistência ao impacto do material. Nesse estudo, os autores realizaram análise da morfologia das amostras e perceberam que, as amostras impressas a uma maior temperatura possuíam um padrão de superfície planar, ao contrário das impressas a menores temperaturas, que possuíam um padrão em zig-zag. Esse padrão planar diminui a adesão da estrutura, diminuindo a resistência ao impacto (TRAN et al., 2022).

Um estudo de 2019 (HARRIS et al., 2019) analisou a influência de diversas propriedades de impressão, entre elas, a temperatura do bico, nas propriedades térmicas e mecânicas do ABS e de blendas de ABS e polipropileno. Considerando o ABS puro e a variação apenas da temperatura de impressão, foi possível observar que o aumento da temperatura de impressão acarreta em uma diminuição da temperatura de início da degradação do polímero. Os autores também indicam que a degradação do ABS se deve pela abstração do hidrogênio presente nos monômeros do butadieno. O aumento da temperatura acarreta em um enfraquecimento das ligações químicas, demandando menos energia para romper o material (RAMLI M. B., NORDIN M. N. A., MASRIPAN N. A. B., 2018).

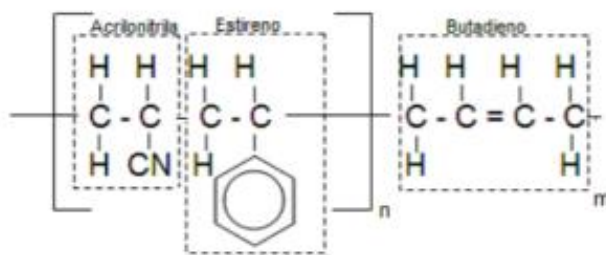
3.3 Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)

O Acrilonitrila-Butadieno-Estireno, ABS, é um copolímero amorfo e termoplástico comumente utilizado em impressão 3D. Sua estrutura é constituída pelos monômeros de acrilonitrila (15-35%), butadieno (5-30%) e estireno (40-60%), em que o butadieno (fase borrachosa) fica uniformemente distribuído em uma matriz (vítrea) de acrilonitrila-estireno (OLIVERA et al., 2016; PEREIRA, 2019; RABELLO, 2021).

Copolímeros são formados por mais de um tipo de monômero, e podem ser organizados estruturalmente de várias formas, podendo ser alternados, aleatórios, em blocos ou do tipo enxerto. O ABS é formado por dois tipos de copolímeros: primeiro, o copolímero SAN (estireno-acrilonitrila) do tipo aleatório, que por sua vez, é enxertado na cadeia do polibutadieno, formando o ABS (RABELLO, 2021).

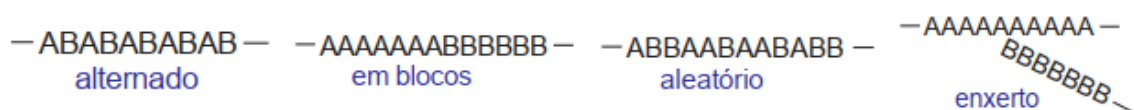
A figura 3.4 ilustra a estrutura química do ABS, e a figura 3.5 ilustra os tipos de copolímeros.

Figura 3.4 – Estrutura química do ABS



Fonte: Pereira, 2019.

Figura 3.5 – Tipos de copolímeros, em que A e B representam monômeros



Fonte: Rabello, 2021.

Considerado um plástico de engenharia, o ABS possui elevada tenacidade, mesmo a baixas temperaturas, estabilidade dimensional, resistência química e facilidade de processamento (OLIVERA et al., 2016). A temperatura de transição vítrea do ABS é em torno de 107 °C (SOHEL et al., 2017), enquanto a temperatura de fluxo é em torno de 137 °C (DUL; FAMBRI; PEGORETTI, 2016).

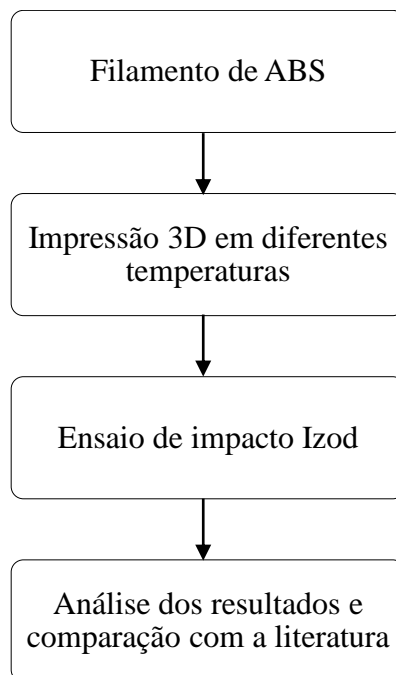
Os valores de referência encontrados de resistência ao impacto Izod do ABS para amostras impressas por FDM dependem de diversos fatores definidos na impressão. Um estudo de 2019 (HUANG et al., 2019), que investigou a influência dos parâmetros de impressão na resistência ao impacto do ABS obtido por FDM obteve resultados entre 5,10 e 21,51 KJ/m², dependendo do parâmetro estudado. Outro estudo, realizado em 2020, tem como valor de referência de resistência ao impacto Izod do ABS, 8,93 KJ/m² (SOUZA, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Procedimento Geral do Trabalho Desenvolvido

Neste trabalho foi avaliada a influência da variação da temperatura de impressão do ABS processado por manufatura aditiva na resistência ao impacto Izod. O trabalho consistiu em impressão das amostras em diferentes temperaturas, realização do ensaio de impacto Izod, análise dos resultados e comparação com a literatura. A imagem 4.1 apresenta o fluxograma com as etapas do trabalho experimental.

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas executadas



Fonte: Próprio autor

4.2 Material

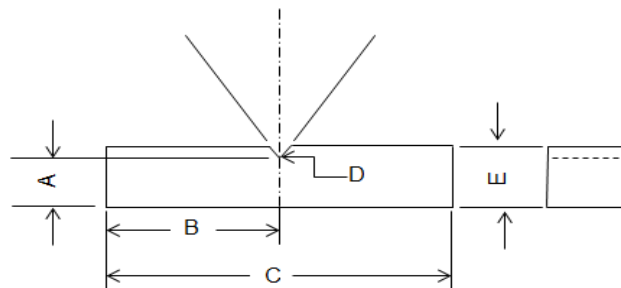
O material utilizado neste trabalho foi o polímero ABS GP35, da GT Max 3D, em forma de filamento, de 1,75 mm. Os dados disponibilizados pelo fornecedor indicam que a T_g

do material é de 100 °C. A temperatura recomendada de impressão, entre 210 °C e 230 °C. A temperatura da mesa, entre 100 °C e 130 °C, e a velocidade de impressão, até 180 mm.

4.3 Métodos

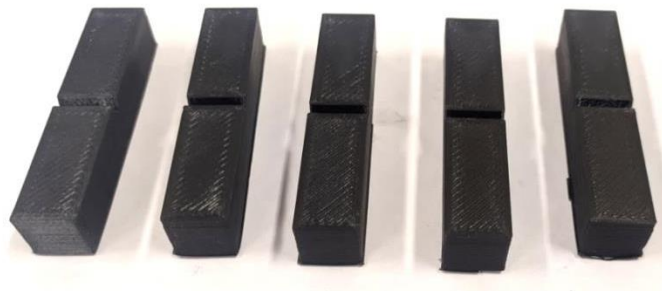
O ABS foi impresso via FDM na impressora GTMax CoreXY A2 da GT Max 3D. Os corpos de prova foram desenhados no software SolidWorks e suas dimensões seguem as recomendações da norma ASTM D256 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS, 2018), que descreve o método de determinação de resistência ao impacto Izod em plásticos. As dimensões estão expostas na figura 4.2, em que $A = 10,16$ mm; $B = 31,8$ mm; $C = 63,5$ mm; $D = 0,25R$ e $E = 12,90$ mm. Os corpos de prova impressos estão retratados na figura 4.3.

Figura 4.2 – Dimensões dos corpos de prova testados



Fonte: Próprio autor

Figura 4.3 – Corpos de prova impressos



Fonte: Próprio autor

As amostras foram impressas variando-se a temperatura do bico, sendo $T_{210} = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{230} = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{240} = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os demais parâmetros de impressão se mantiveram constantes e estão expostos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de impressão utilizados

Parâmetro	Valores
Temperatura de impressão ($^{\circ}\text{C}$)	210; 230; 240
Temperatura da mesa ($^{\circ}\text{C}$)	110
Velocidade de extrusão (mm/s)	30
Diâmetro do filamento (mm)	1,75
Densidade de preenchimento (%)	8,0

Fonte: Próprio autor

Após impressas, realizou-se os ensaios de impacto nas amostras. Os ensaios de impacto Izod foram realizados em cinco corpos de prova para cada condição de temperatura, utilizando-se a máquina de ensaios modelo XJ-25Z, número de série 1150, da Time Group Inc. A velocidade de impacto utilizada no teste foi de 3,5 m/s e a energia de impacto, 11 J, de acordo com a norma ASTM D256.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

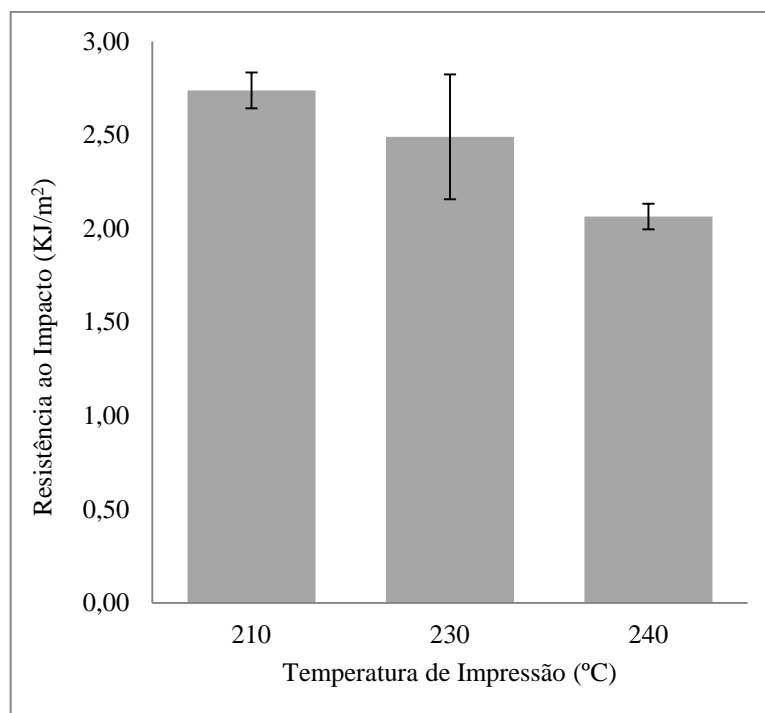
A partir dos ensaios de impacto Izod realizados em cada uma das amostras, obteve-se os valores apresentados na tabela 5.1 e representados graficamente na figura 5.1.

Tabela 5.1 – Valores médios de resistência ao impacto Izod para as amostras de ABS determinados a partir do ensaio de impacto

Amostra	Resistência ao impacto média (KJ/m ²)
T ₂₁₀	2,73 ± 0.09
T ₂₃₀	2,49 ± 0.33
T ₂₄₀	2,06 ± 0.06

Fonte: Próprio Autor

Figura 5.1 – Resistência ao Impacto (KJ/m²) do ABS em função da temperatura de impressão



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos demonstram que, estatisticamente, não há diferença na resistência ao impacto entre as amostras impressas a 210 °C e 230 °C – faixa de temperatura recomendada pelo fabricante. Além disso, há uma leve queda no valor de resistência ao impacto da amostra impressa a 240 °C, quando comparada as outras duas.

A queda no valor de resistência ao impacto pode estar associada à degradação das cadeias poliméricas, que é maior quanto maior for a temperatura de impressão. Mazzanti, Malagutti e Mollica correlacionaram essas propriedades em um estudo realizado em 2019, chegando à conclusão que a degradação da matriz polimérica se relaciona com a fragilidade do material, e o aumento da temperatura de extrusão favorece esse resultado (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLICA, 2019).

Zhang avaliou, através da técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a degradação térmica do ABS. Em amostras que sofreram degradação térmica, há um aumento nos picos de absorção de alcenos e compostos aromáticos. A formação de outras estruturas químicas está associada com a presença de radicais livres no ABS, que facilmente quebram as ligações duplas de carbono presentes em na cadeia polimérica (LIU; LIAO; MA, 2017; ZHANG, 2018). Como proposto por Tiganis e colaboradores, a degradação se inicia nas cadeias do polibutadieno, pela abstração dos átomos de hidrogênio ligados a carbonos insaturados, levando à formação de compostos carbonílicos e hidroxílicos, alterando a microestrutura da cadeia. Esse fenômeno pode levar à formação de reticulações no polímero, reduzindo sua mobilidade (TIGANIS et al., 2002).

Potter e colaboradores estudaram a emissão de compostos orgânicos voláteis durante a impressão do ABS e a relação com a variação da temperatura. Segundo o estudo, análises de termogravimetria (TGA) demonstram que não há perda significativa de massa do ABS em temperaturas abaixo de 325 °C, no entanto, durante a impressão do ABS é possível observar a emissão de componentes voláteis, que são frutos de reações de decomposição. O estudo demonstrou que maiores temperaturas de impressão acarretam uma maior emissão desses compostos, o que indica um início na degradação das cadeias do ABS (POTTER et al., 2019).

Harris e colaboradores realizaram um estudo avaliando a influência de diversos parâmetros de impressão, entre eles, a temperatura de extrusão, nas propriedades mecânicas do ABS. Foi possível observar que o aumento da temperatura de impressão (de 185 °C para 205 °C) causou uma diminuição na resistência à tração do material (de 28,2 para 24,9 Mpa),

entretanto, a diminuição não foi significativa, uma vez que a degradação térmica não é expressiva a temperaturas utilizadas na impressão do ABS, como demonstrado na análise de TGA, também realizada no estudo feito em 2019. Nela, nota-se que a perda de massa expressiva do ABS só ocorre a temperaturas superiores a 390 °C (HARRIS et al., 2019).

Os resultados obtidos na faixa de temperatura analisada no presente trabalho demonstram que, a diferença na resistência ao impacto não é expressiva em termos de comportamento mecânico do material na prática, pois a perda de massa do ABS é significativa em temperaturas mais elevadas (acima de 300 °C), como corroborado por análises de TGA. Liu, Liao e Ma reforçam também, que a degradação do ABS tem início nas ligações duplas carbono-carbono ao longo da cadeia, por um mecanismo de cisão aleatória (LIU; LIAO; MA, 2017). Entretanto, é possível observar um início gradual na degradação das cadeias, levando a uma leve queda nos valores de resistência ao impacto quanto maior for a temperatura de impressão do polímero.

A queda da resistência ao impacto do ABS pode também estar associada com defeitos na microestrutura do material, causada pelo aumento da fluidez do polímero. Esse resultado é corroborado por um estudo realizado em 2021, que avaliou o efeito da temperatura de extrusão nas propriedades mecânicas de polímeros, incluindo o ABS, obtidos por FDM. Nesse estudo, os autores discutem que, o aumento da temperatura de impressão leva a uma melhoria nas propriedades mecânicas do material, até um limite aproximado de 200 °C. Até essa marca, o efeito da temperatura se mostra positivo, pois há um aumento na fluidez do polímero, melhorando a adesão entre camadas e diminuindo a quantidade de vazios entre elas. A partir dessa temperatura, as propriedades mecânicas começam a cair. Essa queda é explicada devido ao aumento ainda maior da fluidez do polímero, que, a partir desse ponto, altera-se a viscosidade e produzem-se peças com mais porosidade. Esse resultado foi confirmado através de análises de microscopia eletrônica de varredura, que demonstrou uma melhoria na adesão superficial das camadas quando a temperatura de extrusão aumentou de 200 °C para 220 °C, porém piorou de 220 °C para 240 °C, deixando evidente o efeito dos vazios existentes nas amostras impressas a maiores temperaturas (SYRLYBAYEV et al., 2021).

Esses resultados corroboram com os estudos feitos por Kim e colaboradores. Analisou-se a influência de parâmetros de processos, como a temperatura do bico, na morfologia e nas propriedades mecânicas de polímeros obtidos por MA. Observou-se três

padrões de morfologia, um a baixas temperaturas de impressão (180 °C), um a temperaturas medianas (190-220 °C) e outros a maiores temperaturas (230-260 °C). Do primeiro tipo para o segundo tipo, há uma melhoria na qualidade superficial do material, obtendo peças com menos defeitos de superfície, menos vazios e melhor adesão entre camadas. Porém, do segundo tipo para o terceiro, a fluidez do polímero se torna tão alta, que o resultado é uma morfologia difícil de ser controlada, com maiores defeitos e número de vazios. Isso se reflete nas propriedades mecânicas do material, que atingem uma melhora nas amostras processadas a 220 °C, mas decrescem a partir desse ponto (KIM et al., 2020).

Algarni e Ghazali demonstraram, em um estudo de 2021, a influência de diversos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do ABS. Um dos parâmetros avaliados foi a densidade de preenchimento dos corpos de prova. O estudo demonstrou que a resistência a tração do ABS aumentou 20% quando o preenchimento da amostra saltou de 20% para 60%. Dentre todos os parâmetros avaliados - densidade de preenchimento, espessura da camada, velocidade de impressão e ângulo de impressão – a densidade de preenchimento foi a propriedade que causou maior influência em todas as propriedades mecânicas analisadas (ALGARNI; GHAZALI, 2021).

Outros estudos reforçam a influência da densidade de preenchimento do ABS impresso pela técnica FDM nas propriedades mecânicas do material. A densidade de preenchimento é fator crucial na determinação da resistência mecânica do ABS, e, quanto maior for a densidade de preenchimento, maior será a resistência ao impacto do mesmo (RODRÍGUEZ-PANES; CLAVER; CAMACHO, 2018; SAMYKANO et al., 2019). Isso pode explicar a diferença no resultado obtido experimentalmente e nos resultados encontrados na literatura. Os valores de referência variam entre 5,10 e 21,51 KJ/m² em um estudo de 2019, variando diversos parâmetros de impressão e mantendo o valor de densidade de preenchimento constante, em 100% (HUANG et al., 2019). Enquanto isso, o valor encontrado experimentalmente no presente trabalho varia entre 2,00 e 2,82 KJ/m². Entretanto, o valor de densidade de preenchimento utilizado foi de apenas 8%.

6 CONCLUSÕES

O aumento da temperatura de impressão do ABS obtido por modelagem por deposição fundida resulta em uma leve diminuição na resistência ao impacto do material, ocasionado pelo início da degradação das cadeias poliméricas. A degradação do ABS se inicia nos monômeros de polibutadieno, que possuem em sua estrutura, carbonos insaturados. A elevação de temperatura favorece a quebra das ligações duplas e a formação de produtos de degradação, alterando a mobilidade das cadeias e a massa do polímero.

O aumento da temperatura de extrusão aumenta também, a fluidez do polímero, que acarreta em uma estrutura com maiores defeitos superficiais e maior concentração de vazios entre as camadas impressas, refletindo na queda da resistência ao impacto Izod do ABS.

A diminuição na resistência ao impacto do material na faixa de temperatura estudada não é suficiente para causar diferenças significativas nas propriedades mecânicas do ABS, uma vez que a perda de massa expressiva, suficiente para causar danos ao produto, só ocorre a faixas mais elevadas de temperatura.

A baixa densidade de preenchimento das amostras impressas levou a uma diminuição na resistência ao impacto do material, quando comparado com os valores utilizados como referência.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos a serem desenvolvidos a partir deste, recomenda-se que outras caracterizações sejam feitas, tais como FTIR e TGA, a fim de corroborar os resultados obtidos por meio dos ensaios de impacto. Outras propriedades mecânicas podem ser analisadas, como a resistência a tração e a resistência a flexão, por exemplo. Recomenda-se também, a variação de outros parâmetros de impressão para análise da influência nas propriedades do material e a influência da incorporação de cargas e outros polímeros no ABS.

REFERÊNCIAS

ALGARNI, M.; GHAZALI, S. Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. **Crystals**, v. 11, n. 8, p. 995, 21 ago. 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM D256 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**, In: Anual Book of ASTM Standards, 2018.

DUL, S.; FAMBRI, L.; PEGORETTI, A. Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 85, p. 181–191, 2016.

HARRIS, M.; POTGIETER, J.; RAY, S.; ARCHER, R.; ARIF, K. M. Acrylonitrile butadiene styrene and polypropylene blend with enhanced thermal and mechanical properties for fused filament fabrication. **Materials**, v. 12, n. 24, 2019.

HUANG, B.; MENG, S.; HE, H.; JIA, Y.; XU, Y.; HUANG, H. Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament. **Polymer Engineering & Science**, v. 59, n. 1, p. 120–128, jan. 2019.

KIM, S.; KOROLOVYCH, V. F.; MUHLBAUER, R. L.; TSUKRUK, V.V. 3D-printed polymer packing structures: Uniformity of morphology and mechanical properties via microprocessing conditions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 44, p. 1–14, 2020.

LI, K.; WU, W.; CHAI, S.; TANG, L.; LI, J.; LI, Y.; LIU, Q.; CHEN, L. Synthesis of functionalized copolymers and their compatibilization effects on acrylonitrile butadiene styrene/poly(butylene terephthalate) blends. **Polymer Engineering & Science**, v. 60, n. 12, p. 2967–2978, 14 dez. 2020.

LIU, G.; LIAO, Y.; MA, X. Thermal behavior of vehicle plastic blends contained acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) in pyrolysis using TG-FTIR. **Waste Management**, v. 61, p. 315–326, 2017.

MAZZANTI, V.; MALAGUTTI, L.; MOLLICA, F. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. **Polymers**, v. 11, n. 7, p. 1094, 28 jun. 2019.

MOSTAFAEI, A.; ELLIOT, A. M.; BARNES, J. E.; LI, F.; TAN, W.; CRAMER, C. L.; NANDWANA, P.; CHMIELUS, M. Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. **Progress in Materials Science**, v. 119, n. June 2020, p. 100707, jun. 2021.

OLIVERA, S.; MURALIDHARA, H. B.; VENKATESH, K.; GOPALAKRISHNA, K.; VIVEK, C. S. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 8, p. 3657–3674, 2016.

PEREIRA, F. C. **Caracterização do comportamento em fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

POTTER, P. M.; AL-ABED, S. R.; LAY, D.; LOMNICKI, S. M. VOC Emissions and Formation Mechanisms from Carbon Nanotube Composites during 3D Printing. **Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 8, p. 4364–4370, 2019.

RABELLO, M. S. **Estrutura e Propriedades de Polímeros**. 1. ed. Campina Grande: Ed. do Autor, 2021.

RAMIAN, J.; RAMIAN, J.; DZIOB, D. Thermal deformations of thermoplast during 3D printing: Warping in the case of ABS. **Materials**, v. 14, n. 22, 2021.

RAMLI, M. B.; NORDIN, M. N. A.; MASRIPAN, N. A. B.; MOHIDIN, N. A. Thermal degradation effects on the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) impact properties. **Proceedings of Mechanical Engineering Research Day**, n. May, p. 258–259, 2018.

RODRÍGUEZ-PANES, A.; CLAVER, J.; CAMACHO, A. The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1333, 1 ago. 2018.

ROSENZWEIG, D. H.; CARELLI, E.; STEFFEN, T.; JARZEM, P.; HAGLUND, L. 3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposustissue regeneration. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 7, p. 15118–15135, 2015.

SAMYKANO, M.; SELVAMANI, S. K.; KADIRGAMA, K.; NGUI, W. K.; KANAGARAK, G.; SUDHAKAR, K. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9–12, p. 2779–2796, 2019.

SOHEL, M. A.; MANDAL, A.; MONDAL, A.; PAN, S.; SENGUPTA, A. Thermal analysis of ABS/PA6 polymer blend using differential scanning calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 3, p. 1689–1695, 2017.

SOUZA, H. A. F. DE. **Avaliação do comportamento mecânico de polímero ABS na impressão 3D**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

SYRLYBAYEV, D.; ZHARYLKASSYN, B.; SEISEKULOVA, A.; AKHMETOV, M.; PERVEEN, A.; TALAMONA, D. Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1587, 14 maio 2021.

TIGANIS, B.; BURN, L. S.; DAVIS, P.; HILL, A. J. Thermal degradation of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends. **Polymer Degradation and Stability**, v. 76, n. 3, p. 425–434, jun. 2002.

TRAN, T. Q.; CANTURRI, C.; DENG, X.; THAM, C. L.; NG, F. L. Enhanced tensile strength of acrylonitrile butadiene styrene composite specimens fabricated by overheat fused filament fabrication printing. **Composites Part B: Engineering**, v. 235, n. February, 2022.

ZHANG, S.-U. Degradation Classification of 3D Printing Thermoplastics Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Artificial Neural Networks. **Applied Sciences**, v. 8, n. 8, p. 1224, 25 jul. 2018.