



Otimização de parâmetros para o processo de fabrico FDM

Lucas Carrazedo Nogueira da Costa (a57293)

Relatório final da unidade curricular de Projeto/Dissertação apresentado à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão** para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor João Eduardo P. C. Ribeiro
Professor Doutor Jorge Alberto de Madeiros Carvalho

Bragança, Portugal

Mai de 2024



Otimização de parâmetros para o processo de fabrico FDM

Lucas Carrazedo Nogueira da Costa (a57293)

Relatório final da unidade curricular de Projeto/Dissertação apresentado à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão** para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor João Eduardo P. C. Ribeiro
Professor Doutor Jorge Alberto de Madeiros Carvalho

Bragança, Portugal

Mai de 2024

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar meu agradecimento e gratidão à minha mãe, Carla, ao meu pai, Sidney, à minha avó, Salete, ao meu tio, Alessandro, aos meus irmãos, Matheus e Carol, e a minha prima, Alessandra cujo suporte e constante incentivo foram fundamentais para superar a saudade e a distância ao longo desta jornada. Sem o apoio de vocês, este momento não seria possível.

Aos meus orientadores, João Ribeiro do IPB e Jorge Carvalho do CEFET-RJ, agradeço por todo o apoio, pelo suporte essencial na realização deste trabalho, pelas valiosas dicas, pela dedicação e por confiarem em mim.

Aos meus amigos, tanto do Brasil, quanto de Portugal. Em especial ao Felipe, ao Lucas e ao Gustavo, que estiveram junto a mim durante esse percurso, a presença de vocês em meu dia-a-dia foi essencial para que eu conseguisse concluir esse trabalho.

Resumo

O processo de impressão 3D, atualmente, vem sendo muito utilizada, pois sua versatilidade permite que essa tecnologia seja aplicada em diversos setores. A correta seleção dos parâmetros de impressão 3D é muito importante para que se tenha uma boa qualidade no produto final, garantindo uma boa eficiência no processo. O objetivo deste trabalho é otimizar os parâmetros de impressão 3D, de dois materiais, PLA e PETG, para uma determinada qualidade final. Neste trabalho os parâmetros analisados foram a porcentagem de preenchimento, a espessura de camada, a temperatura de impressão e o tipo de preenchimento. As características estudadas foram as tensões de tração e de flexão. Para esta otimização foram utilizados três métodos. O método de Taguchi para a seleção das matrizes ortogonais que possibilitam o estudo dos fatores escolhidos com um número reduzido de experimentos, diminuindo tanto o custo quanto o tempo necessário para a realização dos testes. Para este trabalho, foi utilizada a matriz L16, com quatro parâmetros de dois níveis cada. O segundo método utilizado foi a Análise Relacional de Grey, que combina o resultado de várias respostas, neste caso, foram as respostas para os ensaios de tração e de flexão, em apenas um único valor, que é o Grau Relacional de Grey. Por último, foi utilizado o método de Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a porcentagem de influência de cada parâmetro nos resultados. A combinação ideal obtida para as análises realizadas foi: porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 215 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague para o PLA, e para o PETG a combinação foi a de porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 235 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague. As amostras que possuíam essa combinação de parâmetros possuíam o valor de Grau Relacional de Grey 54,84% maior do que a média, para o PLA, e 66,75%, para o PETG.

Palavras-chave: Impressão 3D, PLA, PETG, Taguchi, Grey, ANOVA.

Abstract

The 3D printing process, currently, has been widely used, because its versatility allows this technology to be applied in several sectors. The correct selection of 3D printing parameters is very important to have a good quality in the final product, ensuring good efficiency in the process. The objective of this work is to optimize the 3D printing parameters of two materials, PLA and PETG, for a certain final quality. In this work the parameters analyzed were the percentage of filling, the layer thickness, the printing temperature and the type of filling. The characteristics studied were the tensile and bending stresses. For this optimization, three methods were used. The Taguchi method for the selection of orthogonal matrices that allow the study of the factors chosen with a reduced number of experiments, reducing both the cost and the time required to perform the tests. For this work, the matrix L16 was used, with four parameters of two levels each. The second method used was the Grey Relational Analysis, which combines the result of several responses, in this case were the responses to the tensile and bending tests, in only one value, which is the Grey Relational Degree. Finally, the method of Analysis of Variance (ANOVA) was used to evaluate the percentage of influence of each parameter in the results. The ideal combination obtained for the analyzes was: percentage of 100% filling, printing temperature 215 °C, layer thickness of 0.1 mm and type of zig-zag filling for the PLA, and for the PETG the combination was the percentage of 100% filling, Printing temperature 235 °C, layer thickness of 0.1 mm and type of zig-zag filling. The samples that had this combination of parameters had the value of Relational Degree of Grey 54.84% higher than the average for PLA and 66.75% for PETG.

Keywords: 3D printing, PLA, PETG, Taguchi, Grey, ANOVA.

Sumário

Capítulo 1	1
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização dos capítulos	2
Capítulo 2	4
2 Fundamentos teóricos.....	4
2.1 Polímeros	4
2.1.1 PLA.....	5
2.1.2 PETG	6
2.1.3 Escolha do material para impressão 3D	7
2.2 Manufatura aditiva.....	8
2.2.1 Impressão 3D.....	8
2.2.1.1 Arquivo stl.	10
2.2.1.2 Orientação da peça.....	12
2.2.1.3 Vantagens da impressão 3D.....	12
2.2.1.4 <i>Warping</i> no processo de impressão	13
2.3 Tecnologias de impressão 3D	14
2.3.1 Modelagem por fusão e deposição	14
2.3.1.1 Parâmetros que influenciam o processo.....	15
2.3.1.2 Funcionamento do processo.....	19
2.3.1.3 Aplicações.....	20
2.4 Ensaio utilizados na caracterização das peças fabricadas por impressão 3D.....	21
2.4.1 Ensaio de tração.....	21
2.4.1.1 Procedimento do ensaio de tração	22

2.4.1.2	Propriedades obtidas a partir do ensaio de tração	22
2.4.1.2.1	Tensão de tração	23
2.4.1.2.2	Limite de resistência à tração	23
2.4.1.2.3	Deformação	23
2.4.1.2.4	Módulo de elasticidade.....	24
2.4.1.2.5	Tensão limite de escoamento	25
2.4.1.3	Normas utilizadas no ensaio de tração.....	26
2.4.2	Ensaio de flexão.....	27
2.4.2.1	Procedimento do ensaio de flexão	28
2.4.2.2	Propriedades obtidas a partir do ensaio de flexão.....	28
2.4.2.2.1	Resistência a flexão	28
2.4.2.2.2	Deformação	29
2.4.2.2.3	Módulo de elasticidade.....	29
2.4.2.3	Normas utilizadas no ensaio de flexão.....	30
2.5	Método Taguchi	30
2.5.1	Razão Sinal-Ruido	31
2.6	Análise relacional de grey.....	32
2.6.1	Normalização da razão sinal-ruído	33
2.6.2	Coefficiente Relacional de Grey	35
2.6.3	Grau Relacional de Grey (GRG)	35
2.7	Análise de variância (anova).....	36
Capítulo 3	.....	38
3	Ensaio experimentais	38
3.1	Aplicação inicial do teorema Taguchi	38
3.2	Fabrico dos espécimes	42
3.2.1	Fabrico dos espécimes de tração	42
3.2.2	Fabrico dos espécimes de flexão	43

3.3	Impressão dos espécimes	44
3.4	Estabilização dos espécimes	46
3.5	Ensaio	47
3.5.1	Ensaio de tração.....	47
3.5.2	Ensaio de flexão.....	49
Capítulo 4	.....	52
4	Resultados obtidos.....	52
4.1	Ensaio de tração	52
4.2	Ensaio de flexão	56
Capítulo 5	.....	61
5	Análise e discussão dos resultados.....	61
5.1	Método Taguchi.....	61
5.1.1	Razão sinal-ruído tração	61
5.1.1.1	Análise ANOVA tração	68
5.1.2	Razão sinal-ruído flexão.....	70
5.1.2.1	Análise ANOVA flexão.....	75
5.2	Análise relacional de Grey.....	77
5.2.1	Análise relacional de Grey PLA.....	77
5.2.1.1	Análise ANOVA PLA	83
5.2.2	Análise relacional de Grey PETG	85
5.2.2.1	Análise ANOVA PETG.....	89
Capítulo 6	.....	91
6	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	91
6.1	Conclusões	91
6.2	Propostas para trabalhos futuros	93
Referências bibliográficas	.....	94
Anexos	.....	98

Lista de figuras

Figura 1 - Classificação dos polímeros. Adaptado de [2]	4
Figura 2 - Etapas do processo de impressão 3D.....	9
Figura 3 - Espécime composto por 108 facetas.....	10
Figura 4 - Representação da altura do arco. Adaptado de [12]	11
Figura 5 - Tolerância angular. Adaptado de [12]	11
Figura 6 - Efeitos típicos de empenamento na impressão 3D. (a) pincushion e (b) curling. Adaptado de [15]	14
Figura 7 - Mesoestrutura de peças fabricadas em impressão 3D. Adaptado de [18].	16
Figura 8 - Padrões de impressão do software Ultimaker Cura. Adaptado de [20].....	17
Figura 9 - Densidades de preenchimento. Adaptado de [21].	18
Figura 10 - Padrões de preenchimento do software Ultimaker Cura. Adaptado de [21].	18
Figura 11 - Processo de impressão 3D. Adaptado de [24]	20
Figura 12 - Curva tensão x deformação para polímeros. Adaptado de [28].....	22
Figura 13 - Material com região de Hooke. Adaptado de [29].....	25
Figura 14 - Curva de tensão limite de escoamento. Adaptado de [29].....	26
Figura 15 - Modelo de teste de temperatura para PETG.	39
Figura 16 - Dimensões dos espécimes de ensaio de tração. Adaptado de ASTM D638 - 14 ..	42
Figura 17 - Espécime de tração segundo a norma ASTM D638-14.....	43
Figura 18 - Espécime de flexão segundo a norma ISO 178.	43
Figura 19 – Impressora ANET A8 Plus.....	44
Figura 20 - Espécimes de tração.....	46
Figura 21 - Espécimes de flexão.....	46
Figura 22 – Ensaio de tração em espécime de PLA.	48
Figura 23 - Espécimes após o ensaio de tração.	49
Figura 24 - Ensaio de flexão em espécime de PLA.....	50
Figura 25 - Espécimes após o ensaio de flexão.	51
Figura 26 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em PLA.....	54
Figura 27 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em PETG	56
Figura 28 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PLA	58
Figura 29 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PETG.....	60
Figura 30 - Valores médios de S/N para ensaios PLA	63

Figura 31 - Valores de tensão média para os ensaios PLA	64
Figura 32 - Valores médios de S/N para ensaios PETG.....	66
Figura 33 - Valores de tensão média para os ensaios PETG.....	67
Figura 34 - Valores médios de S/N para ensaios de PLA	71
Figura 35 - Valores de tensão média para os ensaios PLA	72
Figura 36 - Valores médios de S/N para ensaios PETG.....	74
Figura 37 - Valores de tensão média para os ensaios PETG.....	75
Figura 38 - Resposta da análise relacional de Grey.....	83
Figura 39 - Resposta da análise relacional de Grey.....	89

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros e níveis de impressão PLA.	39
Tabela 2 - Parâmetros e níveis de impressão PETG.....	39
Tabela 3 - Matriz ortogonal L16 de Taguchi.....	40
Tabela 4 - Matriz ortogonal de Taguchi para PLA.....	41
Tabela 5 - Matriz ortogonal de Taguchi para PETG.	41
Tabela 6 – Tensões de tração máximas e tensão média de cada amostra em PLA.	53
Tabela 7 - Tensões de tração máximas e tensão média de cada amostra em PETG	55
Tabela 8 - Tensões de flexão máximas e tensão média de cada amostra em PLA.....	57
Tabela 9 - Tensões de flexão máximas e tensão média de cada amostra em PETG.	59
Tabela 10 - Valores de S/N e de tensões médias para PLA.	62
Tabela 11 - Valores de S/N e de tensões médias para PETG.	65
Tabela 12 - Valores da ANOVA para ensaio de tração PLA.	68
Tabela 13 - Valores da ANOVA para ensaio de tração PETG.....	69
Tabela 14 - Valores de S/N e de tensões médias para PLA.	70
Tabela 15 - Valores de S/N e de tensões médias para PETG.....	73
Tabela 16 - Valores da ANOVA para ensaio de flexão PLA.....	76
Tabela 17 - Valores da ANOVA para ensaio de flexão PETG.	76
Tabela 18 - Valores da razão S/N para PLA.	78
Tabela 19 - Valores de S/N normalizados para ensaios PLA.....	79
Tabela 20 - Valores de $\bar{x}_i - x_{ij}$ para PLA.	80
Tabela 21 - Valores do coeficiente relacional de Grey para PLA.....	81
Tabela 22 - Valores para o Grau relacional de Grey para PLA.....	82
Tabela 23 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.....	82
Tabela 24 - Valores da ANOVA da análise relacional de Grey para PLA.	84
Tabela 25 - Valores da razão S/N para PETG.	85
Tabela 26 - Valores de S/N normalizados para ensaios PETG.	86
Tabela 27 - Valores de $\bar{x}_i - x_{ij}$ para PETG.....	87
Tabela 28 - Valores do coeficiente relacional de Grey para PETG.....	87
Tabela 29 - Valores para o Grau relacional de Grey para PETG.	88
Tabela 30 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.....	88
Tabela 31 - Valores da ANOVA da análise relacional de Grey para PETG.	90

Lista de abreviações

3D	Tridimensional.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (Acrilonitrila Butadieno Estireno).
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância).
ARG	Análise Relacional de Grey.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais).
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador).
DIY	<i>Do It Yourself</i> (Faça Você Mesmo).
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização).
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Projeto de Experimentos).
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança
FABLAB	<i>Fabrication Laboratory</i> (Laboratório de Fabricação).
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Deposição Fundida).
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> (Fabricação de Filamento Fundido).
GL	Graus de Liberdade.
GRG	Grau Relacional de Grey.
IPB	Instituto Politécnico de Bragança.
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional de Química Pura e Aplicada).
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização).
PC	<i>Polycarbonate</i> (Policarbonato).

PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i> (Tereftalato de Polietileno).
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> (Tereftalato de Polietileno Glicol).
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Poliláctico).
PPE	<i>Polyphenylene Ether</i> (Éter de Polifenileno).
pH	Potencial de Hidrogênio.
QM	Média dos Quadrados.
SLA	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia).
S/N	<i>Signal-to-Noise</i> (Sinal-Ruído)
SQ	Soma dos Quadrados
STL	<i>STereoLithography</i> (formato de arquivo para impressão 3D).

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A utilização dos processos de fabricação aditiva, também conhecido como impressão 3D, está se expandindo cada vez mais mundialmente, tanto para consumidores finais, promovendo o conceito de Faça Você Mesmo (*DIY*), quanto para grandes corporações. Um exemplo notável é a parceria entre a *New Balance* e a *Formlabs*, uma empresa líder no setor de impressão 3D, que desenvolveram uma resina inovadora denominada *Rebound Resin*, destinada a ser usada nas solas de calçados esportivos. Não apenas empresas de calçados, mas também aquelas dos setores automotivo, aeroespacial, médico, entre outros, têm demonstrado interesse crescente nessa nova tecnologia. A fabricação aditiva é particularmente vantajosa quando há necessidade de alta complexidade, originalidade e precisão.

Embora seja altamente conveniente para a gestão de projetos, abrangendo desde o planejamento até as etapas de execução e conclusão, é essencial possuir um conhecimento mínimo sobre as tecnologias predominantes, os parâmetros que influenciam na fabricação e no acabamento das peças, e outros fatores relevantes.

Existem diversas tecnologias disponíveis no campo da fabricação aditiva, porém os recursos laboratoriais são limitados. Por conseguinte, optou-se por abordar as tecnologias mais difundidas no meio acadêmico, como FDM (*Fused Deposition Modeling*) e SLA (*Stereolithography Apparatus*), além de trabalhar com dois materiais poliméricos (PLA e PETG).

1.1 ENQUADRAMENTO

O emprego da tecnologia de impressão 3D está em constante ascensão globalmente, sendo aplicada em uma ampla gama de setores, desde o culinário até o aeroespacial,

viabilizando a criação de projetos únicos. Portanto, um exame detalhado das tecnologias mais prevalentes, aliado ao entendimento dos parâmetros de fabricação, desempenha um papel fundamental na otimização dos processos e, por conseguinte, na aprimoração da qualidade das peças produzidas.

Com o crescimento significativo no uso da tecnologia de impressão 3D, torna-se imperativo realizar um estudo das propriedades mecânicas das peças fabricadas por esses métodos, visando descobrir aplicações mais eficazes e diversas para esses materiais. Diante dessas considerações, os tópicos selecionados para esta dissertação são os elucidados abaixo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é determinar a combinação ótima para maximizar a resistência mecânica de elementos fabricados por FDM. Para alcançar esse objetivo, foram empregados dois métodos de otimização distintos: o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey, além da análise de variância (ANOVA).

No Método de Taguchi, são definidos os parâmetros de impressão e seus respectivos níveis, além de ser estabelecida uma matriz ortogonal para indicar as combinações a serem testadas experimentalmente. Por meio da Análise Relacional de Grey, os valores obtidos no Método de Taguchi são utilizados, e com base na importância atribuída aos fatores em estudo (tensão de tração e tensão de flexão), é possível determinar a melhor combinação de parâmetros.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda a justificativa para a escolha do tema e delinea os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo, são apresentadas revisões bibliográficas sobre o método de impressão 3D utilizado, FDM, bem como uma análise dos polímeros utilizados neste estudo, PLA (poliácido láctico) e PETG (Polietileno tereftalato glicol). Além disso, são discutidos os

fundamentos teóricos dos ensaios mecânicos de tração e de flexão. E, por fim, os métodos de otimização utilizados no trabalho, o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey.

No terceiro capítulo, é detalhada a configuração experimental adotada e descritos os ensaios conduzidos ao longo deste estudo utilizando o método de Taguchi.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados de cada ensaio experimental referentes à tensão de tração e à tensão de flexão de cada ensaio realizado.

O quinto capítulo, é destinado à análise dos resultados obtidos, acompanhado por breves considerações sobre os mesmos.

O sexto capítulo trata das conclusões gerais deste estudo, juntamente com algumas sugestões para direções futuras de pesquisa.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, serão expostos alguns conceitos teóricos que são considerados fundamentais para uma compreensão aprofundada do estudo realizado, juntamente com uma descrição detalhada da metodologia de Taguchi, Análise Relacional de Grey e da Análise de Variância (ANOVA).

2.1 POLÍMEROS

De acordo com a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) [1], um polímero é uma substância formada por macromoléculas, e sua caracterização é notadamente complexa. Por isso, uma hierarquia simplificada é apresentada abaixo na Figura 1, levando em consideração os comportamentos térmicos e mecânicos de cada material. A análise do comportamento mecânico é baseada na resistência às deformações mecânicas, enquanto o comportamento térmico é avaliado com base no desempenho do material quando exposto ao calor.

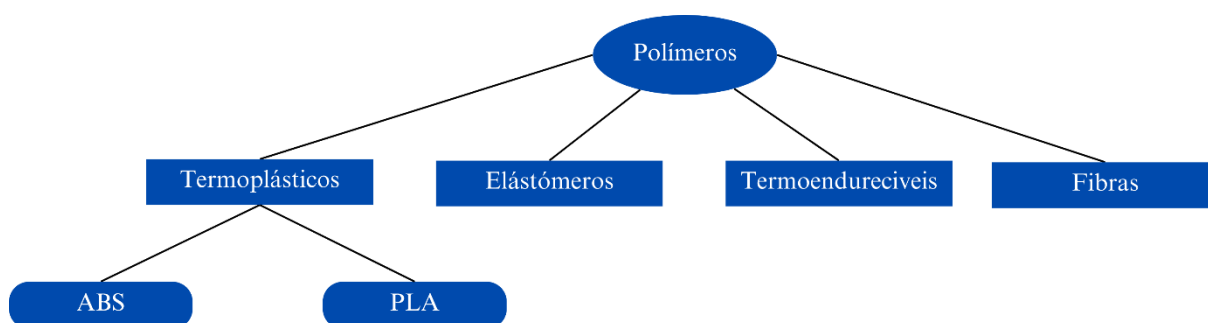


Figura 1 - Classificação dos polímeros. Adaptado de [2]

Na Figura 1, o termo "termoplástico", de maneira simplificada, se refere a materiais que, quando são aquecidos, amolecem e se tornam maleáveis, permitindo que sejam moldados na

forma desejada. Por outro lado, os "termofixos" (também designados por termorrígidos ou termoendurecíveis) são materiais que, após serem curados, não se fundem novamente e permanecem altamente estáveis em diferentes faixas de temperatura. Quando submetidos a reaquecimento, esses materiais se degradam antes de derreterem e não são passíveis de reciclagem. Os "elastômeros", por sua vez, são materiais altamente flexíveis que têm a capacidade de retornar à sua forma original após serem submetidos a pressão ou carga intensa. Quanto às fibras, estas podem ser classificadas em naturais, sintéticas (anteriormente conhecidas como artificiais) e mistas, obedecendo à condição de que o comprimento seja pelo menos cem vezes maior do que o diâmetro [3].

Este estudo se dedica aos polímeros PLA e PETG, os quais são os materiais empregados tanto na parte teórica quanto na prática do projeto. A seleção de um material é influenciada pelas características específicas exigidas pelo projeto em questão. Neste caso, o PETG e o PLA foram escolhidos devido à disponibilidade desses polímeros no *FabLab* do Instituto Politécnico de Bragança, em Portugal. As propriedades desses polímeros serão apresentadas a seguir.

2.1.1 PLA

O mercado de polímeros está em crescimento contínuo, resultando em um aumento no consumo desses materiais e na geração de um grande volume de resíduos, os quais tendem a se acumular em locais inadequados, provocando problemas ambientais em escala mundial. Como resposta a essa preocupação, há uma crescente busca pela produção de polímeros menos prejudiciais ao meio ambiente. Entre esses materiais, se destaca o Poliacido Láctico, conhecido como PLA, um polímero biodegradável.

O PLA é um termoplástico sintético biodegradável, que se decompõe em um período de seis meses a dois anos quando descartado corretamente em compostagens com as condições adequadas de luz, humidade, temperatura e presença de microrganismos. Além disso, é reciclável e biocompatível quando em contato com tecidos vivos. Também é bioabsorvível, o que significa que sua degradação no corpo humano resulta na diminuição do pH das células e/ou tecidos, podendo causar um acúmulo de ácido láctico na região e, em alguns casos, desencadear processos inflamatórios [4], [5].

O PLA é fabricado a partir do ácido lático, que é produzido por meio da fermentação de vegetais ricos em amido, como beterraba, milho, trigo e batata. Uma distinção fundamental entre o PLA e o plástico de amido reside no fato de que o PLA utiliza o amido como precursor para o ácido lático, enquanto o outro utiliza o amido como seu material principal [6].

O PLA tem uma ampla gama de aplicações em diversos setores, como embalagens alimentícias e cosméticas, sacolas de mercado, garrafas, pratos, filamentos para impressão 3D e dispositivos médicos. No campo médico, é utilizado em implantes de tecidos, enxertos ósseos e artefatos para fixação de fraturas, pois não é necessário remover o plástico do corpo hospedeiro após a degradação [7].

Em comparação com os polímeros derivados de fontes fósseis, o PLA possui propriedades mecânicas comparáveis, destacando-se pela alta rigidez, transparência e capacidade de moldagem. No entanto, uma das desvantagens do PLA é sua baixa resistência ao impacto e a temperaturas elevadas. Para contornar esse problema, são utilizados plastificantes orgânicos, como glicerol e sorbitol, para aumentar a flexibilidade do material. Além disso, em alguns casos, são adicionadas fibras naturais ou realizadas blendas, que são misturas mecânicas de diferentes plásticos que não reagem quimicamente entre si, visando melhorar essas características.

O filamento de PLA é preferencialmente utilizado na impressão 3D devido à sua facilidade de uso, proporcionada pela sua baixa temperatura de fusão, aproximadamente 180 °C, além de garantir um acabamento de alta qualidade e não requerer uma base aquecida. Em impressões de peças de grande porte, o PLA apresenta uma contração mínima, o que evita o efeito de *warping* (empenamento causado pela contração).

2.1.2 PETG

O PET, um polímero semicristalino, é amplamente produzido e usado em todo o mundo [8]. É empregado na fabricação de garrafas plásticas descartáveis, embalagens flexíveis para alimentos e eletrônicos, bem como em alguns tecidos, entre outras aplicações. Como um plástico de engenharia, o PET exibe propriedades vantajosas, incluindo uma temperatura de transição vítrea (T_g) em torno de 67°C e uma resistência à tração da ordem de 50 MPa [9]. O copolímero poli(etilenotereftalato) glicol (PETG), frequentemente utilizado na fabricação

aditiva, possui uma T_g mais elevada que o PET, mas apresenta propriedades mecânicas semelhantes [8]. No entanto, o PETG possui uma temperatura de fusão e viscosidade mais baixas em comparação com o PET, com o grupo glicol sendo responsável pela sua estrutura amorfa. Essas características tornam o PETG um material polimérico mais versátil para aplicações em FDM [10].

Como um filamento de impressão 3D, o PETG é frequentemente considerado um meio termo entre ABS e PLA [10]. Um dos primeiros filamentos de impressão 3D a ser comercializado, o ABS é caracterizado pela força de alto impacto, mas exibe problemas de deformação e emite fumos tóxicos durante a sua impressão. PLA, por outro lado, exibe facilidade de impressão. Embora um bioplástico, o PLA é um pouco frágil e pode deformar-se facilmente com o calor. Como um filamento de impressão 3D, o PETG tem sido menos utilizado por adeptos do movimento *DIY* em comparação com PLA e ABS. Isso ocorre, provavelmente, devido a facilidade de impressão do PLA e das opções de pós-processamento de ABS. O custo do PETG, que é maior do que o PLA e o ABS, o que também gera a baixa utilização desse material. O uso do PETG na impressão 3D pode preencher a lacuna entre o PLA e o ABS, pois sua forma de filamento produz impressões fortes com mínimo ou nenhum empenamento (*warping*) e sem emitir fumaça tóxica. Além disso, PETG também é relativamente resistente ao calor, menos quebradiço, e apresenta melhor alongamento na ruptura do que o PLA [11]. O PETG, no entanto, tem alguns problemas próprios, incluindo tendência a formar fios (*strings*) e vazar durante o processo de impressão.

2.1.3 Escolha do material para impressão 3D

Para a seleção adequada de um material, é essencial considerar sua aplicação após a fabricação, levando em conta as condições de exposição, temperaturas e se a peça estará em contato com algum reagente. Ao ponderar sobre esses parâmetros e outros relevantes para o projeto, é possível determinar o material que oferece o melhor custo-benefício para a impressão.

Além disso, é importante considerar as características da impressora disponível. Por exemplo, materiais como o PETG tendem a evitar defeitos quando impressos em mesas aquecidas a temperaturas mais altas. Por outro lado, materiais como o PLA podem ser utilizados

tanto em máquinas abertas quanto fechadas, assim como o PETG, mas podem ser impressos em mesas com temperaturas menores.

Frequentemente, a peça impressa substituirá outra que anteriormente era construída com outro material. Portanto, é crucial compreender as propriedades mecânicas e químicas do material utilizado anteriormente, incluindo a absorção de água e óleos, bem como a resistência a solventes. Dessa forma, é possível escolher um material que seja imprimível e apresente características o mais semelhantes possível às do material substituído

2.2 MANUFATURA ADITIVA

O termo "prototipagem rápida" (*RP*) é empregado para descrever a capacidade de construir objetos tridimensionais em um período de tempo reduzido, utilizando a técnica de adicionar camadas finas de material de forma sucessiva. Esse processo contrasta com os métodos tradicionais de fabricação, nos quais a criação de modelos geralmente envolve a remoção (manufatura subtrativa) ou a modificação do material [12]. A impressão 3D, também conhecida como manufatura ou fabricação aditiva, representa um avanço significativo nesse campo, permitindo a criação de objetos tridimensionais por meio da deposição controlada de material em camadas sucessivas até a formação da estrutura desejada.

Este método de fabricação não apenas se destina à prototipagem de produtos, mas também pode ser aplicado na sua produção final. Além disso, não requer a utilização de ferramentas personalizadas, como moldes para fundição, ou movimentos específicos de ferramentas. A peça é fabricada diretamente a partir de um modelo digital 3D, elaborado por meio de software CAD (*Computer-Aided Design*).

2.2.1 Impressão 3D

As diversas modalidades de impressão 3D se distinguem umas das outras pelos materiais e técnicas empregados na construção das camadas. Apesar dessas variações, os processos básicos são comuns a todas elas, conforme ilustrado na Figura 2.

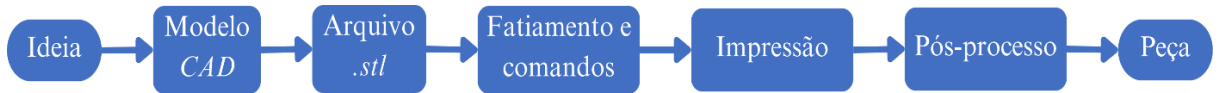


Figura 2 - Etapas do processo de impressão 3D.

- I. Inicia-se com a concepção e criação de um modelo 3D da peça desejada usando um software de modelagem CAD (*Computer-Aided Design*), onde são definidas as dimensões desejadas. Exemplos de softwares incluem *SolidWorks* e *Autodesk Inventor* para aplicações profissionais, e *Google SketchUp* para uso particular. Atualmente, alguns aplicativos empregam *Scanners 3D* para agilizar o processo de modelagem;
- II. O arquivo CAD é então convertido para uma extensão específica, geralmente *.stl*, para ser enviado à impressora 3D (conforme seção 2.2.1.1);
- III. Em seguida, o arquivo é enviado para a impressora 3D e passa pelo processo de fatiamento, onde é gerado um arquivo em código G. Nesse estágio, o usuário define a localização e a orientação ideal da peça na máquina (conforme seção 2.2.1.2). Durante o fatiamento, os parâmetros de impressão, preenchimento e estruturas de suporte (se necessárias) são configurados;
- IV. O *software* da impressora 3D recebe as instruções e inicia a fabricação do objeto, construindo-o camada por camada. Esse processo varia de acordo com a técnica de manufatura aditiva utilizada, assim como o material empregado, que pode ser polímero, papel ou compósito, dependendo do método. Geralmente, a precisão da peça e o acabamento superficial são aprimorados quanto menor for a espessura das camadas;
- V. Após a conclusão do processo de impressão, as partes e os suportes, caso tenham sido utilizados, são removidos da máquina. No caso de resinas, elas são curadas. Os materiais plásticos, metais e resinas podem passar por um pós-processamento, como polimento ou pintura, para obter diferentes acabamentos.

2.2.1.1 Arquivo stl.

Esse tipo de arquivo reconstrói a superfície do desenho utilizando múltiplos triângulos (facetas), porém não inclui informações de textura ou cores. Na fase de fatiamento, atua como uma ligação entre o computador e a impressora 3D, conforme ilustrado na Figura 3.

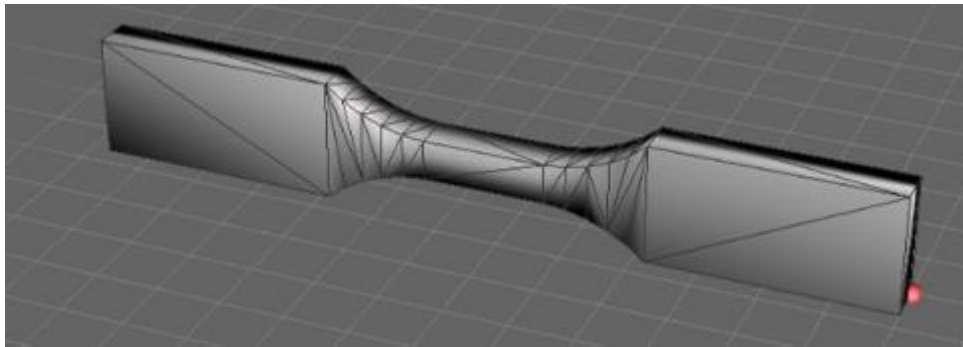


Figura 3 - Espécime composto por 108 facetas.

".stl" é uma abreviação de "*Standard Triangle Language*" [13] ou uma abreviação de "*Stereolithography*", conforme descrito por Chua et al. (2003) [12]. Quando se busca aumentar a resolução, são utilizados mais triângulos, porém menores, enquanto para uma resolução menor, são empregados menos triângulos, porém maiores. É fundamental determinar a melhor resolução para a peça, pois uma resolução excessivamente alta pode resultar em custos elevados, além de algumas impressoras não serem capazes de imprimir com tal precisão, enquanto uma resolução muito baixa pode não representar adequadamente o objeto desenhado no programa CAD.

Dois parâmetros são comuns a todos os *softwares* de desenho ao especificar a resolução do arquivo .stl. Esses parâmetros são [13]:

Chord Height, ou altura do arco: regula o desvio entre os triângulos presentes no arquivo .stl e a superfície original do desenho. Quanto menor for essa distância, maior será a precisão da curvatura do desenho, conforme ilustrado na Figura 4.

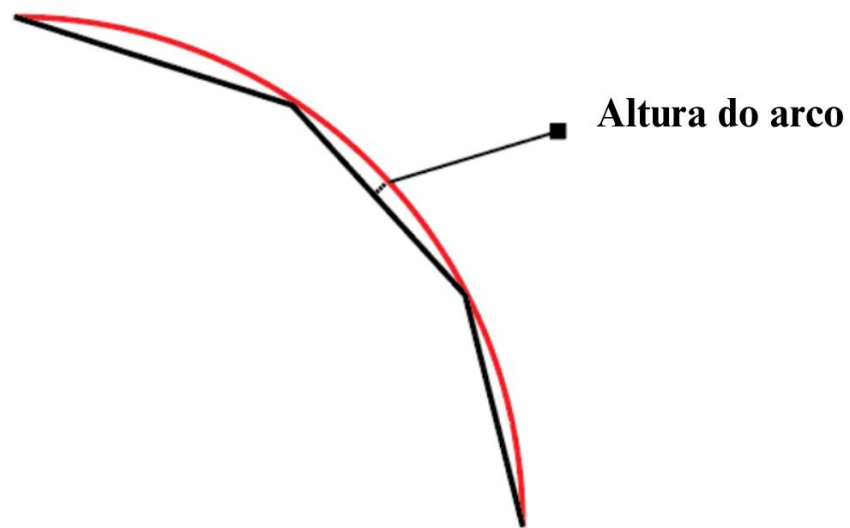


Figura 4 - Representação da altura do arco. Adaptado de [13]

Angular Tolerance, ou tolerância angular: estabelece o limite para o ângulo entre triângulos adjacentes. O valor padrão geralmente é de 15° (ou 0°), porém esse valor pode ser ajustado caso seja necessário obter uma superfície mais suave, conforme representado na Figura 5.

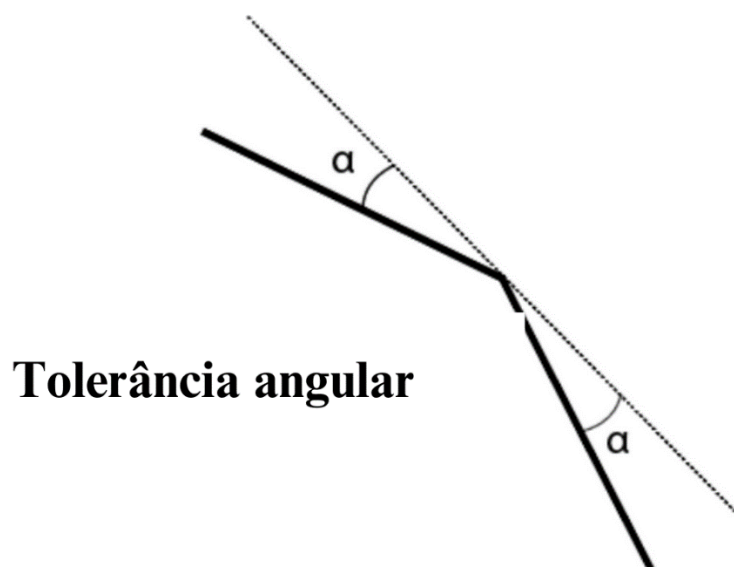


Figura 5 - Tolerância angular. Adaptado de [13]

O uso do arquivo .stl simplifica a representação do modelo 3D CAD e já se tornou um padrão amplamente adotado em muitos sistemas de prototipagem rápida (ou fabricação aditiva).

2.2.1.2 Orientação da peça

Refere-se à rotação da peça na base de impressão em relação aos eixos do sistema de coordenadas da máquina. A orientação da peça tem um impacto direto em características que afetam a qualidade final do objeto, incluindo a precisão, o tempo de impressão, a resistência e a necessidade de suportes.

Dependendo do formato da peça, uma orientação horizontal ou vertical pode ser preferível. Por exemplo, na construção de um cilindro, quando este é impresso com orientação vertical, as camadas são dispostas de forma concêntrica, resultando em uma superfície suave. No entanto, quando uma orientação horizontal é selecionada, o cilindro é construído com uma série de retângulos empilhados, o que pode resultar em variações mínimas nas dimensões. Nesse caso, a superfície do objeto que entra em contato com a base de impressão fica achatada, o que pode diminuir a qualidade da impressão [14].

Ao encontrar uma orientação de impressão que reduza o número de camadas necessárias, também é possível diminuir o tempo total de impressão. Esse impacto pode variar consideravelmente em peças maiores.

Além disso, a orientação de construção da peça desempenha um papel significativo na sua resistência quando se trata do processo FDM, uma vez que as peças produzidas por esse método são anisotrópicas.

Uma seleção adequada da orientação de construção das peças reduz a necessidade de suportes adicionais, o que é vantajoso, uma vez que esses suportes aumentam o tempo e os custos de impressão.

2.2.1.3 Vantagens da impressão 3D

Comparado aos métodos tradicionais de fabricação [15]:

- I. Existe uma redução significativa no desperdício de material, uma vez que apenas o material necessário é utilizado na criação das peças. O desperdício é minimizado nos suportes das peças, onde são necessários.

- II. Permite a produção de geometrias complexas e detalhes internos e ocultos que são incorporados durante a fabricação da peça.
- III. Facilita a personalização dos projetos, tornando mais fácil adaptar o produto às necessidades individuais dos usuários, uma vez que não são necessárias ferramentas especiais. Devido a essas características, essas técnicas de fabricação são amplamente empregadas em setores como a indústria médica e odontológica, na fabricação de próteses, implantes e aparelhos dentários.
- IV. Possibilita a fabricação em uma única etapa: em processos convencionais, várias etapas de fabricação são necessárias para obter o produto final. A ordem desses passos influencia significativamente a qualidade final e a facilidade de fabricação do produto. Por outro lado, na impressão 3D, tudo é realizado em um único processo, sem a necessidade de intervenção do operador durante a fabricação do componente, reduzindo a dependência de diversos processos de fabricação, como usinagem, soldagem e pintura. Isso proporciona ao projetista um maior controle sobre o produto final.

Apesar das vantagens significativas, a impressão 3D ainda não é um método que pode substituir completamente os processos convencionais em todas as aplicações. Para peças de grande porte, o tempo de construção pode ser significativamente mais longo, especialmente à medida que aumenta o número de camadas. Em produções em grande escala, a impressão 3D não se compara à fundição, um exemplo de processo convencional, devido ao custo relativamente baixo dos moldes em comparação com o número de vezes que podem ser utilizados. Portanto, a impressão 3D é considerada a melhor escolha quando se deseja fabricar apenas uma ou poucas peças, ou quando a geometria da peça é tão complexa que outros processos de fabricação são inviáveis, enquanto os processos convencionais se tornam mais econômicos à medida que o volume de produção aumenta.

2.2.1.4 *Warping* no processo de impressão

O *Warping* é a contração não uniforme dos materiais durante a solidificação durante a construção em camadas nas tecnologias 3D. Suas principais causas incluem os diferentes

tempos de solidificação das camadas e as influências da geometria da peça [16]. Como resultado, ocorrem alterações nas dimensões da peça.

Devido à solidificação ocorrer primeiro na superfície das peças em comparação com as partes internas, isso resulta numa contração dos planos laterais, causando o efeito de "*pincushion*", conforme ilustrado na Figura 6a.

O *Curling* é um tipo de *warping* causado pelos diferentes alongamentos das camadas da peça devido aos diferentes tempos de solidificação, geralmente ocorrendo nos cantos dos objetos, como mostrado na Figura 6b.



Figura 6 - Efeitos típicos de empenamento na impressão 3D. (a) pincushion e (b) curling. Adaptado de [16]

2.3 TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D

Existem diversas técnicas utilizadas na fabricação de peças por meio da impressão 3D, e não há uma técnica ideal universal. A escolha depende dos materiais utilizados, das propriedades mecânicas e estéticas necessárias para o protótipo, dos custos envolvidos no processo e dos prazos para a construção. A seguir, será apresentado o processo de modelagem por fusão e deposição, que é a técnica utilizada nesse estudo.

2.3.1 Modelagem por fusão e deposição

Tecnologia FDM, em inglês *Fused Deposition Modeling*. Esta tecnologia foi patenteada e desenvolvida por Scott Crump, fundador da *Stratasys*, por volta dos anos 80, tornando-a uma

das maiores empresas de tecnologia FDM do mundo [17]. As impressoras baseadas na tecnologia FDM são amplamente reconhecidas devido ao seu custo mais acessível e à capacidade de construir protótipos de forma mais rápida e econômica, utilizando materiais como termoplásticos, incluindo ABS, PLA, PETG, PPE, PC e elastômeros. O processo de impressão ocorre através da extrusão e deposição do material fundido por meio de um cabeçote extrusor de filamentos.

Nesse processo as peças são fabricadas camada por camada. A tecnologia FDM, também conhecida como FFF (*Fused Filament Fabrication*), deposita material em toda a área da camada, uma vez que essa camada esteja completa, se inicia o processo de deposição da próxima cama e assim sucessivamente. A sigla FFF é utilizada para descrever a mesma tecnologia, uma vez que a sigla FDM é uma marca registrada da *Stratasys* mencionada anteriormente.

2.3.1.1 Parâmetros que influenciam o processo

Para realizar a impressão de um objeto utilizando a tecnologia FDM, é necessário definir uma série de parâmetros, pois eles exercem influência direta na qualidade final do produto, incluindo o aspecto da superfície e as propriedades mecânicas. Alguns desses parâmetros incluem: espessura das camadas, uso de suportes, porcentagem de preenchimento, tipo de preenchimento e temperatura de impressão, os quais serão detalhados a seguir.

- Espessura das camadas

As camadas desempenham um papel crucial na determinação da resistência das peças impressas. Na fabricação por impressão 3D, os objetos são construídos camada por camada, resultando em uma estrutura composta por vazios e ligações entre os filamentos depositados, tanto dentro das camadas quanto entre elas. O tamanho, forma e área de contato entre os filamentos influenciam na anisotropia (conforme mostrado na Figura 7), afetando diretamente as propriedades mecânicas, como resistência à tração, compressão e flexão [18], [19].

De acordo com Cho et al. (2019) [18], a resistência mecânica do objeto aumenta com o aumento da espessura das camadas. Por outro lado, Hibbert et al. (2019) [20] observaram que uma menor espessura das camadas resulta em melhores propriedades de resistência à tração, limite de escoamento e tenacidade.

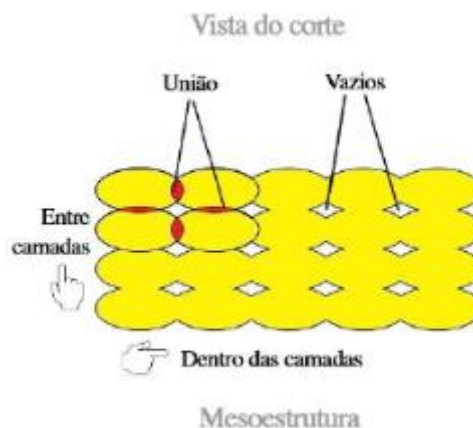


Figura 7 - Mesoestrutura de peças fabricadas em impressão 3D. Adaptado de [19].

Em estudos realizados por Rajpurohit et al. (2018) e Christiyan (2016), observou-se que a espessura das camadas desempenha um papel significativo. Uma maior espessura das camadas resulta em uma redução na resistência à flexão, pois uma espessura menor proporciona uma melhor adesão entre as camadas.

Além disso, a altura das camadas também afeta o acabamento das superfícies. Camadas mais finas resultam em superfícies mais suaves e uma melhor reprodução de geometrias curvas, embora isso leve a um aumento no tempo de impressão. Por outro lado, camadas mais espessas resultam em superfícies menos suaves, porém reduzem o tempo de impressão.

- Suportes

Como os suportes deixam marcas na peça impressa, foi desenvolvida uma alternativa para removê-los. Essa abordagem envolve o uso de suportes feitos de material solúvel, que podem ser colocados em uma solução para dissolver-se, deixando apenas o material principal que forma a peça. Essa técnica resulta em um acabamento superficial aprimorado, pois não há marcas deixadas pela remoção dos suportes. No entanto, isso aumenta o custo do produto, pois requer o uso de uma impressora com dois bocais e um material diferente do utilizado na peça principal.

Na tecnologia FDM, são empregados diferentes tipos de suportes com padrões variados, dependendo das necessidades específicas, como a quantidade de material desejada ou tempos de impressão mais curtos. A Figura 8 ilustra exemplos de padrões de suportes utilizados pelo software *Ultimaker Cura*.

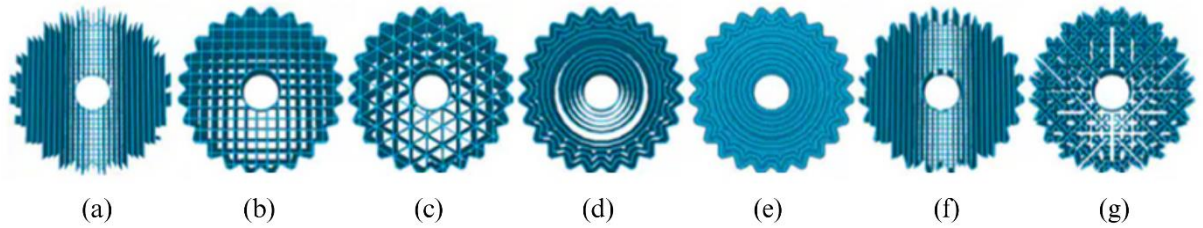


Figura 8 - Padrões de impressão do software Ultimaker Cura. Adaptado de [21].

- Preenchimento

O preenchimento, como o próprio nome sugere, refere-se à porcentagem de material preenchendo o interior durante a fabricação da peça, juntamente com os padrões de preenchimento. Esse parâmetro tem um impacto direto no desempenho do objeto. Peças mais robustas geralmente têm uma maior porcentagem de preenchimento, que varia de 0% para peças ocas a 100% para peças totalmente preenchidas.

Um estudo realizado por Hibbert et al. (2019) comparou uma alta porcentagem de preenchimento com 100% de preenchimento e demonstrou um aumento nos valores de várias propriedades mecânicas, como limite de escoamento, resistência à tração e tenacidade, à medida que a quantidade de preenchimento é aumentada. O autor sugere que um preenchimento sólido (100%) pode suportar maiores tensões devido à sua estrutura mais densa e maior área transversal efetiva, em comparação com uma alta porcentagem de preenchimento.

É importante observar que um protótipo visual pode ter uma porcentagem pequena de preenchimento, já que não requer resistência, enquanto um protótipo funcional pode exigir uma maior quantidade de preenchimento. Quanto menor a porcentagem de preenchimento, mais econômica e rápida é a fabricação da peça. A Figura 9 ilustra uma imagem com diferentes porcentagens de preenchimento, no caso desse estudo foram utilizados 25% e 100% de preenchimento, e a Figura 10 ilustra os tipos de preenchimento fornecidos pelo *software Ultimaker cura*, nesse estudo foram utilizados o preenchimento triangular e zigue-zague, Figura 10c e Figura 10i, respectivamente.

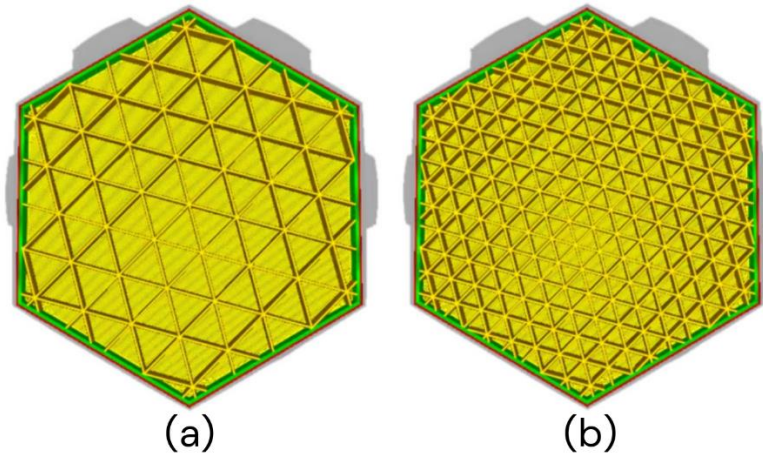


Figura 9 - Densidades de preenchimento. Adaptado de [22].

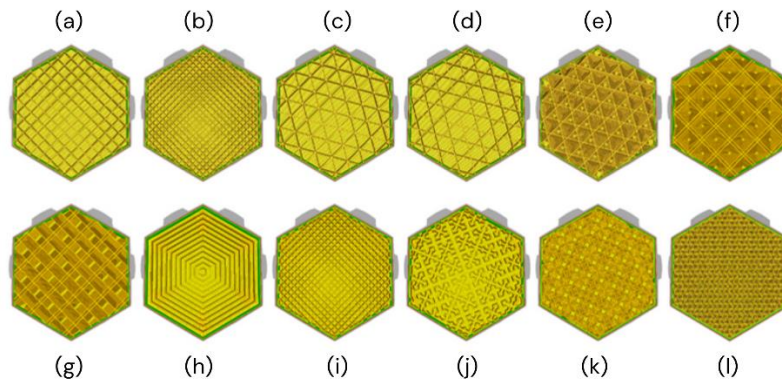


Figura 10 - Padrões de preenchimento do software Ultimaker Cura. Adaptado de [22].

Cada padrão de preenchimento é concebido com diferentes formatos por motivos específicos, sendo a resistência mecânica que eles conferem à peça um dos principais fatores considerados. Um estudo realizado por Cho et al. (2019) [23] investigou três padrões de preenchimento (triangular, zigue-zague e em rede) e sua influência na resistência mecânica de uma peça construída com PLA por meio da impressão 3D. Concluiu-se que, entre os três padrões, o triangular oferece a maior resistência mecânica, além de um menor consumo de filamento, enquanto o padrão zigue-zague proporciona a menor resistência.

- Temperatura de impressão

A temperatura do bocal extrusor é um parâmetro crucial na impressão 3D. Quando a temperatura é muito baixa, o filamento não flui de maneira adequada, resultando em lacunas entre as camadas, o que pode facilitar a separação delas e causar má adesão da peça à mesa. Por

outro lado, quando a temperatura é muito alta, pode danificar o filamento, tornando a peça impressa frágil.

Um estudo conduzido por Behzadnasab e Yousefi (2016) [24] examinou o efeito da temperatura do bocal extrusor no PLA. Eles observaram que aumentar a temperatura para aproximadamente 240°C resultou em um aumento no módulo de Young e uma redução na viscosidade do material. Isso promove uma melhor difusão entre as camadas anteriores e as novas camadas de PLA extrudadas, resultando em uma melhor adesão entre elas.

2.3.1.2 Funcionamento do processo

Inicialmente, a máquina é carregada com um carretel de filamento termoplástico, o material utilizado na fabricação da peça, conhecido como carretel de material de construção. Em seguida, o programa da máquina recebe o arquivo digital contendo o desenho da peça a ser fabricada e envia o comando para a impressora. Quando os bocais do cabeçote extrusor, também chamados de bocais de extrusão, atingem a temperatura desejada, o cabeçote começa a desenrolar o filamento para fundi-lo e depositá-lo na base de impressão, ao mesmo tempo em que se move nos eixos X, Y e, por vezes, no eixo Z, formando uma camada de termoplástico com o formato da geometria transversal da peça. Esse termoplástico então esfria e solidifica, podendo-se utilizar ventiladores para acelerar o processo. São necessários vários passes para preencher uma área e, assim que ela é concluída, a base de impressão desce uma distância correspondente à espessura de uma camada, ou o cabeçote extrusor sobe uma altura correspondente a uma camada, adicionando mais uma camada de material, e assim sucessivamente, até que a peça esteja completa.

Algumas máquinas utilizam pastilhas de material em vez de filamentos, as quais são alimentadas por meio de pirâmides invertidas [25]. O processo de fabricação é realizado da mesma maneira que com filamentos: após a construção de uma camada, o cabeçote se levanta até uma altura correspondente à espessura da camada, e o processo se repete até que o formato do objeto desejado seja alcançado. Os filamentos são fundidos por meio de aquecedores resistivos, conhecidos como *liquifiers*, facilitando a passagem do material pelo bocal [25]. Após a conclusão da fabricação, a peça é deixada para esfriar e endurecer, Figura 11.

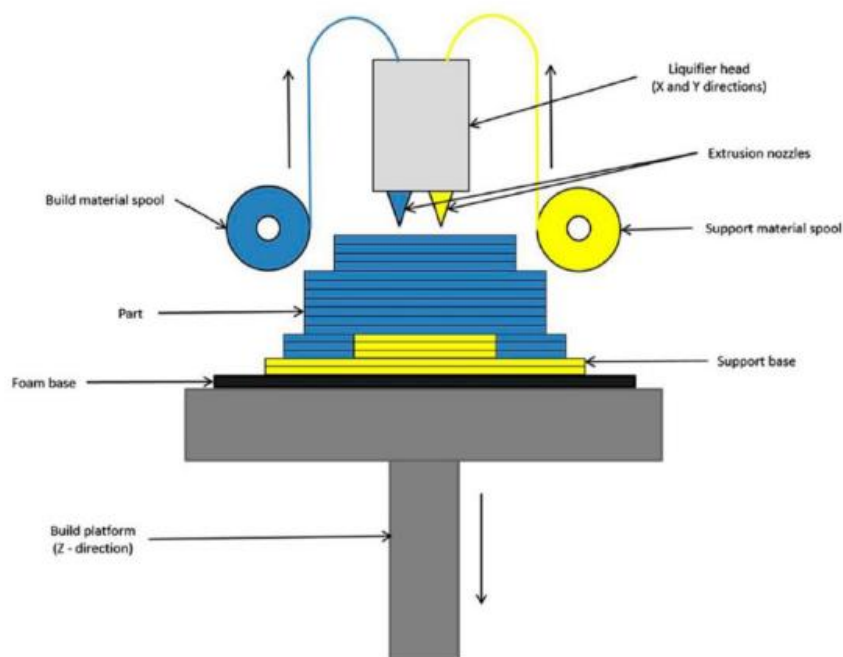


Figura 11 - Processo de impressão 3D. Adaptado de [25]

A formação das ligações entre os filamentos de polímeros é impulsionada pela energia térmica do material extrudado. A temperatura das interfaces entre os filamentos adjacentes desempenha um papel crucial na qualidade das ligações e, portanto, nas propriedades mecânicas do objeto. Essa temperatura depende da taxa na qual o filamento esfria durante sua saída do extrusor, destacando a importância do controle da temperatura ambiente na resistência mecânica do material. Para garantir características satisfatórias, as ligações requerem o desenvolvimento de pescoços entre os filamentos adjacentes e a difusão molecular [26].

Devido ao uso de termoplásticos na fabricação das peças, a impressão FDM demonstra eficácia na produção de objetos robustos, o que a torna adequada para a fabricação de peças funcionais e para uso final.

2.3.1.3 Aplicações

As impressoras 3D encontram aplicação em uma variedade de setores e produtos para uso doméstico, industrial e profissional. Algumas dessas aplicações incluem:

- I. Na indústria médica, para a fabricação de próteses médicas e odontológicas;

- II. No setor aeroespacial, na produção de portas de aeronaves, acessórios de cabine, painéis e dutos de ar;
- III. Na indústria de fundição de joias, para a criação de moldes e peças personalizadas;
- IV. No campo educacional, tornando a prática mais acessível aos alunos e no mercado *DIY (Do It Yourself)*, permitindo que aspirantes e empreendedores explorem novas ideias e aprimorem produtos para o mercado;
- V. Na indústria automotiva, para a fabricação de componentes como painéis de carro, suportes, acessórios de interior e dutos de ar.

2.4 ENSAIOS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DAS PECAS FABRICADAS POR IMPRESSÃO 3D

Neste segmento, é apresentada a teoria dos ensaios realizados neste projeto, com o intuito de fornecer orientações práticas para sua execução.

Para garantir a uniformidade e precisão dos ensaios, são adotadas normas estabelecidas por instituições amplamente reconhecidas internacionalmente, tais como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), *ASTM (American Society for Testing and Materials)*, *DIN (Deutsches Institut für Normung)*, *ISO (International Organization for Standardization)*, entre outras, além de normativas específicas das respectivas indústrias.

2.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é uma modalidade de teste mecânico considerada destrutiva, o que implica na inutilização total ou parcial da peça analisada. Por meio desse ensaio, diversas propriedades podem ser determinadas, incluindo o limite de resistência à tração (σ_u) e o módulo de elasticidade (E) [27].

2.4.1.1 Procedimento do ensaio de tração

O ensaio de tração envolve a submissão de um material, como um espécime de formato padronizado, a um esforço de alongamento estático até sua ruptura, ou seja, uma carga é aplicada gradualmente ao material até que ele se rompa. Essa carga é uniaxial, aplicada em uma única direção. Os valores dessas cargas são determinados pela própria máquina de ensaio. Conforme o espécime é esticado pela máquina, a resposta do material ao alongamento é expressa pela tensão aplicada, que aumenta proporcionalmente à deformação enquanto o material permanece no regime elástico. Quando o espécime entra no regime plástico, ele cede mais facilmente, embora a tensão continue a aumentar (especialmente com uma taxa de estiramento mais elevada [28]), até o ponto em que ocorre o colapso e a deformação localizada (pescoço), resultando na perda de resistência, conforme ilustrado na Figura 12.

O ensaio de tração é utilizado para medir propriedades importantes do material para sua especificação e para gerar uma curva de tensão versus deformação. Esses resultados são altamente influenciados por fatores como temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, condições ambientais, entre outros parâmetros.

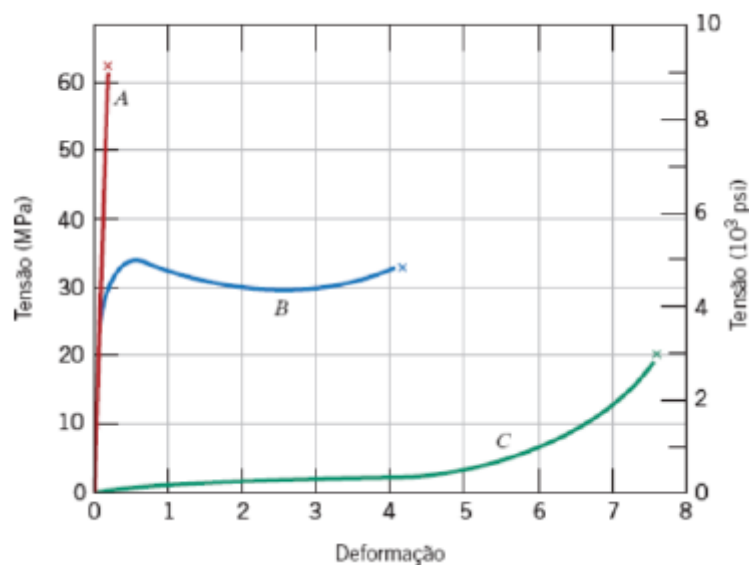


Figura 12 - Curva tensão x deformação para polímeros. Adaptado de [28]

2.4.1.2 Propriedades obtidas a partir do ensaio de tração

São diversas as propriedades que podem ser obtidas por meio do ensaio de tração. A seguir serão mencionadas algumas dessas propriedades.

2.4.1.2.1 Tensão de tração

A tensão de tração (σ_u) é definida como a carga por unidade de área da menor seção transversal dentro do comprimento útil em qualquer instante, expressas em MPa, conforme a Equação 1:

$$\sigma_u = \frac{W}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

- i. W é a carga aplicada ao corpo, em N;
- ii. A_0 é a área inicial da seção útil de teste, em mm².

2.4.1.2.2 Limite de resistência à tração

A tensão de resistência é a máxima tensão que um corpo submetido a tração consegue suportar antes de falhar, sendo calculada pela Equação 1. O resultado é expresso em MPa.

2.4.1.2.3 Deformação

Corresponde à razão entre o aumento no comprimento, em relação ao comprimento inicial útil. Este valor é adimensional e é calculado pela Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Onde:

- i. ΔL é o deslocamento, em mm;
- ii. L é o comprimento inicial do corpo, em mm.

2.4.1.2.4 Módulo de elasticidade

Também conhecido como módulo de Young, é uma medida da rigidez que indica a flexibilidade do objeto. Quanto maior o módulo, maior a tensão necessária para produzir a mesma quantidade de deformação, ou seja, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica. Geralmente, esse valor é dependente da temperatura, diminuindo à medida que a temperatura aumenta

Para calcular o módulo de elasticidade, é necessário primeiro estender a parte linear da curva tensão x deformação. Em seguida, divide-se a diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) em qualquer segmento dessa linha reta pela diferença correspondente na deformação ($\Delta\varepsilon$), como mostrado na Figura 13, pela Equação 3.

A parte elástica da curva é aquela em que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada, seguindo um comportamento linear que obedece à lei de *Hooke* ($\sigma = E\varepsilon$). Nesse caso, é possível simplesmente dividir a tensão em qualquer ponto da linha CD pela deformação no mesmo ponto, como ilustrado na Figura 13.

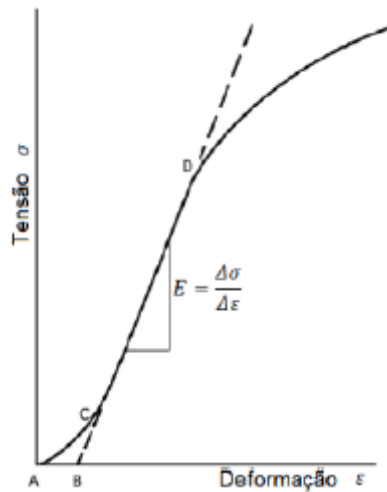


Figura 13 - Material com região de Hooke. Adaptado de [29]

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Onde:

- i. σ é a tensão na parte linear da curva, em MPa;
- ii. ε é o comprimento inicial do corpo, adimensional.

2.4.1.2.5 Tensão limite de escoamento

Neste ponto, a curva tensão x deformação deixa de ser linear. Como sua definição muitas vezes é complexa, foi estabelecida uma convenção de traçar uma linha paralela (N) à parte elástica da curva (A), a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%, um valor comumente utilizado para alguns metais e adotado neste trabalho. A interseção desta linha com a curva do diagrama é denominada tensão de escoamento (σ_y), que representa a tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% no corpo, conforme ilustrado na Figura 14.

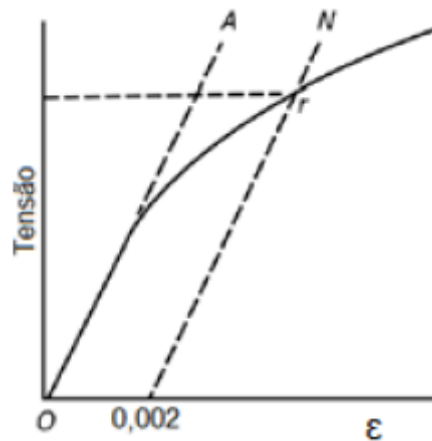


Figura 14 - Curva de tensão limite de escoamento. Adaptado de [29]

Sendo assim, temos:

$$\sigma_y = E * (\varepsilon_{ponto} - 0,002) \quad (4)$$

Onde:

- i. σ_y é a tensão limite de escoamento, em MPa;
- ii. E é o módulo de elasticidade, em MPa;
- iii. ε_{ponto} é a deformação no ponto em que a linha paralela cruza o diagrama.

2.4.1.3 Normas utilizadas no ensaio de tração

As propriedades de tração de um material podem variar dependendo da preparação do espécime, da velocidade e do ambiente de teste. Para garantir o padrão dos resultados em diferentes laboratórios ao redor do mundo, é fundamental seguir uma norma estabelecida que especifique os procedimentos de teste.

No contexto deste trabalho, a norma escolhida é a *ASTM D638 – 14* [29], intitulada *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Embora originalmente destinada a determinar as propriedades de tração de plásticos, essa norma também é utilizada para definir as geometrias dos espécimes fabricados com materiais plásticos, incluindo aqueles produzidos por impressoras 3D. A escolha dessa norma se deve à falta de diretrizes específicas para o

projeto em questão, e ela proporciona um método padronizado para obter os valores das propriedades de tração dos materiais ensaiados.

Os materiais poliméricos selecionados para este projeto são o PETG e o PLA. Antes de realizar o ensaio de tração, os espécimes devem ser condicionados de acordo com a norma *ASTM D618 – 13* [30]. Esse condicionamento padroniza as condições de umidade e temperatura a que os modelos estão submetidos antes do teste de tração, garantindo a consistência dos resultados.

2.4.2 Ensaio de flexão

Um ensaio muito empregado na indústria é o de flexão, pois fornece dados quantitativos sobre a deformação de materiais sob cargas aplicadas. Os resultados desse ensaio podem ser influenciados por vários fatores, incluindo temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e geometria transversal do espécime [27].

Existem dois tipos principais de ensaio de flexão: o de três pontos e o de quatro pontos. No ensaio de três pontos, uma barra é suportada nas extremidades do comprimento, com uma carga aplicada a meio caminho entre os apoios. Por outro lado, no ensaio de quatro pontos, a carga é aplicada em dois pontos equidistantes dos apoios.

De acordo com Sun et al. (2008) [31], a qualidade das ligações entre filamentos adjacentes em impressões 3D pode depender da temperatura do ambiente e das variações nas condições convectivas da peça durante o ensaio, ao mesmo tempo em que a resistência à flexão é avaliada.

Os parâmetros do teste incluem a extensão entre os apoios, a velocidade da carga e a máxima deflexão permitida durante o teste, todos baseados na espessura do espécime.

De acordo com Christyian et al. (2016) [32], a resistência à flexão tende a diminuir com o aumento da espessura das camadas. Por outro lado, um maior número de camadas, o que implica em espessuras menores, contribui para um aumento na resistência à flexão. Isso ocorre devido à redução na quantidade de porosidades e ao aumento das ligações entre os filamentos. Além disso, quando o espécime é construído com o ângulo de *raster* paralelo (comumente considerado como 0°) à direção do plano de flexão, observa-se um aumento adicional na resistência à flexão.

2.4.2.1 Procedimento do ensaio de flexão

No ensaio de flexão em Três Pontos, um espécime de seção retangular padronizado é apoiado em dois suportes e uma carga crescente é aplicada no meio do espécime até sua ruptura ou até que uma deformação predeterminada seja atingida, o que ocorrer primeiro. Esse processo causa flexão em todo o corpo do espécime. A partir deste teste, são coletados dados de força x deslocamento, dos quais é gerado um gráfico de tensão x deformação. A partir desse gráfico, são extraídas as propriedades de flexão do material [33].

2.4.2.2 Propriedades obtidas a partir do ensaio de flexão

Assim como no ensaio de tração, são diversas as propriedades que podem ser obtidas por meio do ensaio de tração. A seguir serão mencionadas algumas dessas propriedades.

2.4.2.2.1 Resistência a flexão

A máxima tensão de flexão suportada pela amostra durante o ensaio é determinada pela Equação 5, onde σ_f representa a tensão nas fibras externas no ponto médio do espécime em MPa.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5)$$

Onde:

- i. F é a carga máxima do ensaio, em N;
- ii. L é a extensão entre os apoios, em mm;
- iii. b é a largura do espécime, em mm;
- iv. h é a espessura do espécime, em mm.

2.4.2.2.2 Deformação

A mudança nominal no comprimento de um elemento da superfície externa do espécime, localizado a meia distância onde ocorre a deformação máxima, é determinada pela Equação 6, onde ε_f representa a deformação na superfície externa (em mm/mm).

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (6)$$

Onde:

- i. s é o deslocamento no centro do espécime, em mm;
- ii. L é a extensão entre os apoios, em mm;
- iii. h é a espessura do espécime, em mm.

2.4.2.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é calculado pela razão, dentro do limite elástico, da tensão pela deformação no determinado ponto, demonstrado pela Equação 7.

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (7)$$

Onde:

- i. m é o declive da curva força x deslocamento na parte linear, em mm;
- ii. L é a extensão entre os apoios, em mm;
- iii. b é a largura do espécime, em mm;
- iv. h é a espessura do espécime, em mm.

2.4.2.3 Normas utilizadas no ensaio de flexão

A norma usada no ensaio de flexão foi a norma ISO 178:2003 [34], *Plastics – Determination of Flexural Properties* [34]. Com ela obtém-se as geometrias dos espécimes, a quantidade, bem como seu condicionamento e procedimentos de realização do ensaio.

2.5 MÉTODO TAGUCHI

O Método Taguchi foi concebido pelo Dr. Genichi Taguchi, um engenheiro e estatístico japonês que revolucionou os métodos de otimização no planejamento de experimentos. A abordagem desenvolvida por Taguchi não apenas resultou em um método robusto de design experimental, mas também introduziu um conceito prático de execução que promove diversas melhorias na qualidade final. Essa abordagem difere das práticas convencionais conhecidas anteriormente, como o planejamento fatorial [35].

O Método Taguchi é uma técnica utilizada em uma metodologia chamada Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments - DOE*, em inglês), cujo objetivo é aprimorar uma ou mais características de um produto ou processo conforme as exigências do projeto [36].

Esse método fundamenta-se na concepção de um experimento por meio de arranjos ortogonais, no qual os níveis das variáveis de entrada são estrategicamente controlados. Isso possibilita a análise de como essas variáveis influenciam o resultado da característica desejada.

A utilização dos arranjos ortogonais representa uma evolução em relação aos métodos clássicos de experimentação planejada que eram empregados antes do desenvolvimento da metodologia de Taguchi. Uma das principais vantagens desses arranjos é a capacidade de avaliar múltiplos fatores de forma simultânea, por meio de um número reduzido de testes, o que ajuda a evitar custos excessivos de projeto [36].

A seleção de um arranjo ortogonal depende de[36]:

- O número de parâmetros e interações de interesse;
- O número de níveis para os parâmetros.

2.5.1 Razão Sinal-Ruído

Para avaliar o quanto a característica de qualidade varia em relação ao valor desejado, o método Taguchi sugere o uso da função de perda, que posteriormente é convertida na razão sinal-ruído.

A razão sinal-ruído é uma medida que avalia a sensibilidade da característica de qualidade em estudo de uma forma controlada em relação aos fatores não controláveis, conhecidos como fatores de ruído.

Essa razão pode ser considerada como uma medida da variação em um experimento quando fatores de ruído estão presentes. Taguchi desenvolveu essa razão para converter os dados de cada teste (e suas repetições) em um valor que quantifica a variação entre cada repetição. Para realizar esse estudo, é essencial que pelo menos uma repetição seja conduzida para cada teste descrito no arranjo ortogonal elaborado [36].

A classificação da característica de qualidade pode variar dependendo do objetivo desejado. Geralmente, ela é dividida em três categorias: "maior é melhor", "nominal é o melhor" e "menor é o melhor" [37].

Independentemente da categoria escolhida para o atributo de qualidade, uma maior razão sinal-ruído (S/N) indica uma melhor performance da característica selecionada. Essa relação se aplica quando apenas uma característica é considerada. No entanto, ao lidar com várias características, a maior razão S/N para uma qualidade pode corresponder à menor razão S/N para outra característica em estudo. Portanto, é necessário incluir mais funções de perda relativas a cada atributo considerado, a fim de melhorar a correlação entre essas razões S/N e as características desejadas. O Método Taguchi baseado em Grey possibilita a integração das funções de perda individuais em uma única função de perda geral, permitindo assim a obtenção das configurações ideais dos parâmetros que levem em conta todas as características desejadas [38], [39].

Quando o objetivo é minimizar a resposta para a característica de qualidade selecionada, o critério "menor é o melhor" é adotado, e a razão S/Ns é calculada de acordo com a Equação 8 [37].

$$\frac{S}{N_s} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2\right) \quad (8)$$

Quando a meta é otimizar a resposta da característica de qualidade, seleciona-se o atributo "maior é melhor", e a razão sinal-ruído é calculada conforme a Equação 9 [37].

$$\frac{S}{N_L} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (9)$$

Tanto para a Equação 8 quanto para a Equação 9, n representa o número de observações realizadas e Y_i os dados observados.

Quando o valor nominal é considerado o melhor, indicando que existe um valor ideal para uma determinada característica de qualidade, a razão sinal-ruído é calculada de acordo com a Equação 10 [40].

$$\frac{S}{N_N} = -10 * \log\left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2}\right) \quad (10)$$

A variável \bar{Y} representa a média dos dados dos experimentos, enquanto σ é o desvio padrão. Neste contexto, uma resposta alvo é estabelecida, e a razão sinal-ruído é calculada considerando apenas as médias e o desvio padrão.

2.6 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY

A teoria do sistema de Grey foi desenvolvida por Deng Julong em 1982 e tem sido aplicada em uma variedade de campos, incluindo engenharia industrial, economia, agricultura e estudos sociais [41], [42].

A Análise Relacional de Grey (ARG), originária da teoria do sistema de Grey, é um método de medição que avalia a correlação entre uma sequência de resultados utilizando uma quantidade específica de dados. Uma das principais vantagens dessa análise, similar ao método Taguchi, em comparação com outros métodos estatísticos de análise, é que ela requer apenas uma quantidade mínima de dados, o que pode limitar a necessidade de realizar um grande número de ensaios [42].

A Análise Relacional de Grey resolve problemas em tomadas de decisões que envolvem múltiplos atributos, combinando todas as características de desempenho (ou de qualidade) avaliadas no processo em um único valor, conhecido como grau relacional de Grey. Isso permite que a decisão sobre os valores ótimos seja baseada em um único indicador. A combinação paramétrica ideal é então avaliada maximizando o valor do grau relacional de Grey [41], [43]. Isso oferece uma vantagem em relação ao método de Taguchi, que apenas permite avaliar a influência dos fatores em uma única característica de qualidade do processo ou produto. Com a Análise Relacional de Grey, é possível analisar a combinação ideal de fatores que atenderá a todo o conjunto de resultados esperados.

Agora, será apresentado o procedimento passo a passo desenvolvido para calcular o grau relacional de Grey, que será seguido neste estudo para avaliar o nível ideal dos parâmetros selecionados que atingirão as características de qualidade desejadas durante o processo de impressão 3D.

2.6.1 Normalização da razão sinal-ruído

Na Análise Relacional de Grey, há um reprocessamento dos dados previamente obtidos, neste caso através do método de Taguchi, para normalizar os dados não tratados. Uma normalização linear é aplicada aos resultados de cada característica de qualidade analisada, resultando em valores que variam de 0 a 1. Assim como no cálculo da razão sinal-ruído, a normalização segue equações distintas dependendo da resposta desejada para cada característica de qualidade [44].

A normalização dos dados experimentais quando o atributo “maior é o melhor” é escolhido para a característica de qualidade é dado segundo a Equação 11 [39].

$$x_{ij} = \frac{n_{ij} - \min_{ij}n_{ij}}{\max_{ij}n_{ij} - \min_{ij}n_{ij}} \quad (11)$$

Onde:

- i. x_{ij} é o valor normalizado, adimensional;
- ii. n_{ij} é o valor de S/N estudado, em dB;

- iii. $\min_{ij} n_{ij}$ é o valor mínimo de S/N entre as 16 amostras, em dB;
- iv. $\max_{ij} n_{ij}$ é o valor máximo de S/N entre as 16 amostras, em dB.

Quando o atributo “menor é o melhor” for escolhido para a resposta analisada, a normalização é dada segundo a equação 12 [39].

$$x_{ij} = \frac{\max_{ij} n_{ij} - n_{ij}}{\max_{ij} n_{ij} - \min_{ij} n_{ij}} \quad (12)$$

Para a característica “nominal é melhor” a normalização dos dados é calculada de acordo com a equação 13 [45].

$$x_{ij} = \frac{|n_{ij} - n_{ob}|}{\max\{\max_{ij} n_{ij} - n_{ob}; n_{ob} - \min_{ij} n_{ij}\}} \quad (13)$$

Onde:

- i. n_{ob} é o valor nominal ao qual se deseja chegar, dB;
- ii. n_{ij} é o valor de S/N estudado, em dB;
- iii. $\min_{ij} n_{ij}$ é o valor mínimo de S/N entre as 16 amostras, em dB;
- iv. $\max_{ij} n_{ij}$ é o valor máximo de S/N entre as 16 amostras, em dB.

Quando os experimentos são conduzidos sem repetições, os dados são normalizados com base nos resultados obtidos para cada experimento e para cada resposta analisada. Isso é feito aplicando as Equações 11, 12 e 13, de acordo com as características específicas das respostas. Por outro lado, quando há repetição dos ensaios, a normalização é realizada considerando a razão S/N calculada para cada experimento e para cada característica de qualidade. Nesse caso, todos os resultados obtidos nas repetições são agrupados. Nessa situação, o processamento dos dados é realizado utilizando a Equação 12, pois para a razão S/N, é sempre desejável obter o maior valor possível.

2.6.2 Coeficiente Relacional de Grey

Após a normalização linear dos valores da razão sinal-ruído obtidos nos experimentos, torna-se possível calcular o coeficiente relacional de Grey, que indica a relação entre o resultado ideal e o resultado real. Esse coeficiente é calculado de acordo com a seguinte Equação 14 [42], [44]

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x^0_i - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|}{|x^0_i - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|} \quad (14)$$

Onde:

- i. ξ_{ij} é o coeficiente relacional de Grey;
- ii. $\min_i \min_j |x^0_i - x_{ij}|$ é o valor mínimo de S/N normalizado entre as 16 amostras;
- iii. $\max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|$ é o valor máximo de S/N normalizado entre as 16 amostras;
- iv. $|x^0_i - x_{ij}|$ é a diferença entre valor da sequência ideal e o valor estudado;
- v. ζ é o coeficiente de influência do ensaio.

2.6.3 Grau Relacional de Grey (GRG)

Após calcularmos o Coeficiente Relacional de Grey, o GRG é determinado pela média dos coeficientes associados a cada atributo de desempenho selecionado. Portanto, o Grau Relacional de Grey é obtido utilizando a Equação 15.

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \xi_{ij}(i) \quad (15)$$

Onde:

- i. y_i é o Grau Relacional de Grey;
- ii. n é o número de elementos observados;
- iii. $w_i \xi_{ij}(i)$ são os dados observados.

O Grau Relacional de Grey indica a correlação entre a sequência ideal e as sequências obtidas. Quando as duas sequências são idênticas, o valor do GRG é 1. Portanto, quanto maior o valor do grau relacional (que varia de 0 a 1), maior é a relevância daquela sequência de resultados em relação ao cenário ideal [46], [47].

2.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância é uma técnica empregada para comparar mais de dois níveis de uma ou mais variáveis de teste e também para determinar se as médias de três ou mais grupos (ou níveis, no contexto deste trabalho) diferem entre si [48].

As variâncias são uma medida de dispersão que avalia o quão distantes os dados de uma população estão da sua média. Um dos propósitos da análise de variância é determinar se existe uma diferença significativa entre as distribuições de resultados em uma amostra composta por três ou mais grupos.

Para realizar a análise de variância, é essencial elaborar uma tabela ANOVA, com as somas dos quadrados sequenciais, os graus de liberdade, os quadrados médios, o valor-F e o valor-P, esses itens, assim como suas respectivas explicações, estão listados abaixo:

- As somas dos quadrados sequenciais representam medidas da variação para os diferentes componentes do modelo.
- Os graus de liberdade (GDL) são a quantidade de informações totais no modelo
- Os quadrados médios são a razão da soma dos quadrados pelo grau de liberdade e representa a variação entre as médias amostrais
- O valor-F é uma estatística de teste empregada para determinar se um fator de controle do modelo está associado à resposta e qual é a magnitude de sua influência sobre essa resposta [49].
- O valor-P é a probabilidade de observar um valor da estatística de teste igual ou maior ao encontrado. Geralmente, o limite de corte para rejeitar a hipótese nula

é de 0,05. Isso implica que, quando não há diferença significativa, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5% das ocasiões [50].

CAPÍTULO 3

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo delinea a configuração experimental adotada e os ensaios realizados durante este estudo através do Método de Taguchi. Inicialmente, são expostos os valores dos diversos níveis para os diferentes parâmetros de impressão, além da elaboração da matriz ortogonal conforme a metodologia de Taguchi. Adicionalmente, é detalhado o procedimento de condução dos ensaios experimentais de tração e flexão, seguindo os valores predefinidos nos parâmetros da matriz ortogonal.

3.1 APLICAÇÃO INICIAL DO TEOREMA TAGUCHI

A tensão de flexão e a tensão de tração são duas das características mais importantes a serem analisadas em peças obtidas a partir de um processo de impressão 3D. Portanto, o principal objetivo a ser alcançado neste processo é obter o maior valor de tensão máxima para a flexão, assim como, o maior valor de tensão máxima para a tração.

A porcentagem de preenchimento (%), temperatura (°C), espessura da camada (mm) e o tipo de preenchimento são os parâmetros mais comuns analisados no processo de impressão 3D.

Com os valores de referência obtidos a partir dos fornecedores dos materiais, foi possível montar a Tabela 1 e a

Tabela 2, contendo os parâmetros e os níveis estudados neste trabalho para o PLA e para o PETG, respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros e níveis de impressão PLA.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2
Porcentagem de Preenchimento (%)	100	25
Temperatura (°C)	215	200
Espessura da camada (mm)	0,2	0,1
Tipo de Preenchimento	Triangular	Zigue-Zague

Tabela 2 - Parâmetros e níveis de impressão PETG

Parâmetros	Nível 1	Nível 2
Porcentagem de Preenchimento (%)	100	25
Temperatura (°C)	235	215
Espessura da camada (mm)	0,2	0,1
Tipo de Preenchimento	Triangular	Zigue-Zague

As porcentagens de preenchimento e os tipos de preenchimentos foram definidos a partir da literatura, a temperatura e a espessura da camada foram selecionadas a partir dos dados obtidos dos fornecedores dos filamentos.

No caso do PETG os dados de temperatura de impressão fornecidos pelo fornecedor, divergiam dos dados existentes nas literaturas estudadas, por isso, foi decidido realizar a impressão de um modelo de teste de temperaturas de impressão, Figura 15, a partir desse modelo foram definidas as temperaturas de impressão para esse material, a temperatura com melhor resultado foi a temperatura 235 °C.



Figura 15 - Modelo de teste de temperatura para PETG.

De acordo com a Tabela 1 e

Tabela 2, para a utilização de 4 parâmetros com 2 níveis cada, a matriz ortogonal de Taguchi apropriada é a L16. A partir dessa matriz, serão geradas 16 combinações de parâmetros distribuídas aleatoriamente, as quais serão, posteriormente, impressas. Para uma análise estatística mais robusta, cada combinação será impressa 3 vezes, permitindo a repetição de cada teste. A Tabela 3 representa a matriz ortogonal L16 de Taguchi.

Tabela 3 - Matriz ortogonal L16 de Taguchi

Número do ensaio	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	2	1	1
6	1	2	1	2
7	1	2	2	1
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	1	1	2
11	2	1	2	1
12	2	1	2	2
13	2	2	1	1
14	2	2	1	2
15	2	2	2	1
16	2	2	2	2

Após definir a matriz de Taguchi, os valores escolhidos para cada parâmetro foram substituídos pelos níveis correspondentes, conforme demonstrado na Tabela 4 e Tabela 5, para os dois materiais, PLA e PETG, respectivamente.

Tabela 4 - Matriz ortogonal de Taguchi para PLA.

Número do ensaio	Preenchimento (%)	Temperatura (°C)	Espessura da camada (mm)	Tipo de Preenchimento
1	100	215	0,2	Triangular
2	100	215	0,2	Zigue-Zague
3	100	215	0,1	Triangular
4	100	215	0,1	Zigue-Zague
5	100	200	0,2	Triangular
6	100	200	0,2	Zigue-Zague
7	100	200	0,1	Triangular
8	100	200	0,1	Zigue-Zague
9	25	215	0,2	Triangular
10	25	215	0,2	Zigue-Zague
11	25	215	0,1	Triangular
12	25	215	0,1	Zigue-Zague
13	25	200	0,2	Triangular
14	25	200	0,2	Zigue-Zague
15	25	200	0,1	Triangular
16	25	200	0,1	Zigue-Zague

Tabela 5 - Matriz ortogonal de Taguchi para PETG.

Número do ensaio	Preenchimento (%)	Temperatura (°C)	Espessura da camada (mm)	Tipo de Preenchimento
1	100	235	0,2	Triangular
2	100	235	0,2	Zigue-Zague
3	100	235	0,1	Triangular
4	100	235	0,1	Zigue-Zague
5	100	215	0,2	Triangular
6	100	215	0,2	Zigue-Zague
7	100	215	0,1	Triangular
8	100	215	0,1	Zigue-Zague
9	25	235	0,2	Triangular
10	25	235	0,2	Zigue-Zague
11	25	235	0,1	Triangular
12	25	235	0,1	Zigue-Zague
13	25	215	0,2	Triangular
14	25	215	0,2	Zigue-Zague
15	25	215	0,1	Triangular
16	25	215	0,1	Zigue-Zague

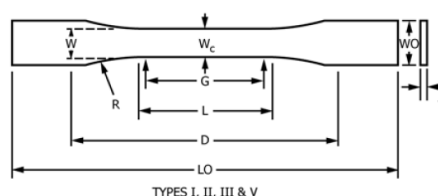
3.2 FABRICO DOS ESPÉCIMES

3.2.1 Fabrico dos espécimes de tração

Para iniciar a fabricação dos espécimes, é necessário determinar as dimensões a serem utilizadas, que dependem da rigidez do material. Conforme especificado na norma *ASTM D883 – 19c* [51], um plástico semirrígido possui um módulo de elasticidade em flexão ou tração entre 70 e 700 MPa a 23 °C e 50% de humidade relativa, conforme testado de acordo com os métodos de teste D790-17, D638 – 14, entre outros. Enquanto isso, um plástico considerado rígido tem um módulo de elasticidade superior a 700 MPa sob as mesmas condições.

Assume-se, portanto, que não se conhece a rigidez exata do material, se é rígido, semirrígido ou não rígido. Para isso, recorre-se a uma das geometrias estabelecidas na norma *ASTM D638 – 14*[29].

Conforme a norma mencionada, optou-se por utilizar espécimes de plástico rígido ou semirrígido com espessuras de até 4 mm (0,16 in.), sendo, portanto, do tipo V, e apresentando as dimensões indicadas em azul na Figura 16.



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, <i>T</i> , mm (in.) ^A				Tolerances
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under	Type V ^{C,D}	
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	
<i>W</i> —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125) ±0.5 (±0.02) ^{B,C}
<i>L</i> —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375) ±0.5 (±0.02) ^C
<i>WO</i> —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	... + 6.4 (+ 0.25)
<i>LO</i> —Length overall, min ^H	...	...	...	...	9.53 (0.375) + 3.18 (+ 0.125)
<i>G</i> —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	63.5 (2.5) no max (no max)
<i>D</i> —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	7.62 (0.300) ±0.25 (±0.010) ^C
<i>R</i> —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	±0.13 (±0.005)
<i>RO</i> —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	25.4 (1.0) ±5 (±0.2)
				14 (0.56)	12.7 (0.5) ±1 (±0.04) ^C
				25 (1.00)	... ±1 (±0.04)

Figura 16 - Dimensões dos espécimes de ensaio de tração. Adaptado de ASTM D638 – 14.

Posteriormente, os espécimes foram desenhados no *software SolidWorks®*. A Figura 17 ilustra o desenho do espécime no programa, enquanto o Anexo 1 exibe uma representação do desenho técnico dele, sem a aplicação do material, que, neste caso, são o PLA e o PETG.

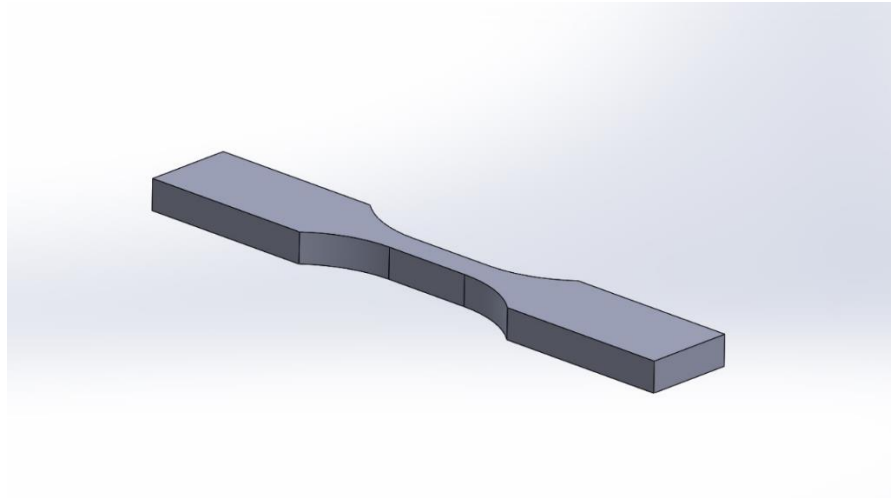


Figura 17 - Espécime de tração segundo a norma ASTM D638-14.

3.2.2 Fabrico dos espécimes de flexão

Para os espécimes de flexão foram utilizadas as dimensões fornecidas pela norma *ISO 178:2003* [34]. Conforme a norma mencionada, as dimensões dos espécimes devem ser 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 4 mm de espessura.

Posteriormente, assim como no caso dos espécimes de tração, os espécimes de flexão foram desenhados no *software SolidWorks®*. A Figura 18 ilustra o desenho do espécime no programa, enquanto o Anexo 2 exibe uma representação do desenho técnico dele, sem a aplicação do material, que neste caso são o PLA e o PETG.

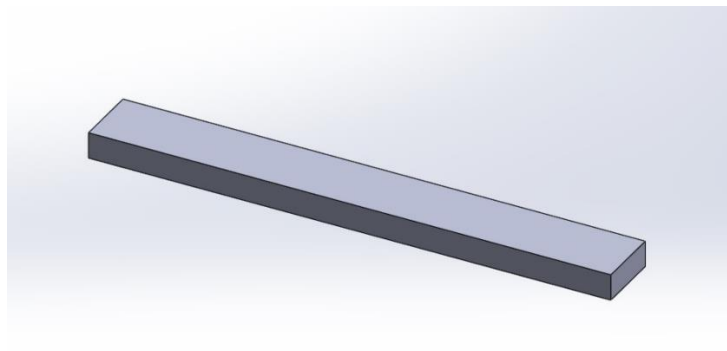


Figura 18 - Espécime de flexão segundo a norma ISO 178.

3.3 IMPRESSÃO DOS ESPÉCIMES

Para a impressão dos espécimes foi utilizada a impressora 3D *ANET A8 Plus*, Figura 19.

A impressora *ANET A8 Plus* possui uma base de impressão aquecida, que promove uma adesão superior do material, permitindo o controle preciso da temperatura. Essa característica ajuda a prevenir o empenamento (*warping*), mantendo todo o objeto aquecido de maneira uniforme durante o processo de impressão e garantindo que ele arrefeça de forma gradual e controlada.

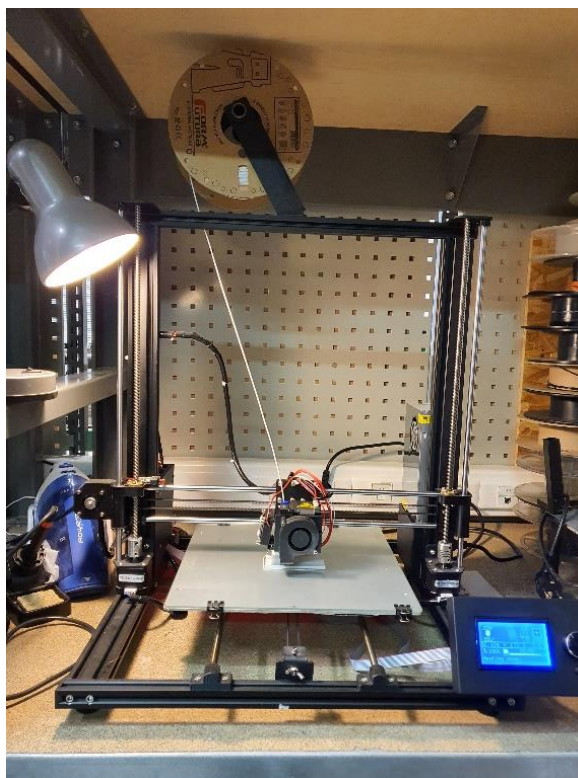


Figura 19 – Impressora ANET A8 Plus.

O filamento utilizado para os espécimes em PLA foi o *EasyFil PLA* da *FormFutura 3D Printing Materials* na cor branca, e o filamento utilizado para os espécimes em PETG foi o *RS PRO – PET-G* da *RS PRO*.

Inicialmente, foi impresso um espécime modelo de cada material, PLA e PETG, nas cores branca e preta, respectivamente. Esses espécimes modelos foram impressos com os parâmetros referentes a amostra 1 de cada material, ou seja, no caso do PLA a porcentagem de preenchimento foi de 100%, a temperatura de impressão foi 215 °C, a espessura de camada foi

0,2 mm e o tipo de preenchimento foi o triangular e, no caso do PETG, a porcentagem de preenchimento foi de 100%, a temperatura de impressão foi 235 °C, a espessura de camada foi 0,2 mm e o tipo de preenchimento foi o triangular. Esses modelos foram destinados à primeira avaliação do comportamento nos ensaios de tração e de flexão. O objetivo era verificar se os parâmetros escolhidos estavam de acordo para com os ensaios, assim como, realizar a calibração do equipamento para a realização dos respectivos ensaios.

Os modelos dos espécimes de tração foram testados a uma velocidade de ensaio de 1 mm/min, que estava dentro do intervalo definido pela norma do ensaio de tração utilizada, *ASTM D638 – 14*[29], para essa velocidade notou-se que o ensaio foi muito demorado, com isso, dois outros exemplares foram fabricados com as mesmas especificações anteriores e testados a uma velocidade de 2 mm/min para avaliar os parâmetros. Esses novos testes derivaram em resultados satisfatórios.

Os modelos dos espécimes de flexão foram testados a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min, que estava dentro do intervalo definido pela norma do ensaio de flexão utilizada, *ISO 178:2003*[34], para essa velocidade os testes derivaram em resultados satisfatórios.

Após a conclusão dos primeiros testes e a confirmação de que os parâmetros, tanto de tração quanto de flexão, selecionados apresentaram os resultados esperados, foram fabricados três espécimes para cada ensaio. Na Figura 20 encontram-se os espécimes de tração, onde, em branco, é o espécime em PLA e, em preto, o espécime em PETG. Na Figura 21 encontram-se os espécimes de flexão, que mantém o mesmo padrão de impressão observado nos espécimes de tração, em branco é o espécime em PLA, e em preto o espécime em PETG.

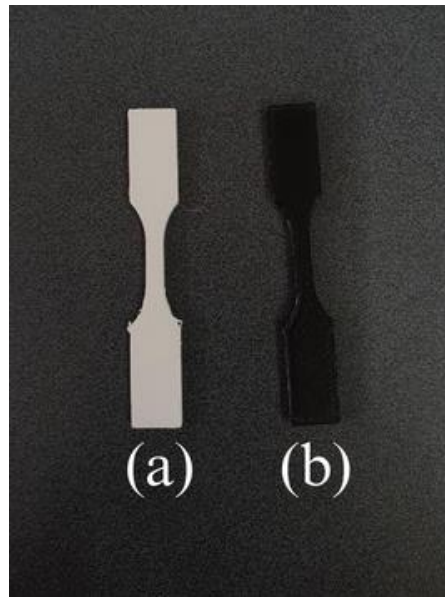


Figura 20 - Espécimes de tração.

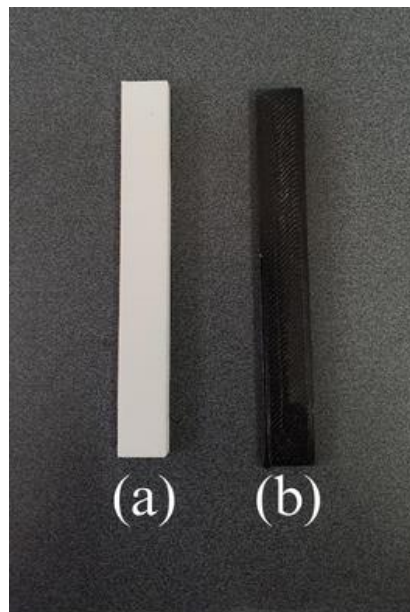


Figura 21 - Espécimes de flexão.

3.4 ESTABILIZAÇÃO DOS ESPÉCIMES

O condicionamento dos espécimes foi planejado de acordo com as diretrizes da norma ASTM D618 – 13 [30], seguindo o Procedimento A, que especifica uma condição de 40/23/50

para espécimes com, até 7 mm de espessura. Conforme mencionado anteriormente, os espécimes do projeto têm, aproximadamente, 3,2 mm de espessura. Esse procedimento implica em 40 horas de condicionamento a 23 °C (com variação de ± 2 °C) e 50% de umidade relativa. Como não foi possível controlar a umidade relativa, os espécimes foram mantidos no laboratório de ensaios (Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança) por, pelo menos, 40 horas, com uma temperatura ambiente de, aproximadamente, 18 °C.

3.5 ENSAIOS

3.5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração dos espécimes foi realizado conforme especificado na norma ASTM D638 – 14 [29] e foram condicionados em condições ambientais reais. Foram utilizados os polímeros PLA e PETG, como mencionado anteriormente. As dimensões (largura e espessura) de cada espécime foram medidas com um paquímetro *Mitutoyo*, com uma resolução de 0,05 mm.

Para a execução do ensaio, foi utilizada a máquina de testes universal da marca *Shimadzu*, modelo *Autograph AGS – X* (500 N a 10 kN), localizada no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB. Os espécimes foram fixados, manualmente, nas garras da máquina, garantindo uma distância de 25,4 mm entre elas. Durante o teste, uma garra permaneceu fixa enquanto a outra realizou o movimento longitudinal em relação ao corpo, conforme ilustrado na Figura 22.

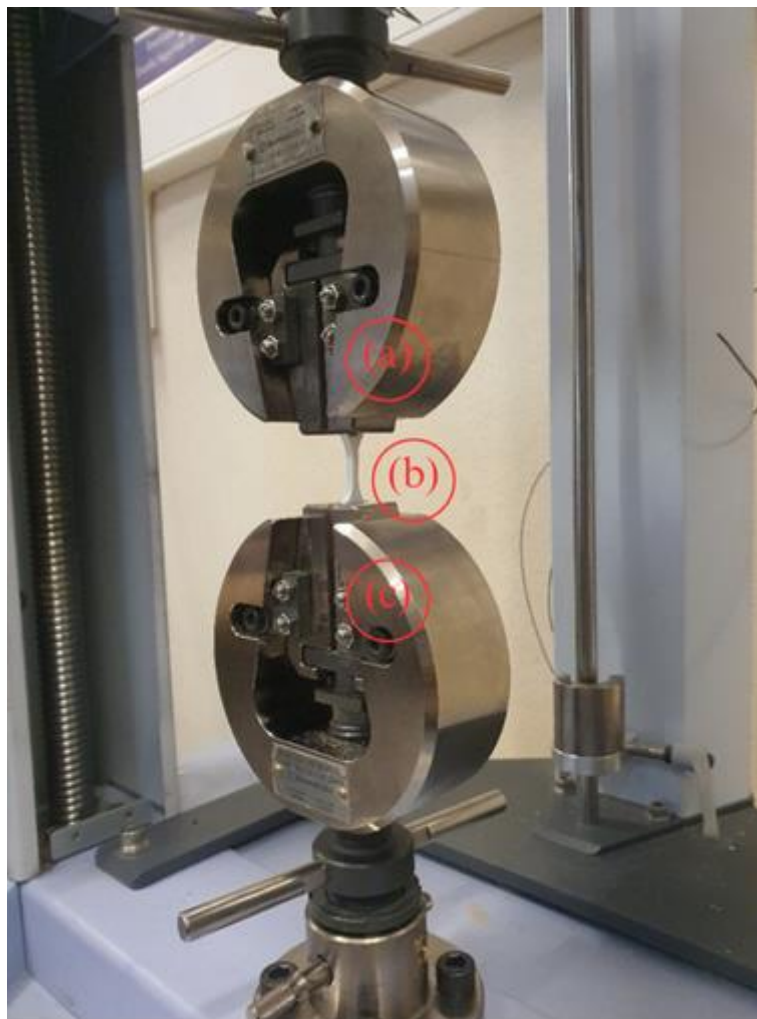


Figura 22 – Ensaio de tração em espécime de PLA. (a) garra que realiza o movimento, (b) espécime de tração e (c) garra fixa.

Através da garra que realiza o movimento, aplicamos uma carga gradual correspondente à deformação causada pela velocidade de 2 mm/min, utilizada durante o ensaio de tração, até que os espécimes atingissem a ruptura. Todos esses parâmetros foram inseridos no display do *software* da máquina, juntamente com as dimensões de largura e espessura dos espécimes (seção transversal A0).

O ensaio foi conduzido com controle pelo microcomputador por meio do programa *Trapezium – X*. Os resultados foram registrados para cada modelo, gerando valores de tração individuais para cada amostra.

As Figura 23a e b mostram os espécimes após o ensaio de tração em PLA e PETG, respectivamente.

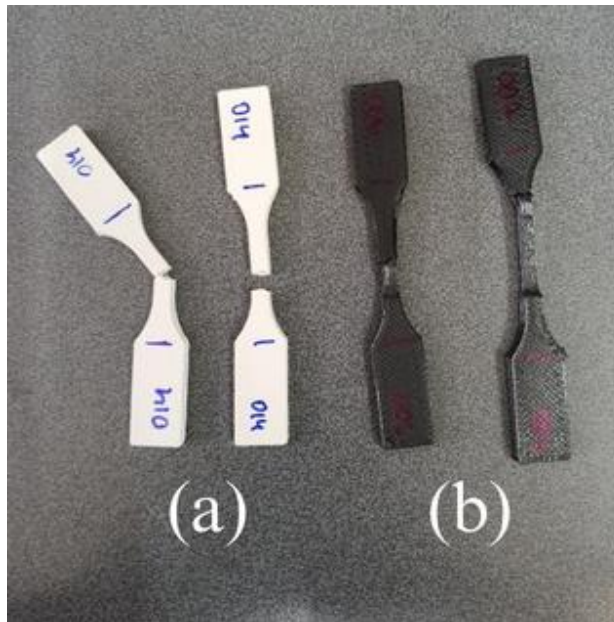


Figura 23 - Espécimes após o ensaio de tração.

3.5.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão dos espécimes foi realizado conforme especificado na norma ISO 178:2003 [34], *Plastics – Determination of Flexural Properties* e foram manufaturados em condições ambientais reais. Assim como no ensaio de tração, foram utilizados os polímeros PLA e PETG. As dimensões (largura e espessura) de cada espécime foram medidas com um paquímetro *Mitutoyo*, com uma resolução de 0,05 mm.

Para a execução do ensaio, foi utilizada a máquina de testes universal da marca *Shimadzu*, modelo *Autograph AGS – X* (500 N a 10 kN), localizada no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB.

Os espécimes foram posicionados nos suportes da máquina de ensaios universal *Shimadzu*, série *Autograph AGS – X*, localizada no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, de modo que o seu eixo mais longo ficasse perpendicular à parte aplicadora da carga. Em seguida, a carga foi aplicada aos espécimes seguindo a norma *ISO 178:2003* [34] e os dados obtidos foram registrados.

Estes dados, por fim, foram empregados no cálculo da tensão de flexão e de deformação. A Figura 24 apresenta um espécime em PLA na máquina durante o ensaio e a Figura 25 apresenta os espécimes em PLA (a) e PETG (b) após o ensaio.

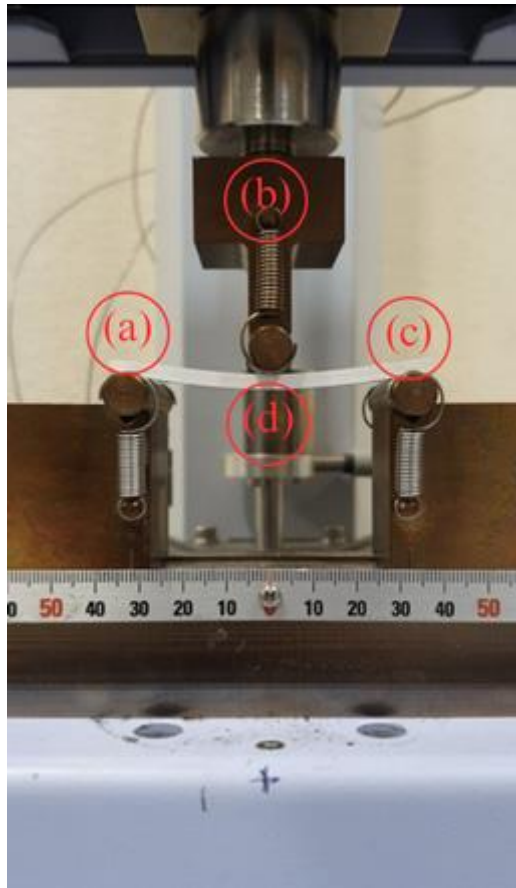


Figura 24 - Ensaio de flexão em espécime de PLA. (a) e (c) são os suportes fixos, (b) suporte onde a carga é aplicada e (d) é o espécime de flexão.

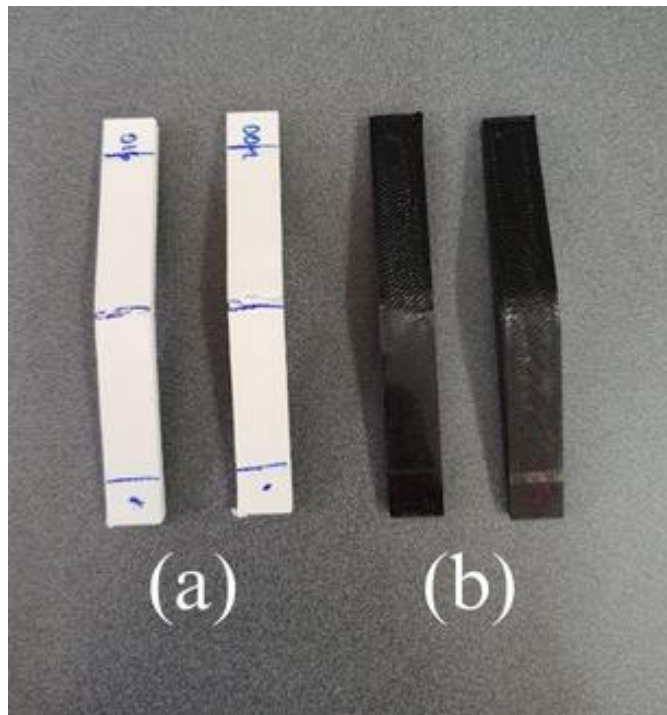


Figura 25 - Espécimes após o ensaio de flexão.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados de cada ensaio experimental referentes aos ensaios de tração e de flexão, utilizando os dados iniciais do Método de Taguchi.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir dos dados de força, deslocamento e tensões máximas fornecidos pelo *software Trapezium – X* da Máquina de Testes Universal *Shimadzu*, série *Autograph AGS – X*, foi possível calcular a média das tensões máximas de cada amostra, valores que podem ser observados na Tabela 6, para as amostras em PLA, e na Tabela 7, para as amostras em PETG. Com esses dados também foi possível calcular os valores das tensões e deformações, utilizando a Equação 1 e a Equação 2, respectivamente, e com esses valores foram impressos os gráficos contidos na Figura 26 e na Figura 27. A Figura 26 apresenta o gráfico de tensões das amostras em PLA e a Figura 27 apresenta o gráfico de tensões das amostras em PETG.

Tabela 6 – Tensões de tração máximas e tensão média de cada amostra em PLA.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			MÉDIA (MPa)
	1	2	3	
1	52,35	55,68	53,45	53,82
2	52,54	50,61	51,20	51,45
3	52,72	53,01	53,91	53,22
4	52,83	52,98	55,54	53,78
5	49,81	53,14	51,14	51,36
6	53,82	53,24	52,14	53,06
7	54,19	55,10	54,89	54,73
8	55,73	54,12	53,96	54,60
9	26,36	26,29	27,30	26,65
10	32,31	30,92	29,45	30,89
11	28,46	24,90	27,66	27,01
12	33,58	33,35	31,99	32,97
13	28,00	27,66	26,71	27,46
14	33,07	31,71	29,70	31,49
15	29,47	29,14	27,32	28,64
16	36,12	33,91	33,45	34,49

A partir da Tabela 6, verifica-se que o valor médio da tensão máxima de tração, para todas as amostras em PLA, foi de 41,60 Mpa. Pode-se observar, também, que a amostra com a maior valor de tensão máxima de tração foi a amostra número 7, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 200 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular. E a amostra com a menor valor de tensão máxima foi a amostra número 9, de combinação: porcentagem de preenchimento foi 25%, a temperatura de impressão 215 °C, a espessura de camada 0,2 mm e o tipo de preenchimento o triangular.

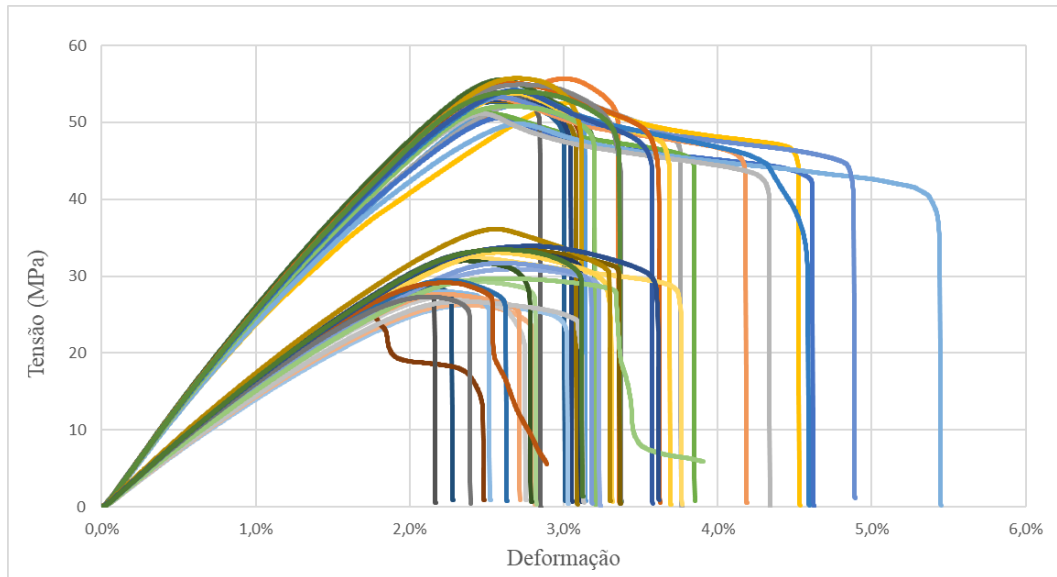


Figura 26 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em PLA.

Com a Tabela 6 e a Figura 26, é possível observar a diferença entre as curvas Tensão x Deformação das amostras de número 1 até à número 8, impressas com preenchimento de 100%, e das amostras de número 9 até à número 16, impressas com preenchimento de 25%. As amostras com 100% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de 53,25 MPa, já as amostras com 25% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de 29,95 MPa, cerca de 43,75% menor.

Tabela 7 - Tensões de tração máximas e tensão média de cada amostra em PETG

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			MÉDIA (MPa)
	1	2	3	
1	47,16	45,64	46,62	46,47
2	47,54	47,92	47,25	47,57
3	49,52	50,74	49,75	50,01
4	51,61	51,03	47,21	49,95
5	48,03	46,54	45,52	46,70
6	45,59	45,25	45,38	45,41
7	48,21	47,65	47,67	47,84
8	46,33	46,57	43,16	45,35
9	20,05	19,78	18,66	19,50
10	25,74	24,11	24,69	24,85
11	23,60	22,40	23,98	23,32
12	26,19	26,18	26,00	26,13
13	20,63	20,45	20,61	20,56
14	23,87	24,05	23,59	23,84
15	21,47	24,05	23,11	22,88
16	27,03	26,74	25,96	26,58

A partir da Tabela 7, verifica-se que o valor médio tensão máxima de tração para todas as amostras em PETG foi de 35,43 MPa, 14,82% menos que a médias das amostras em PLA. Pode-se observar também que a amostra com o maior valor de tensão máxima de tração foi a amostra número 3, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 235 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular, e a amostra com o menor valor de tensão máxima de tração foi a amostra número 9, de combinação: porcentagem de preenchimento de 25%, a temperatura de impressão 235 °C, a espessura de camada 0,2 mm e o tipo de preenchimento o triangular.

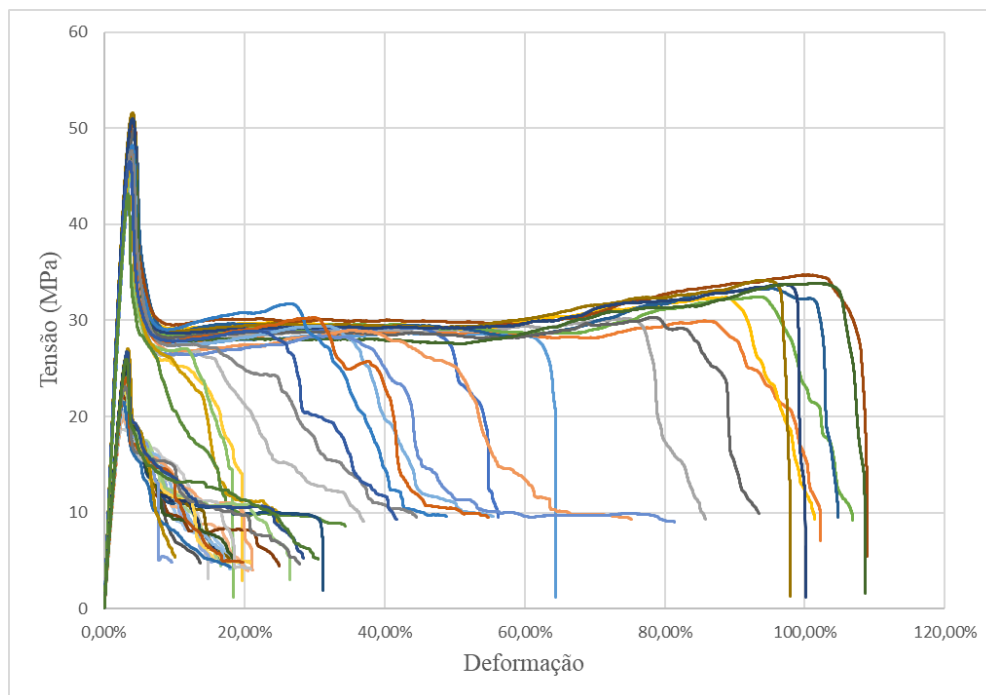


Figura 27 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em PETG

Com a Tabela 7 e a Figura 27, é possível observar, novamente, a diferença entre as curvas Tensão x Deformação das amostras de número 1 até a de número 8, impressas com preenchimento de 100%, e das amostras de número 9 até a de número 16, impressas com preenchimento de 25%. Nesse caso, as amostras com 100% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de tração de 47,41 MPa, já as amostras com 25% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de 23,46 MPa, cerca de 50,50% menor, comportamento parecido com o que ocorreu nas amostras em PLA.

Outra observação que pode se ter é que o PETG se mostrou um material mais elástico que o PLA, enquanto o PLA teve deformações variando de 2 a 5% o PETG chegou a deformações de mais de 100%.

4.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Os dados fornecidos pelo *software* para o ensaio de flexão foram os mesmos fornecidos para o ensaio de tração, força, deslocamento e tensões máximas, e com essas informações, foi possível calcular a média das tensões máximas de cada amostra. Na Tabela 8 estão contidos os

valores das tensões máximas de cada ensaio, assim como, a média das tensões máximas para cada amostra em PLA, e na Tabela 9, para as amostras em PETG. Com esses dados também foi possível calcular os valores das tensões e deformações, utilizando a Equação 5 e Equação 6, respectivamente, e com esses valores foram impressos os gráficos contidos na Figura 28, com valores para amostras em PLA, e na Figura 29, com valores para amostras em PETG.

Tabela 8 - Tensões de flexão máximas e tensão média de cada amostra em PLA.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			MÉDIA (MPa)
	1	2	3	
1	86,00	89,74	85,67	87,14
2	85,65	85,50	84,87	85,34
3	87,20	91,02	88,69	88,97
4	87,57	89,37	88,65	88,53
5	82,40	81,30	82,11	81,94
6	83,06	82,70	81,30	82,35
7	82,95	82,32	85,31	83,53
8	85,10	77,95	83,90	82,32
9	44,90	43,11	43,61	43,87
10	46,77	45,18	45,47	45,81
11	51,60	54,25	53,80	53,22
12	52,95	51,14	50,67	51,59
13	42,68	40,82	43,93	42,47
14	47,14	46,81	44,61	46,19
15	51,07	51,44	51,23	51,25
16	51,24	50,42	49,45	50,37

A partir da Tabela 8, é possível verificar que o valor médio da tensão máxima flexão para todas as amostras em PLA foi de 66,55 MPa, pode-se observar também que a amostra com o maior valor tensão máxima de flexão foi a amostra número 3, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 215 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular, e a amostra com o menor valor de tensão máxima de flexão foi a amostra número 13, de combinação: porcentagem de preenchimento de 25%, a temperatura de impressão 200 °C, a espessura de camada 0,2 mm e o tipo de preenchimento o triangular.

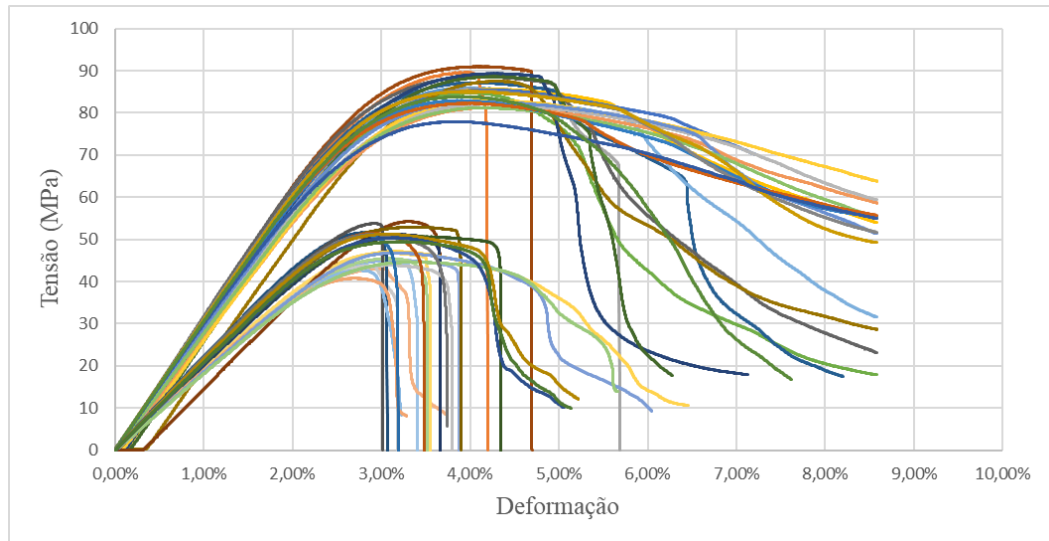


Figura 28 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PLA.

Com a Tabela 8 e a Figura 28, é possível observar a diferença entre as curvas Tensão x Deformação das amostras de número 1 até a número 8, impressas com preenchimento de 100%, e das amostras de número 9 até a de número 16, impressas com preenchimento de 25%, e o comportamento das curvas seguiu o mesmo já observado nas curvas de ensaio de tração. As amostras com 100% de preenchimento tiveram uma tensão de tração média de 85,01 MPa, já as amostras com 25% de preenchimento tiveram uma tensão média de 48,09 MPa, cerca de 43,42% menor, porcentagem bem próxima a observada nos resultados do ensaio de tração.

Tabela 9 - Tensões de flexão máximas e tensão média de cada amostra em PETG.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			MÉDIA (MPa)
	1	2	3	
1	66,19	65,35	65,28	65,61
2	64,79	65,30	63,49	64,53
3	69,71	70,72	71,14	70,52
4	72,89	71,83	72,57	72,43
5	62,77	62,25	62,65	62,56
6	61,91	60,22	61,98	61,37
7	68,05	67,32	65,60	66,99
8	67,26	65,38	64,80	65,81
9	35,49	35,58	35,70	35,59
10	37,94	37,72	37,63	37,76
11	35,90	35,98	34,83	35,57
12	38,78	39,33	39,43	39,18
13	32,99	32,61	33,15	32,92
14	34,96	35,74	35,78	35,50
15	38,93	36,78	37,00	37,57
16	38,77	38,52	38,31	38,53

A partir da Tabela 9, verifica-se que o valor médio da tensão máxima de flexão para todas as amostras em PETG foi de 51,40 MPa, 22,76% menos que a médias das amostras em PLA. Pode-se observar também que a amostra com o maior valor de tensão máxima de flexão foi a amostra número 4, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 235 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague, e a amostra com o menor valor de tensão máxima de flexão foi a amostra número 13, de combinação: porcentagem de preenchimento de 25%, a temperatura de impressão 215 °C, a espessura de camada 0,2 mm e o tipo de preenchimento o triangular.

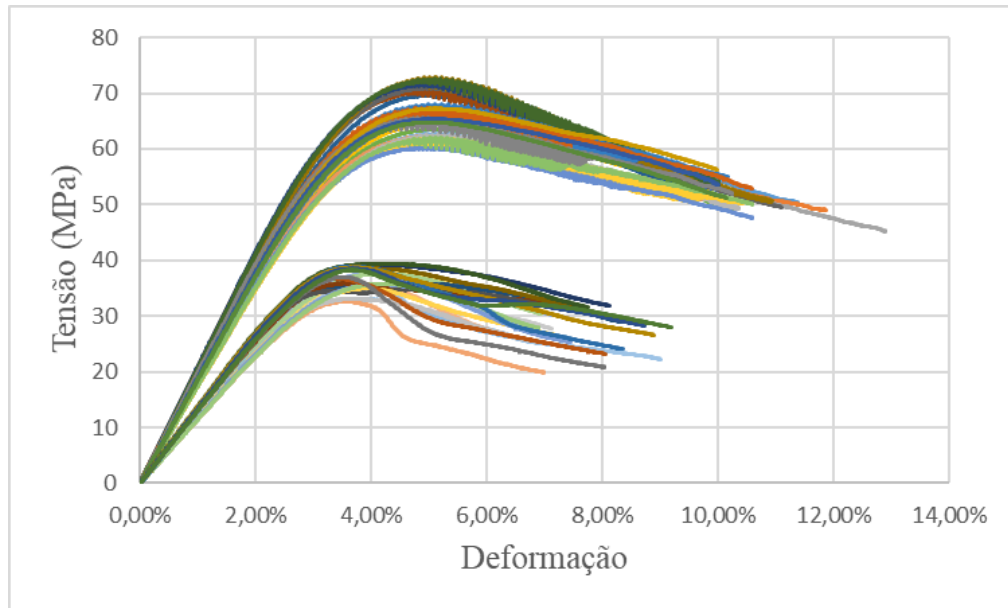


Figura 29 - Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PETG.

Com a Tabela 9 e a Figura 29 é possível observar, novamente, a diferença entre as curvas Tensão x Deformação das amostras de número 1 até a de número 8, impressas com preenchimento de 100%, e das amostras de número 9 até a de número 16, impressas com preenchimento de 25%. Nesse caso, as amostras com 100% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de flexão de 66,23 MPa, já as amostras com 25% de preenchimento tiveram um valor médio de tensão máxima de flexão de 36,58 MPa, cerca de 44,77% menor.

A partir das curvas apresentadas na Figura 28 e na Figura 29, pode-se observar que as amostras fabricadas em PETG não se romperam, diferente do que ocorreu nas amostras fabricadas em PLA, principalmente, nas amostras com 25% de preenchimento.

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos dados desse estudo envolve duas etapas, a análise de Taguchi e a análise variacional de Grey. A primeira etapa é a análise de Taguchi que envolve dois métodos. O primeiro método trata da avaliação da razão sinal-ruído, que ajuda a determinar o nível de variação para cada parâmetro. O segundo método é baseado na análise de variância (ANOVA), que é utilizada para determinar a influência de cada parâmetro. A segunda etapa será a Análise Variacional de Grey para que sejam estudados os parâmetros ótimos na combinação dos dois ensaios, de tração e de flexão.

5.1 MÉTODO TAGUCHI

5.1.1 Razão sinal-ruído tração

No processo da manufatura aditiva, um dos objetivos mais importantes é maximizar as propriedades mecânicas da peça produzida. Para esse fim, o fator de controle mais apropriado é a razão sinal-ruído “maior-melhor”, onde valores maiores indicam melhor desempenho. Essa razão é definida pela Equação 9.

Aqui está um exemplo de como a razão S/N foi determinada para o ensaio número 1 (PLA):

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{3} * \sum_{i=1}^3 \frac{1}{52,3486^2} + \frac{1}{55,6756^2} + \frac{1}{53,4504^2} \right) = 34,6112 \text{ dB}$$

A Tabela 10 apresenta os resultados da tensão máxima média para cada amostra e os S/N calculados, obtidos para as peças fabricadas em PLA.

Tabela 10 - Valores de S/N e de tensões médias para PLA.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			S/N (dB)	MÉDIA (MPa)
	1	2	3		
1	52,35	55,68	53,45	34,6112	53,82
2	52,54	50,61	51,20	34,2248	51,45
3	52,72	53,01	53,91	34,5196	53,22
4	52,83	52,98	55,54	34,6062	53,78
5	49,81	53,14	51,14	34,2039	51,36
6	53,82	53,24	52,14	34,4938	53,06
7	54,19	55,10	54,89	34,7636	54,73
8	55,73	54,12	53,96	34,7418	54,60
9	26,36	26,29	27,30	28,5102	26,65
10	32,31	30,92	29,45	29,7788	30,89
11	28,46	24,90	27,66	28,5861	27,01
12	33,58	33,35	31,99	30,3577	32,97
13	28,00	27,66	26,71	28,7678	27,46
14	33,07	31,71	29,70	29,9388	31,49
15	29,47	29,14	27,32	29,1253	28,64
16	36,12	33,91	33,45	30,7405	34,49

Ao analisar a Tabela 10, é possível identificar a amostra de número 7, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 200 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular, com o maior valor de S/N, ou seja, é a melhor amostra ensaiada. Esse resultado é corroborado pelo maior valor de tensão máxima, 54,73 MPa. Os valores de S/N para as amostras 7 e 8 são muito semelhantes, com uma pequena vantagem para a amostra número 7, ambas as amostras possuem combinação de parâmetros muito parecidas, mudando somente o tipo de preenchimento.

Na Figura 30, estão representados os valores médios dos S/N para os diferentes níveis de cada parâmetro. É possível verificar que a influência da porcentagem de preenchimento é, substancialmente, maior devido à grande variação observada no teste ao passar de 25% para 100%. É possível observar também que o segundo parâmetro de maior influência no valor de S/N é o tipo de preenchimento.

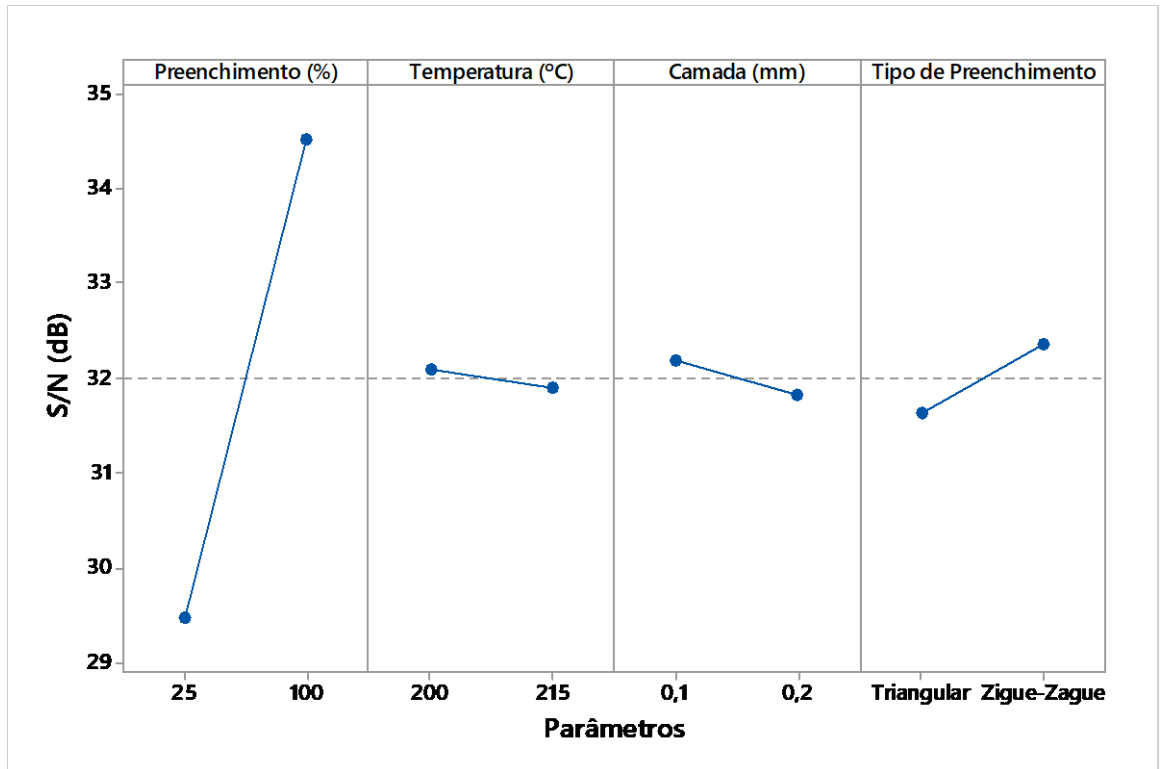


Figura 30 - Valores médios de S/N para ensaios PLA.

Outra comparação possível está relacionada com a média total das tensões de cada amostra. Na Figura 31, é apresentada a média total da tensão para cada amostra.

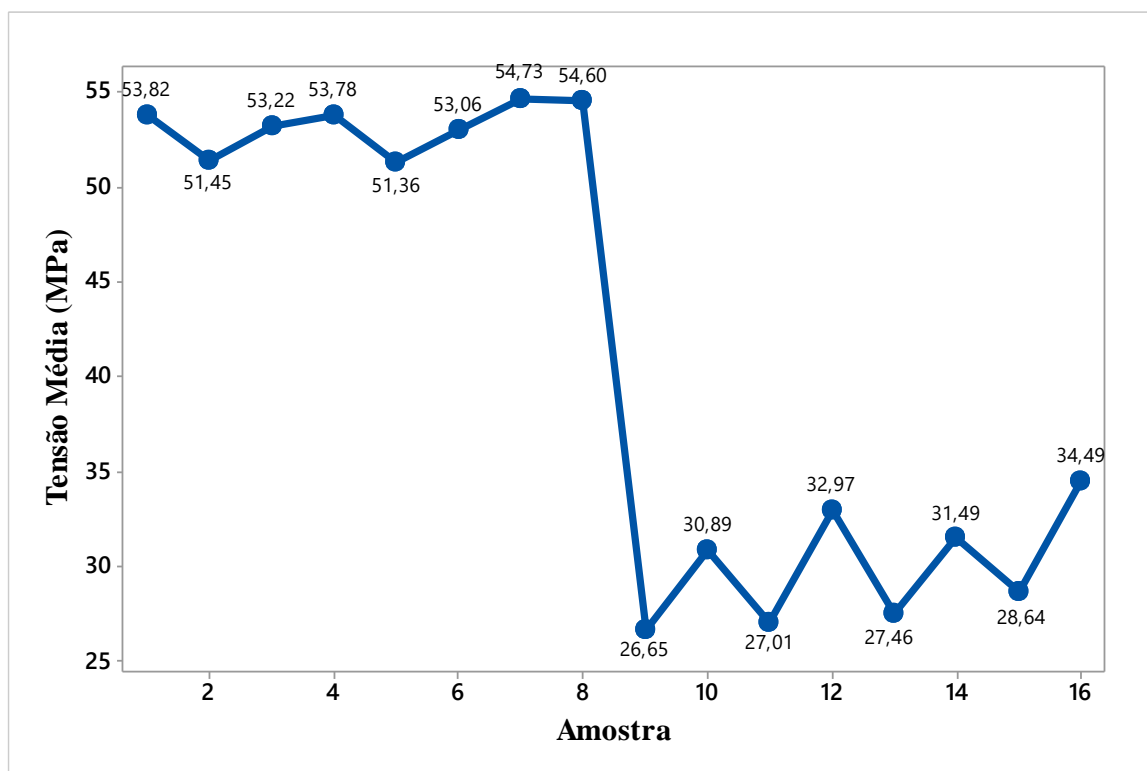


Figura 31 - Valores de tensão média para os ensaios PLA.

Os resultados mostram um melhor desempenho para a amostra número 7, com um valor médio de tensão máxima de 54,73 MPa, e, próximo a este, a amostra de número 8, com valores quase idênticos. Isso corrobora com a análise apresentada anteriormente.

Com a Figura 30 é possível obter a combinação ótima dos parâmetros a partir do método de Taguchi, para este caso, ensaio de tração para os espécimes em PLA, essa combinação ótima é a seguinte: porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão 200 °C, espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague. Essa é a combinação da amostra de número 8, esse resultado não coincide com a amostra de maior valor de S/N observado na Tabela 10, como já foi analisado anteriormente, o único parâmetro que difere nessas duas amostras, 7 e 8, é o tipo de preenchimento.

Seguindo o mesmo procedimento, é possível realizar a análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração realizados com as amostras em PETG. A Tabela 11 apresenta os resultados da tensão máxima média para cada amostra e os S/N calculados, obtidos para as peças fabricadas em PETG.

Tabela 11 - Valores de S/N e de tensões médias para PETG.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			S/N (dB)	MÉDIA (MPa)
	1	2	3		
1	47,16	45,64	46,62	33,3414	46,47
2	47,54	47,92	47,25	33,5458	47,57
3	49,52	50,74	49,75	33,9791	50,01
4	51,61	51,03	47,21	33,9504	49,95
5	48,03	46,54	45,52	33,3795	46,70
6	45,59	45,25	45,38	33,1420	45,41
7	48,21	47,65	47,67	33,5958	47,84
8	46,33	46,57	43,16	33,1162	45,35
9	20,05	19,78	18,66	25,7860	19,50
10	25,74	24,11	24,69	27,8963	24,85
11	23,60	22,40	23,98	27,3451	23,32
12	26,19	26,18	26,00	28,3412	26,13
13	20,63	20,45	20,61	26,2611	20,56
14	23,87	24,05	23,59	27,5439	23,84
15	21,47	24,05	23,11	27,1591	22,88
16	27,03	26,74	25,96	28,4862	26,58

Ao analisar a Tabela 11, é possível identificar a amostra de número 3, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 235 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular, com o maior valor de S/N. Esse resultado é, novamente, corroborado pelo maior valor de tensão máxima. Os valores de S/N para as amostras 3 e 4 são muito semelhantes, com uma pequena vantagem para a amostra número 3 e, assim como analisado nos resultados do PLA, ambas as amostras possuem combinação de parâmetros muito parecidas, mudando somente o tipo de preenchimento.

Na Figura 32, estão representados os valores médios dos S/N para os diferentes níveis dos parâmetros. É possível verificar que, novamente, a influência da porcentagem de preenchimento é substancialmente maior, devido à grande variação observada no teste ao passar de 100% para 25%. É possível observar também que, nesse caso, o tipo de preenchimento e a espessura de camada possuem a mesma influência no valor de S/N.

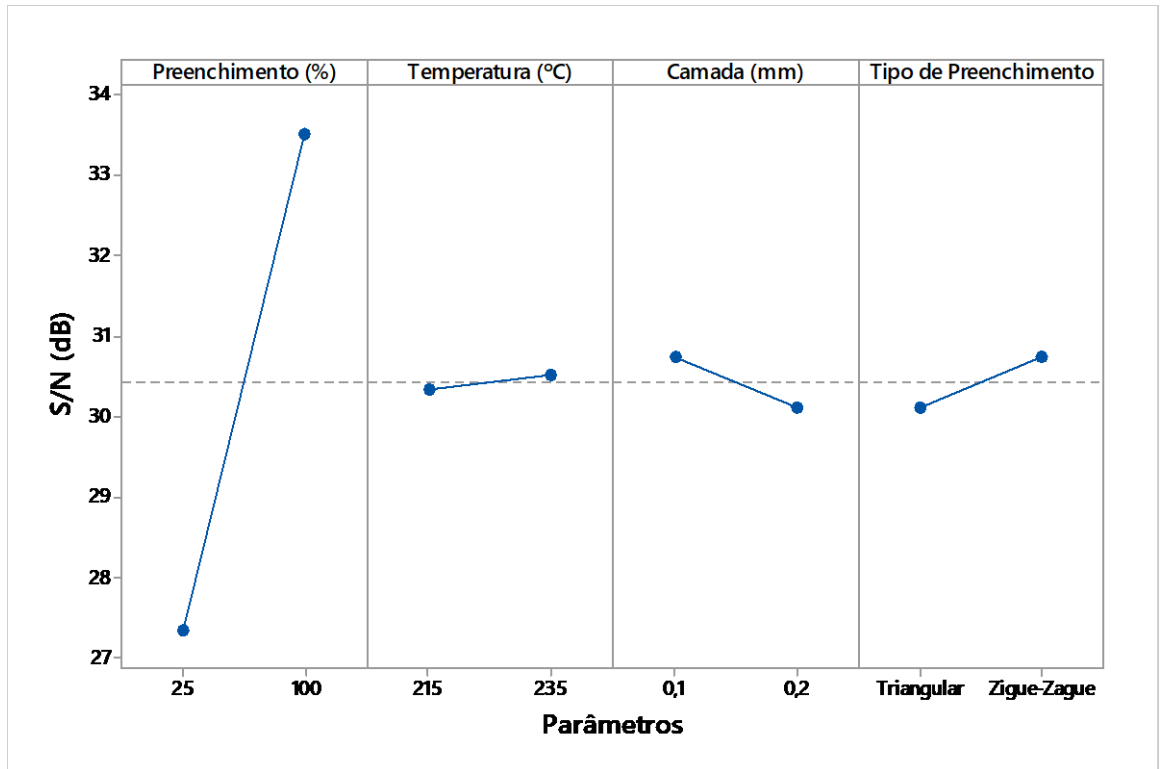


Figura 32 - Valores médios de S/N para ensaios PETG.

Seguindo agora para a comparação da média total das tensões de cada amostra. Na Figura 33 é apresentada a média total da tensão para cada amostra.

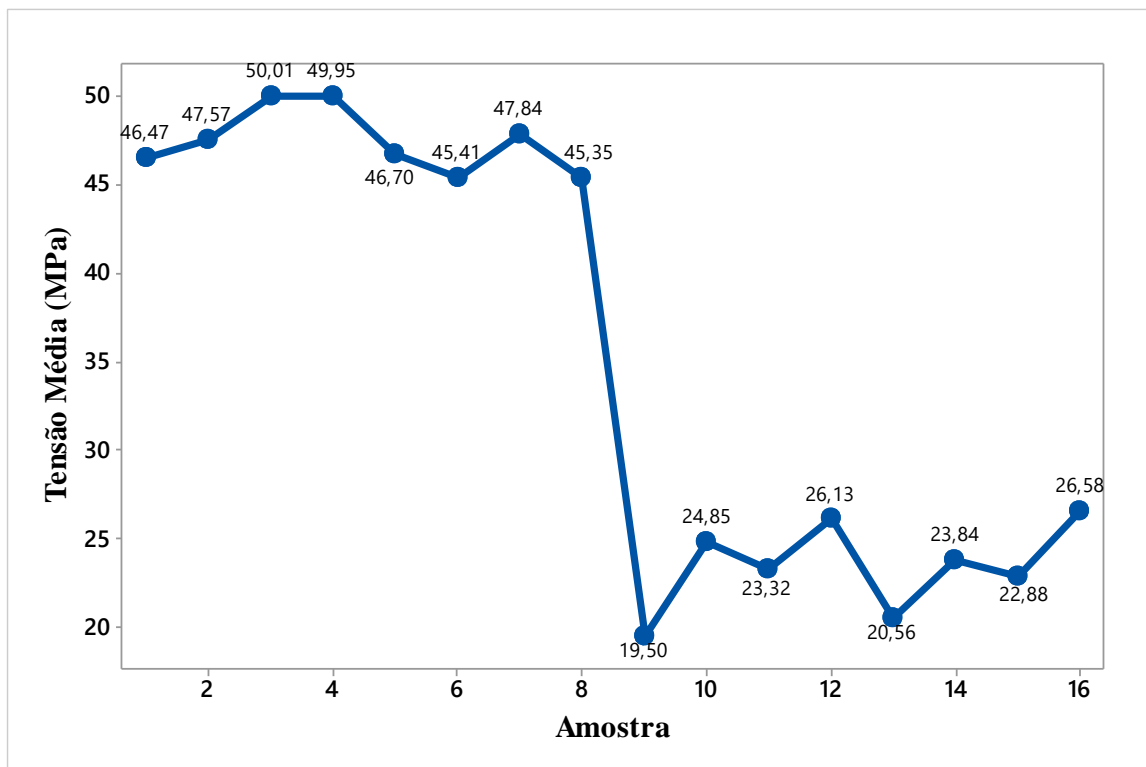


Figura 33 - Valores de tensão média para os ensaios PETG.

Os resultados mostram um melhor desempenho para a amostra de número 3, com um valor médio da tensão máxima de 50,01 MPa e, próximo a este, a amostra de número 4, com valores quase idênticos. Isso corrobora com a análise apresentada anteriormente.

Com a Figura 32 é possível obter a combinação ideal dos parâmetros a partir do método de Taguchi, para este caso, ensaio de tração para os espécimes em PETG, assim a combinação ótima é a seguinte: porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão 235 °C, espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague. Essa é a combinação da amostra de número 4, esse resultado não coincide com a amostra de maior valor de S/N observado na Tabela 11, como já foi analisado anteriormente, o único parâmetro que difere nessas duas amostras, 3 e 4, é o tipo de preenchimento. Esse comportamento, que já foi observado no ensaio de tração das amostras em PLA, ocorre devido à elevada influência que o parâmetro “porcentagem de preenchimento” tem sobre o comportamento desses materiais, isso será mais detalhado no item 5.1.1.1.

5.1.1.1 Análise ANOVA tração

A análise de variância (ANOVA) foi, inicialmente, realizada utilizando os valores de S/N dos ensaios de tração dos corpos de prova fabricados com PLA. A segunda análise será realizada considerando os valores de S/N dos ensaios de tração fabricados com PETG.

A análise foi conduzida utilizando os valores de S/N referentes às tensões dos ensaios de tração, uma vez que o principal objetivo é identificar os parâmetros mais influentes nas características mecânicas das peças produzidas. Este estudo baseia-se na análise de variância (ANOVA) da tensão máxima, utilizando o *software* estatístico *Minitab 17*. Os dados para esta análise, corpos de prova em PLA, estão apresentados na Tabela 10, enquanto os resultados da ANOVA são representados na Tabela 12.

Nas tabelas subsequentes, os termos "GL" representam os graus de liberdade, "SQ" a soma dos quadrados, "QM" a média dos quadrados e o "Valor F" e "Valor P" são ferramentas estatísticas utilizadas para determinar quais são os parâmetros que têm maior influência na característica de qualidade estudada. O "QM" é calculado pela divisão do "SQ" pelo número de graus de liberdade (GL).

Tabela 12 - Valores da ANOVA para ensaio de tração PLA.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	101,8070	101,8070	437,6700	0,0000	95,01
Temperatura (°C)	1	0,1560	0,1560	0,6700	0,4300	0,15
Camada (mm)	1	0,5300	0,5300	2,2800	0,1590	0,49
Tipo de preenchimento	1	2,0990	2,0990	9,0200	0,0120	1,96
Erro residual	11	2,5590	0,2330			2,39
Total	15	107,1500				100,00

A partir da Tabela 12 é possível verificar que o parâmetro de maior influência no comportamento mecânico das peças impressas em PLA, é a porcentagem de preenchimento, com uma influência de cerca de 95%. Os demais parâmetros, inclusive o erro, possuem uma influência mínima nas características mecânicas do material, se comparado a porcentagem de preenchimento.

Seguindo para a análise do ensaio de tração das peças fabricadas em PETG, a Tabela 13 apresenta os resultados da ANOVA, obtidos a partir dos dados contidos na Tabela 11.

Tabela 13 - Valores da ANOVA para ensaio de tração PETG.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	151,4830	151,4830	461,5000	0,0000	95,56
Temperatura (°C)	1	0,1410	0,1410	0,4300	0,5260	0,09
Camada (mm)	1	1,6110	1,6110	4,9100	0,0490	1,02
Tipo de preenchimento	1	1,6740	1,6740	5,1000	0,0450	1,06
Erro residual	11	3,6110	0,3280			2,28
Total	15	158,5190				100,00

A partir da Tabela 13, é possível verificar que o parâmetro de maior influência no comportamento mecânico das peças impressas em PETG, é, assim como no caso do PLA, a porcentagem de preenchimento, com uma influência de cerca de 95,56%. Os demais parâmetros, também seguiram o mesmo comportamento observado nos resultados do PLA e possuem uma influência mínima nas características mecânicas do material, se comparado a porcentagem de preenchimento.

A expressiva influência da “porcentagem de preenchimento” encontrada a partir da análise ANOVA para ambos os materiais, PLA e PETG, se deu por conta dos níveis selecionados para esse parâmetro, 100 e 25%, como as amostras impressas com 100% de preenchimento são muito densas não foi possível verificar a real influência dos outros parâmetros analisados.

A partir dessa observação, foi decidido fazer uma análise separada das amostras, foram analisadas as amostras com porcentagem de 100% de preenchimento, amostras de 1 a 8, e as amostras de 25% de preenchimento, amostras de 9 a 16. Com esses resultados foi obtido que, para as amostras com 100% de preenchimento, o parâmetro “tipo de preenchimento” foi o parâmetro de menor influência para os dois materiais, enquanto os parâmetros de maior influência, foram a “espessura da camada” para o PLA, com 48,26% de influência, e a “temperatura de impressão” para o PETG, com 41,31% de influência sobre os resultados. Já para as amostras com 25% de preenchimento o parâmetro de maior influência nos resultados foi o “tipo de preenchimento” tanto para o PLA, com 84,34% de influência, quanto para o PETG, com 65,06% de influência.

Esta nova análise explica o porquê, no resultado do método de Taguchi, a combinação ótima não coincidiu com a amostra de maior valor de S/N, pois mesmo com a influência da “porcentagem de preenchimento” o método Taguchi identificou a influência de um outro parâmetro, no caso, o “tipo de preenchimento”, em parte das amostras. Isto valida a eficiência desse método de estudo, especialmente se combinado com a análise ANOVA.

5.1.2 Razão sinal-ruído flexão

O cálculo da razão sinal-ruído para os ensaios de flexão, seguiu o mesmo procedimento realizado para o estudo dos ensaios de tração.

A Tabela 14 apresenta os resultados do valor médio para das tensões máximas para cada amostra e os S/N calculados, obtidos para as peças fabricadas em PLA.

Tabela 14 - Valores de S/N e de tensões médias para PLA.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			S/N (dB)	MÉDIA (MPa)
	1	2	3		
1	86,00	89,74	85,67	38,7984	87,14
2	85,65	85,50	84,87	38,6230	85,34
3	87,20	91,02	88,69	38,9809	88,97
4	87,57	89,37	88,65	38,9412	88,53
5	82,40	81,30	82,11	38,2690	81,94
6	83,06	82,70	81,30	38,3126	82,35
7	82,95	82,32	85,31	38,4333	83,53
8	85,10	77,95	83,90	38,2904	82,32
9	44,90	43,11	43,61	32,8398	43,87
10	46,77	45,18	45,47	33,2161	45,81
11	51,60	54,25	53,80	34,5146	53,22
12	52,95	51,14	50,67	34,2459	51,59
13	42,68	40,82	43,93	32,5507	42,47
14	47,14	46,81	44,61	33,2823	46,19
15	51,07	51,44	51,23	34,1930	51,25
16	51,24	50,42	49,45	34,0404	50,37

Ao analisar a Tabela 14, é possível identificar a amostra número 3, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 215 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o triangular, com o maior valor de S/N. Este resultado é corroborado pelo maior valor de tensão máxima. Os valores de S/N para as amostras 3 e 4 são muito semelhantes, com uma pequena vantagem para a amostra número 3, ambas as amostras possuem combinação de parâmetros muito parecidas, mudando somente o tipo de preenchimento.

Na Figura 34, estão representados os valores médios dos S/N para os diferentes níveis dos parâmetros. É possível verificar que a influência da porcentagem de preenchimento continua sendo maior devido à grande variação observada no teste ao passar de 100% para 25%. É, também, possível observar que o segundo parâmetro de maior influência no valor de S/N corresponde à espessura de camada.

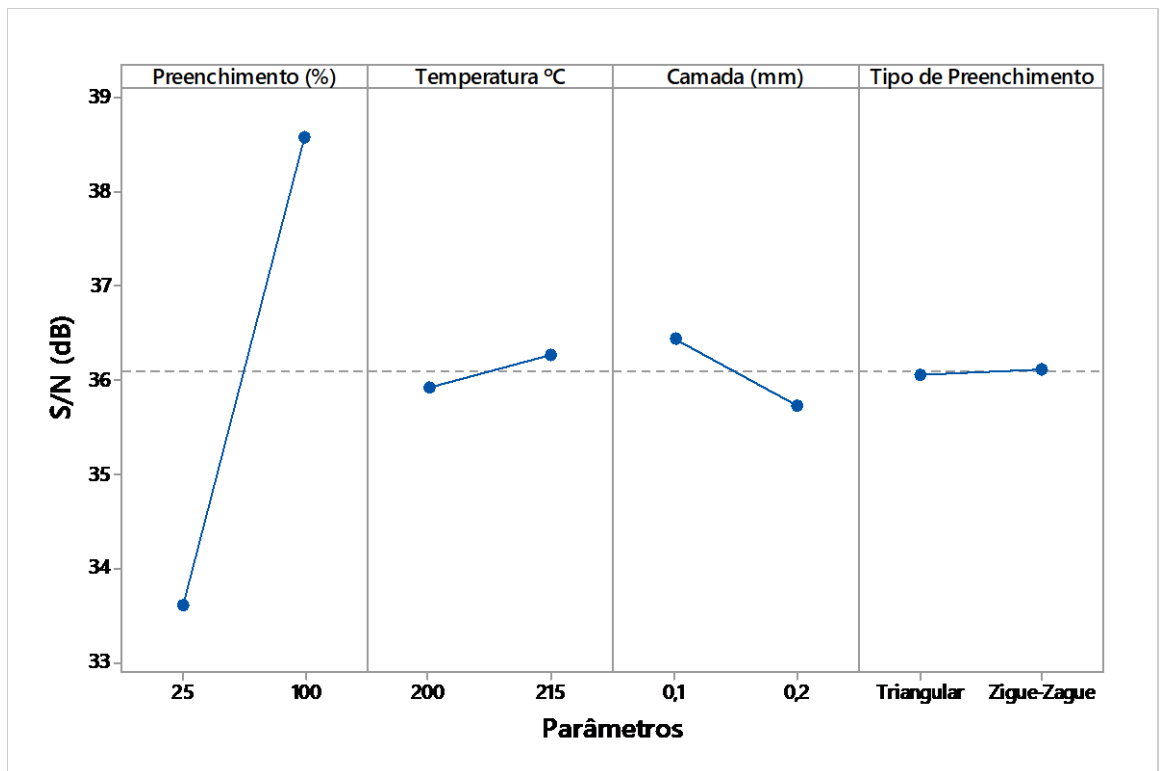


Figura 34 - Valores médios de S/N para ensaios de PLA.

Outra comparação possível está relacionada com a média total das tensões de cada amostra. Na Figura 35, é apresentada a média total da tensão para cada amostra.

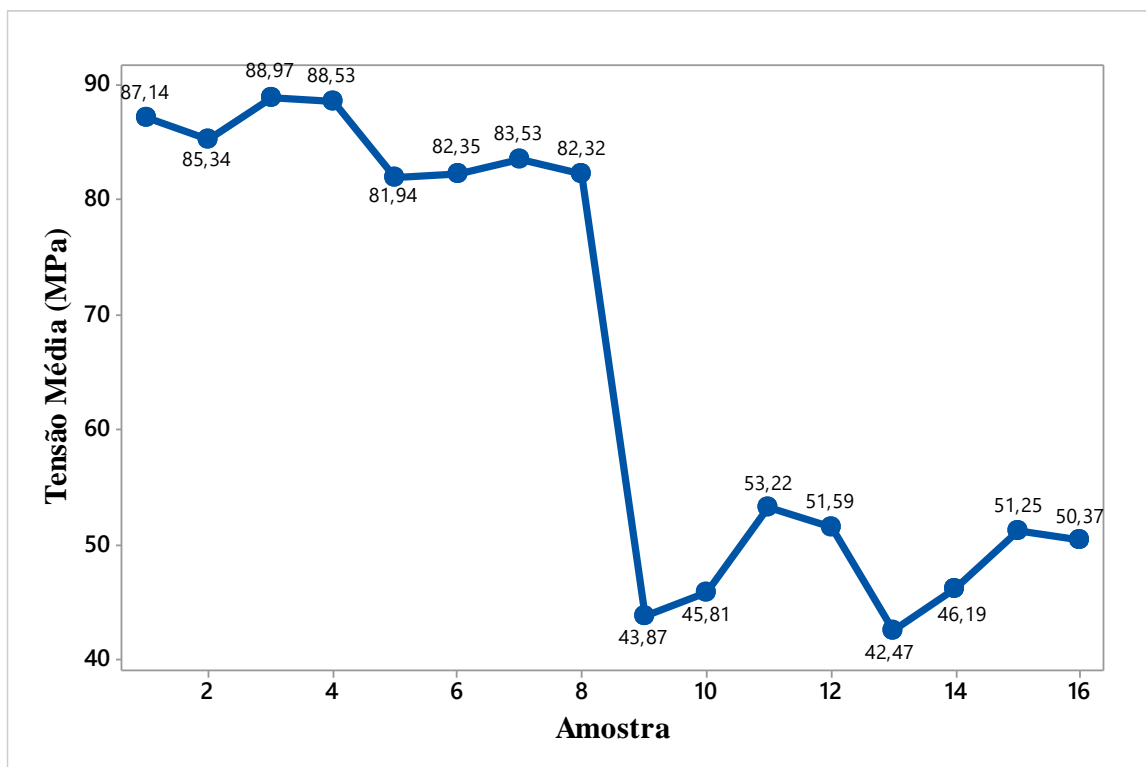


Figura 35 - Valores de tensão média para os ensaios PLA.

Os resultados mostram um melhor desempenho para a amostra número 3, com um valor de médio de tensão máxima de 88,97 MPa, e, próximo a este, a amostra número 4, com valores quase idênticos. Isso corrobora com a análise apresentada anteriormente.

Com a Figura 34 é possível obter a combinação ideal dos parâmetros a partir do método de Taguchi, para esse caso, ensaio de flexão para os espécimes em PLA, essa combinação ideal é a seguinte: porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão 215 °C, espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague. Essa é a combinação da amostra de número 4, esse resultado não coincide com o maior valor de S/N observado na Tabela 14, como já foi analisado anteriormente o único parâmetro que difere nessas duas amostras, 3 e 4, é o tipo de preenchimento.

Seguindo o mesmo procedimento, é possível realizar a análise dos resultados obtidos nos ensaios de flexão realizados com o PETG. A Tabela 15 apresenta os resultados da tensão máxima média para cada amostra e os S/N calculados, obtidos para as peças fabricadas em PETG.

Tabela 15 - Valores de S/N e de tensões médias para PETG.

AMOSTRA	ENSAIO (MPa)			S/N (dB)	MÉDIA (MPa)
	1	2	3		
1	66,19	65,35	65,28	36,3389	65,61
2	64,79	65,30	63,49	36,1928	64,53
3	69,71	70,72	71,14	36,9656	70,52
4	72,89	71,83	72,57	37,1979	72,43
5	62,77	62,25	62,65	35,9253	62,56
6	61,91	60,22	61,98	35,7572	61,37
7	68,05	67,32	65,60	36,5174	66,99
8	67,26	65,38	64,80	36,3631	65,81
9	35,49	35,58	35,70	31,0262	35,59
10	37,94	37,72	37,63	31,5411	37,76
11	35,90	35,98	34,83	31,0189	35,57
12	38,78	39,33	39,43	31,8609	39,18
13	32,99	32,61	33,15	30,3474	32,92
14	34,96	35,74	35,78	31,0019	35,50
15	38,93	36,78	37,00	31,4882	37,57
16	38,77	38,52	38,31	31,7165	38,53

Ao analisar a Tabela 15, é possível identificar a amostra de número 4, de combinação: porcentagem de preenchimento de 100%, a temperatura de impressão 235 °C, a espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague, com o maior valor de S/N. Esse resultado é corroborado pelo maior valor de tensão máxima. Os valores de S/N para as amostras 4 e 3 são muito semelhantes, com uma pequena vantagem para a amostra número 4, e, assim como analisado nos resultados do PLA, ambas as amostras possuem combinação de parâmetros muito parecidas, mudando somente o tipo de preenchimento.

Na Figura 36, estão representados os valores médios dos S/N para os diferentes níveis dos parâmetros. É possível verificar que, mais uma vez, a influência da porcentagem de preenchimento é maior, devido à grande variação observada no teste ao passar de 100% para 25%. É possível observar também que a espessura de camada tem a segunda maior variação.

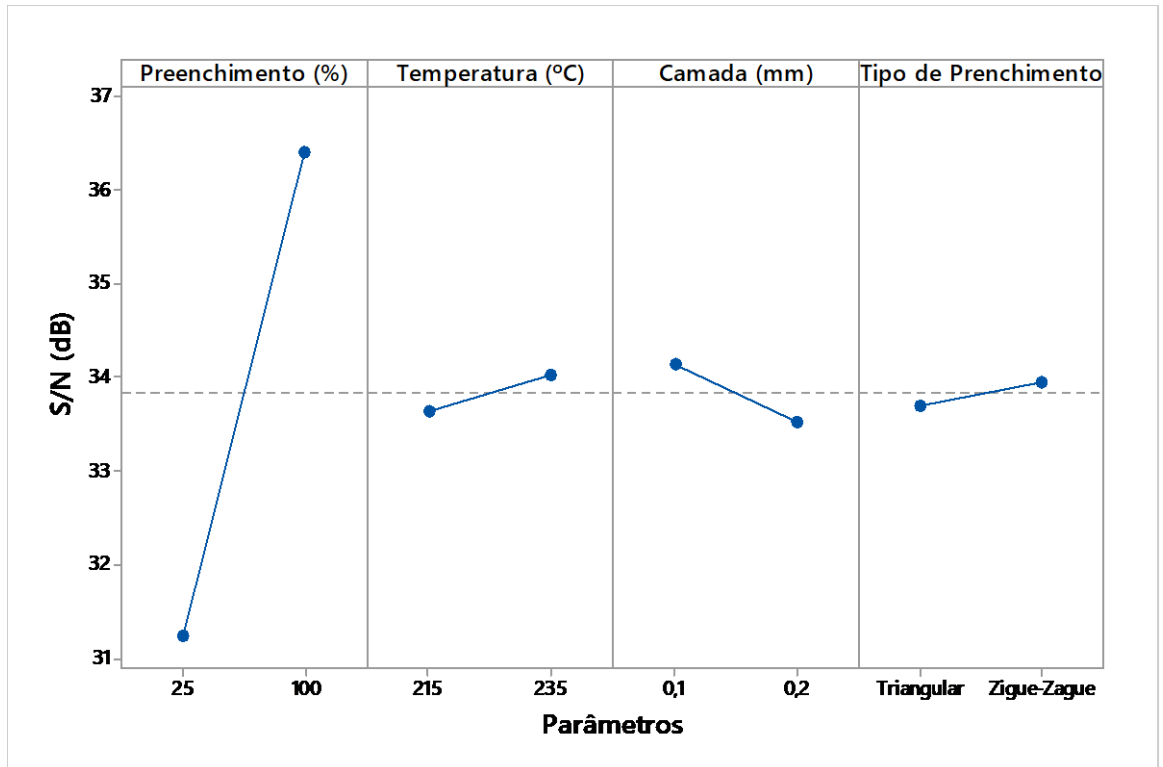


Figura 36 - Valores médios de S/N para ensaios PETG.

Com a Figura 36 é possível obter a combinação ideal dos parâmetros a partir do método de Taguchi, para esse caso, ensaio de flexão para os espécimes em PETG, essa combinação ideal é a seguinte: porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão 235 °C, espessura de camada 0,1 mm e o tipo de preenchimento o zigue-zague. Essa é a combinação da amostra de número 4, que coincide com o maior valor de S/N observado na Tabela 15.

Seguindo agora para a comparação da média total das tensões de cada amostra. Na Figura 37 é apresentada a média total da tensão para cada amostra.

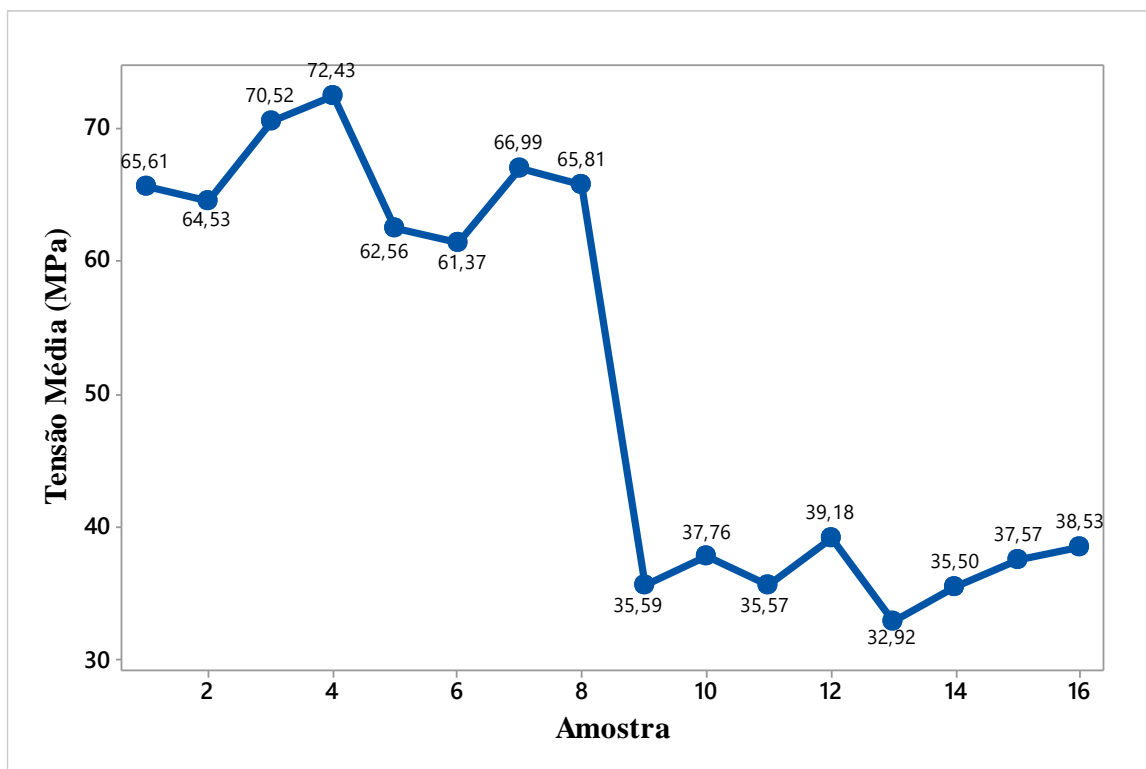


Figura 37 - Valores de tensão média para os ensaios PETG.

Os resultados mostram um melhor desempenho para a amostra de número 4, com um valor médio de tensão máxima de 72,43 MPa, e, próximo a este, a amostra de número 3, com valores bem próximos. Isso corrobora com a análise apresentada anteriormente.

Outra observação que pode ser feita analisando todas as figuras que a apresentam as tensões médias (Figura 31, Figura 33, Figura 35 e Figura 37), é que a partir da amostra 9 existe uma grande queda no valor médio da tensão máxima, essa queda se dá pelo fato de que a partir da amostra 9 a porcentagem de preenchimento deixa de ser de 100% e passa a ser de 25%, e, como já foi analisado, esse é o parâmetro com mais influência nos valores de tensão e isso se torna evidente ao analisarmos essas curvas de tensão.

5.1.2.1 Análise ANOVA flexão

A análise ANOVA de flexão foi realizada nos mesmos moldes da análise de tração, inicialmente, foi realizado o estudo dos espécimes fabricados em PLA e depois foram estudados os espécimes fabricados em PETG.

Dessa vez, análise foi conduzida utilizando os valores de S/N referentes as tensões dos ensaios de flexão. Os dados para esta análise, corpos de prova em PLA, estão apresentados na Tabela 14, enquanto os resultados da ANOVA são representados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores da ANOVA para ensaio de flexão PLA.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	98,8330	98,8330	610,5700	0,0000	95,79
Temperatura (°C)	1	0,4860	0,4859	3,0000	0,1110	0,47
Camada (mm)	1	2,0650	2,0647	12,7600	0,0040	2,00
Tipo de preenchimento	1	0,0090	0,0087	0,0500	0,8210	0,01
Erro residual	11	1,7810	0,1619			1,73
Total	15	103,1730				100,00

A partir da Tabela 16 é possível verificar que, assim como observado nas análises dos resultados dos ensaios de tração, o parâmetro de maior influência no comportamento mecânico das peças impressas em PLA, é a porcentagem de preenchimento, com uma influência de cerca de quase 96%. A diferença é que a espessura de camada demonstrou ser mais influente nos resultados, no ensaio de tração esse parâmetro tinha 0,49% de influência, já no ensaio de flexão a influência desse parâmetro aumentou cerca de 308%, passando para uma influência de 2%.

Seguindo para a análise do ensaio de flexão das peças fabricadas em PETG, a Tabela 17 apresenta os resultados da ANOVA, obtidos a partir dos dados contidos na Tabela 15.

Tabela 17 - Valores da ANOVA para ensaio de flexão PETG.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	106,3840	106,3840	1188,6100	0,0000	96,93
Temperatura (°C)	1	0,5720	0,5720	6,3900	0,0280	0,52
Camada (mm)	1	1,5610	1,5610	17,4400	0,0020	1,42
Tipo de preenchimento	1	0,2510	0,2510	2,800	0,1220	0,23
Erro residual	11	0,9850	0,0900			0,90
Total	15	109,7530				100,00

A partir da Tabela 17 é possível verificar que o parâmetro de maior influência no comportamento mecânico das peças impressas em PETG, é, assim como no caso do PLA, a porcentagem de preenchimento, com uma influência de 96,93%.

Após essas análises ficou evidente que, para ambos os ensaios, tração e flexão, e ambos os materiais, PLA e PETG, o parâmetro que mais influência no comportamento mecânico dos espécimes é a porcentagem de preenchimento, e pode-se observar também que a influência da espessura de camada teve um aumento significativo no ensaio de flexão, mesmo mantendo-se com uma porcentagem de influência consideravelmente baixa, se comparado com a porcentagem de preenchimento.

A partir dessa observação, a alta influência da porcentagem de preenchimento, foi decidido realizar uma análise separada das amostras, mais uma vez, foram analisadas as amostras com porcentagem de 100% de preenchimento, amostras de 1 a 8, e as amostras de 25% de preenchimento, amostras de 9 a 16. Como resultado foi obtido que, para as amostras com 100% de preenchimento, a parâmetro “tipo de preenchimento” foi o parâmetro de menor influência para os dois materiais, enquanto os parâmetros de maior influência foram a “temperatura de impressão” para o PLA, com 84,53% de influência, e a “espessura da camada” para o PETG, com 60,43% de influência sobre os resultados. Já para as amostras com 25% de preenchimento o parâmetro de maior influência nos resultados foi o “espessura de camada” para o PLA, com 87,44% de influência, e o “tipo de preenchimento” para o PETG, com 36,62% de influência, e no caso do PETG o segundo parâmetro de maior influência foi a “espessura de camada” com 34,32% de influência, por isso, para esse material a combinação ideal de Taguchi coincidiu o a amostra de maior S/N.

5.2 ANÁLISE RELACIONAL DE GREY

5.2.1 Análise relacional de Grey PLA

De acordo com o método da Análise Relacional de Grey, é fundamental utilizar os valores da razão S/N dos ensaios de tração e flexão calculados para as peças fabricadas em PLA, os quais foram obtidos por meio do método de Taguchi, conforme é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores da razão S/N para PLA.

Amostra	S/N ensaio de tração (dB)	S/N ensaio de flexão (dB)
1	34,6112	38,7984
2	34,2248	38,6230
3	34,5196	38,9809
4	34,6062	38,9412
5	34,2039	38,2690
6	34,4938	38,3126
7	34,7636	38,4333
8	34,7418	38,2904
9	28,5102	32,8398
10	29,7788	33,2161
11	28,5861	34,5146
12	30,3577	34,2459
13	28,7678	32,5507
14	29,9388	33,2823
15	29,1253	34,1930
16	30,7405	34,0404

A primeira etapa da análise relacional de Grey consiste em reprocessar os dados para normalizar os resultados. Essa etapa tem como objetivo eliminar os efeitos das variações das respostas e torná-las adimensionais, padronizando os resultados em uma escala de 0 a 1. A normalização é realizada utilizando a Equação 11 (para a característica "maior é melhor"), pois, como mencionado anteriormente, ao normalizar a razão S/N, é desejável alcançar o maior valor possível. Os valores normalizados dos resultados estão apresentados na Tabela 19.

A seguir, segue um exemplo de como foi calculado o valor da razão S/N normalizado do ensaio de tração para a amostra 1.

$$x_{ij} = \frac{34,6112 - 28,5102}{34,7636 - 28,5102} = 0,9756$$

Tabela 19 - Valores de S/N normalizados para ensaios PLA.

Amostra	S/N normalizado ensaio de tração	S/N normalizado ensaio de flexão
1	0,9756	0,9716
2	0,9138	0,9443
3	0,9610	1,0000
4	0,9748	0,9938
5	0,9105	0,8893
6	0,9568	0,8961
7	1,0000	0,9148
8	0,9965	0,8926
9	0,0000	0,0450
10	0,2029	0,1035
11	0,0121	0,3054
12	0,2954	0,2636
13	0,0412	0,0000
14	0,2284	0,1138
15	0,0984	0,2554
16	0,3566	0,2317

Em seguida, o coeficiente relacional de Grey foi calculado utilizando os valores da Tabela 19 e a Equação 14. Para este cálculo, inicialmente, determina-se o $x_i^0 - x_{ij}$, que representa a diferença entre o valor da sequência ideal (a sequência ideal indica o valor ótimo da normalização da razão sinal-ruído, ou seja, o resultado ideal para a razão S/N) e o valor normalizado obtido para cada experimento e cada resposta analisada. Os valores calculados de $x_i^0 - x_{ij}$ estão registrados na Tabela 20. Com base nesses valores, os coeficientes relacionais de Grey foram determinados e apresentados na Tabela 21. Neste estudo, o valor do coeficiente distintivo (ζ) utilizado foi de 0,7 para os resultados do ensaio de tração e 0,3 para os resultados do ensaio de flexão. Esse maior grau de influência, considerado para os resultados do ensaio de tração, se dá pelo fato das peças impressas em 3D serem projetadas para suportar cargas, predominantemente, de tração ou de compressão em vez de cargas de flexão. Assim, o ensaio de tração tem um maior peso nas condições reais de utilização dessas peças.

A seguir, segue um exemplo de como foi calculado o coeficiente relacional de Grey para a amostra número 1 do ensaio de tração.

$$\xi_{ij} = \frac{|0| + 0,7 * |1|}{|0,0244| + 0,7 * |1|} = 0,9663$$

Tabela 20 - Valores de $x_i^0 - x_{ij}$ para PLA.

Amostra	$x_i^0 - x_{ij}$ ensaio de tração	$x_i^0 - x_{ij}$ ensaio de flexão
1	0,0244	0,0284
2	0,0862	0,0557
3	0,0390	0,0000
4	0,0252	0,0062
5	0,0895	0,1107
6	0,0432	0,1039
7	0,0000	0,0852
8	0,0035	0,1074
9	1,0000	0,9550
10	0,7971	0,8965
11	0,9879	0,6946
12	0,7046	0,7364
13	0,9588	1,0000
14	0,7716	0,8862
15	0,9016	0,7446
16	0,6434	0,7683

Tabela 21 - Valores do coeficiente relacional de Grey para PLA

Amostra	Coeficiente relacional de Grey para ensaio de tração	Coeficiente relacional de Grey para ensaio de flexão
1	0,9663	0,9136
2	0,8904	0,8435
3	0,9472	1,0000
4	0,9653	0,9798
5	0,8866	0,7304
6	0,9419	0,7427
7	1,0000	0,7789
8	0,9950	0,7364
9	0,4118	0,2390
10	0,4676	0,2507
11	0,4147	0,3016
12	0,4984	0,2895
13	0,4220	0,2308
14	0,4757	0,2529
15	0,4371	0,2872
16	0,5211	0,2808

Por último, com base na Tabela 21 e utilizando a Equação 15, é possível calcular o grau relacional de Grey, como pode ser observado na Tabela 22, nessa tabela também é possível observar a ordem dos resultados, onde o número 1 representa o maior valor de grau relacional de Grey e o 16 o menor valor, esses valores coincidiram com as amostras 3 e 9, respectivamente.

Segue um exemplo de como foi calculado o grau relacional de Grey para a amostra de número 1 fabricada em PLA.

$$y_i = \frac{1}{2} * (0,9663 + 0,9136) = 0,9400$$

Tabela 22 - Valores para o Grau relacional de Grey para PLA.

Amostra	Grau relacional de Grey	Ordem
1	0,9400	3
2	0,8670	6
3	0,9736	1
4	0,9726	2
5	0,8085	8
6	0,8423	7
7	0,8894	4
8	0,8657	5
9	0,3254	16
10	0,3591	13
11	0,3582	14
12	0,3939	10
13	0,3264	15
14	0,3643	11
15	0,3621	12
16	0,4009	9

Assim, chegamos à Tabela 23, que apresenta a média do grau relacional de Grey para cada nível, além da média total. Com base nessas informações podemos identificar a melhor combinação, lembrando que quanto maior o valor do grau relacional de Grey, melhor será a combinação.

Tabela 23 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.

Parâmetros	Grau relacional de Grey			Média total
	Nível 1	Nível 2	Máx-Mín	
% Preenchimento	0,8949	0,3613	0,5336	0,628
Temperatura	0,6487	0,6075	0,0412	
Camada	0,6041	0,6521	0,0479	
Tipo de preenchimento	0,6230	0,6332	0,0103	

Na Tabela 23, podemos observar que a melhor combinação é a porcentagem de preenchimento nível 1, temperatura nível 1, espessura de camada nível 2 e tipo de preenchimento nível 2, o que significa que os parâmetros ótimos obtidos a partir da análise relacional de Grey são, a porcentagem de preenchimento é de 100%, a temperatura de 215°C a

espessura de camada de 0,1 mm, e o tipo de preenchimento é o Zigue-Zague. Para facilitar a visualização dos valores da Tabela 23, eles são apresentados graficamente na Figura 38.

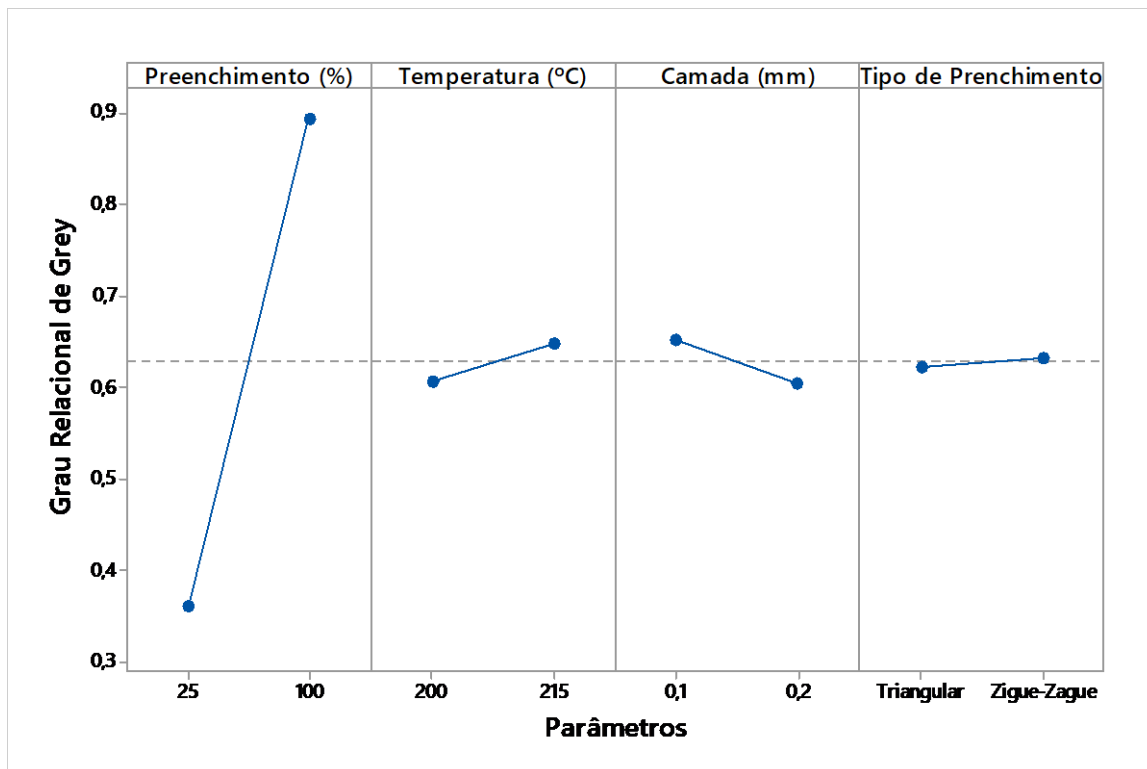


Figura 38 - Resposta da análise relacional de Grey.

Como observado na Tabela 23 e na Figura 38, a combinação ótima dos parâmetros não coincidiu com a amostra de maior valor de Grau Relacional de Grey, enquanto a combinação ótima corresponde à combinação de parâmetros da amostra 4, a amostra e maior valor de Grau Relacional de Grey é a amostra 3, esse comportamento já foi observado nas análises realizadas pelo método de Taguchi e a explicação para essa divergência é a mesma, as amostras impressas com 100% de preenchimento, por serem muito densas, resultaram numa porcentagem de influência muito alta, não permitindo uma análise fidedigna dos demais parâmetros, esse assunto é mais detalhado no tópico 5.2.1.1.

5.2.1.1 Análise ANOVA PLA

Dessa vez, análise foi conduzida utilizando os valores do Grau Relacional de Grey obtidos a partir dos ensaios de tração e de flexão realizados nas peças em PLA. Os dados para

esta análise, amostras em PLA, estão apresentados na Tabela 22, enquanto os resultados da ANOVA são representados na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores da ANOVA da análise relacional de Grey para PLA.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	1,1389	1,1389	841,3400	0,0000	97,32
Temperatura (°C)	1	0,0068	0,0068	5,0300	0,0470	0,58
Camada (mm)	1	0,0092	0,0092	6,7900	0,0240	0,79
Tipo de preenchimento	1	0,0004	0,0004	0,3100	0,5870	0,04
Erro residual	11	0,0149	0,0014			1,27
Total	15	1,1702				100,00

A partir da Tabela 24 é possível verificar que o parâmetro de maior influência no comportamento mecânico das peças impressas em PLA, tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de flexão, é a porcentagem de preenchimento, com uma influência de cerca de quase 97%.

Após essa análise, pode se verificar que, novamente, o parâmetro que mais influência no comportamento mecânico dos espécimes é a porcentagem de preenchimento.

A partir dessa observação, a alta influência da porcentagem de preenchimento, novas análises foram realizadas, assim como, foi feito para as análises dos resultados do método de Taguchi e, novamente, foram analisadas, separadamente, as amostras com porcentagem de 100% de preenchimento, amostras de 1 a 8, e as amostras de 25% de preenchimento, amostras de 9 a 16. Como resultado, foi obtido que, para as amostras com 100% de preenchimento, o parâmetro “tipo de preenchimento” foi o parâmetro de menor influência, enquanto o parâmetro de maior influência foi a “espessura de camada”, com 61,88% de influência. Para as amostras com 25% de preenchimento o parâmetro de maior influência nos resultados também foi a “espessura de camada”, com 78,90% de influência.

5.2.2 Análise relacional de Grey PETG

A análise relacional de Grey para o as peças fabricadas em PETG ocorreu da mesma forma, foram utilizados os valores de razão S/N obtidos a partir dos ensaios realizados nas peças em PETG, esses dados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores da razão S/N para PETG.

Amostra	S/N ensaio de tração (dB)	S/N ensaio de flexão (dB)
1	33,3414	36,3389
2	33,5458	36,1928
3	33,9791	36,9656
4	33,9504	37,1979
5	33,3795	35,9253
6	33,1420	35,7572
7	33,5958	36,5174
8	33,1162	36,3631
9	25,7860	31,0262
10	27,8963	31,5411
11	27,3451	31,0189
12	28,3412	31,8609
13	26,2611	30,3474
14	27,5439	31,0019
15	27,1591	31,4882
16	28,4862	31,7165

Como citado anteriormente, a primeira etapa da análise relacional de Grey consiste em reprocessar os dados para normalizar os resultados. Os valores normalizados dos resultados estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Valores de S/N normalizados para ensaios PETG.

Amostra	S/N normalizado ensaio de tração	S/N normalizado ensaio de flexão
1	0,9222	0,8746
2	0,9471	0,8533
3	1,0000	0,9661
4	0,9965	1,0000
5	0,9268	0,8142
6	0,8978	0,7897
7	0,9532	0,9007
8	0,8947	0,8781
9	0,0000	0,0991
10	0,2576	0,1743
11	0,1903	0,0980
12	0,3119	0,2209
13	0,0580	0,0000
14	0,2146	0,0955
15	0,1676	0,1665
16	0,3296	0,1999

Em seguida, assim como foi realizado para as peças fabricadas em PLA, o coeficiente relacional de Grey foi calculado utilizando os valores da razão S/N normalizados contidos na Tabela 26 e a Equação 14. Os valores calculados de $x_i^0 - x_{ij}$ estão registrados na Tabela 27. Com base nesses valores, os coeficientes relacionais de Grey foram determinados e apresentados na Tabela 28. Neste estudo, o valor do coeficiente distintivo (ζ) utilizado foi de 0,7 para os resultados do ensaio de tração e 0,3 para os resultados do ensaio de flexão, igual ao utilizado no estudo realizado nas peças em PLA.

Tabela 27 - Valores de $x_i^0 - x_{ij}$ para PETG.

Amostra	$x_i^0 - x_{ij}$ ensaio de tração	$x_i^0 - x_{ij}$ ensaio de flexão
1	0,0778	0,1254
2	0,0529	0,1467
3	0,0000	0,0339
4	0,0035	0,0000
5	0,0732	0,1858
6	0,1022	0,2103
7	0,0468	0,0993
8	0,1053	0,1219
9	1,0000	0,9009
10	0,7424	0,8257
11	0,8097	0,9020
12	0,6881	0,7791
13	0,9420	1,0000
14	0,7854	0,9045
15	0,8324	0,8335
16	0,6704	0,8001

Tabela 28 - Valores do coeficiente relacional de Grey para PETG.

Amostra	Coefficiente relacional de Grey para ensaio de tração	Coefficiente relacional de Grey para ensaio de flexão
1	0,8999	0,7052
2	0,9298	0,6716
3	1,0000	0,8985
4	0,9950	1,0000
5	0,9054	0,6176
6	0,8726	0,5879
7	0,9374	0,7513
8	0,8692	0,7111
9	0,4118	0,2498
10	0,4853	0,2665
11	0,4637	0,2496
12	0,5043	0,2780
13	0,4263	0,2308
14	0,4712	0,2491
15	0,4568	0,2647
16	0,5108	0,2727

Por último, com base na Tabela 28 e utilizando a Equação 15, é possível calcular o grau relacional de Grey, como pode ser observado na Tabela 29. Nessa tabela também é possível observar a ordem dos resultados, onde o número 1 representa o maior valor de grau relacional de Grey e o 16 o menor valor, esses valores coincidiram com as amostras 4 e 13, respectivamente.

Tabela 29 - Valores para o Grau relacional de Grey para PETG.

Amostra	Grau relacional de Grey	Ordem
1	0,8026	4
2	0,8007	5
3	0,9492	2
4	0,9975	1
5	0,7615	7
6	0,7303	8
7	0,8443	3
8	0,7902	6
9	0,3308	15
10	0,3759	11
11	0,3566	14
12	0,3911	10
13	0,3285	16
14	0,3602	13
15	0,3607	12
16	0,3917	9

Assim, chegamos à Tabela 30, que apresenta a média do grau relacional de Grey para cada nível, além da média total. Com base nessas informações, podemos identificar a melhor combinação, lembrando que quanto maior o valor do grau relacional de Grey, melhor será a combinação.

Tabela 30 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.

Parâmetros	Grau relacional de Grey			Média total
	Nível 1	Nível 2	Máx-Mín	
% Preenchimento	0,8345	0,3620	0,4726	0,5982
Temperatura	0,6256	0,5709	0,0546	
Camada	0,5613	0,6352	0,0739	
Tipo de preenchimento	0,5918	0,6047	0,0129	

Na Tabela 30, podemos observar que a melhor combinação é a mesma encontrada para o PLA, a porcentagem de preenchimento nível 1, temperatura nível 1, espessura de camada nível 2 e tipo de preenchimento nível 2, o que significa que os parâmetros ideais obtidos a partir da análise de Grey são, a porcentagem de preenchimento é de 100%, a temperatura é de 215°C a espessura de camada é de 0,1 mm, e o tipo de preenchimento é o Zigue-Zague. Para facilitar a visualização dos valores da Tabela 23, eles são apresentados graficamente na Figura 39.

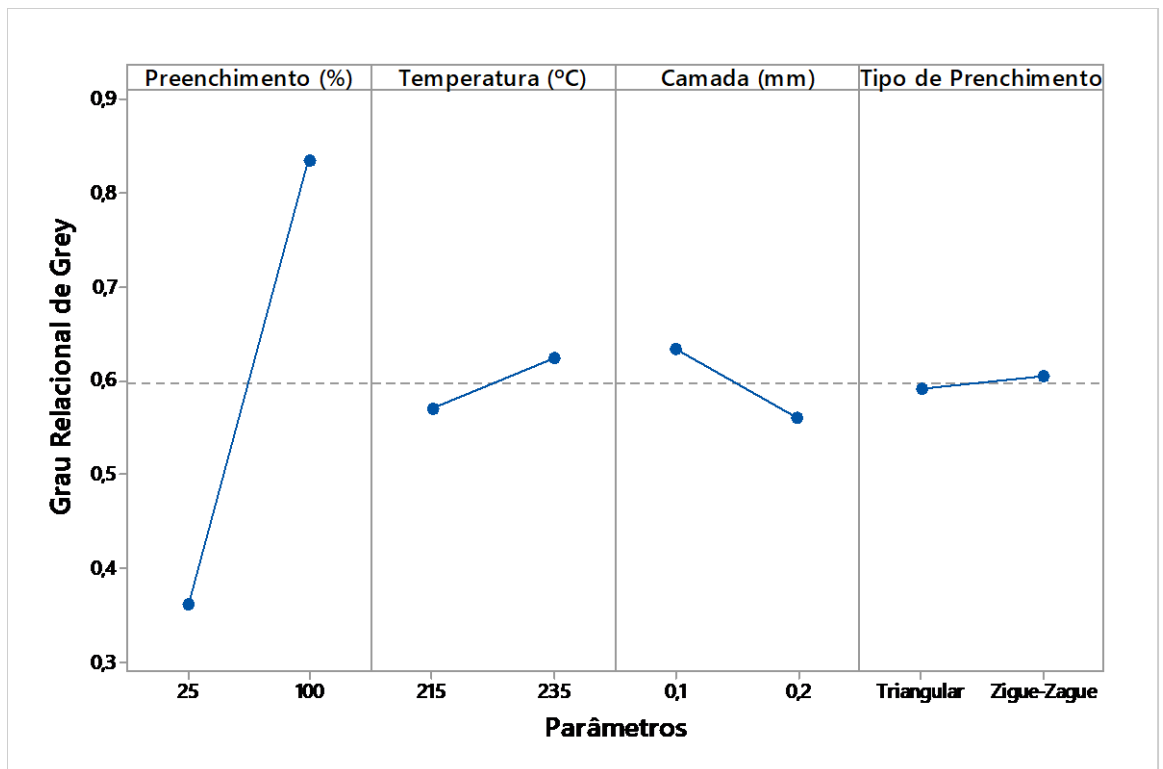


Figura 39 - Resposta da análise relacional de Grey

5.2.2.1 Análise ANOVA PETG

Agora, análise foi conduzida utilizando os valores de grau relacional de Grey obtidos a partir dos ensaios de tração e de flexão realizados nas peças em PETG. Os dados para esta análise, corpos de prova em PLA, estão apresentados na Tabela 29, enquanto os resultados da ANOVA são representados na Tabela 31.

Tabela 31 - Valores da ANOVA da análise relacional de Grey para PETG.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P	% de influência
Preenchimento (%)	1	0,8933	0,8933	330,0800	0,0000	93,29
Temperatura (°C)	1	0,0119	0,0119	4,4100	0,0600	1,25
Camada (mm)	1	0,0218	0,0218	8,0700	0,0160	2,28
Tipo de preenchimento	1	0,0007	0,0007	0,2500	0,6290	0,07
Erro residual	11	0,0298	0,0027			3,11
Total	15	0,9575				100,00

Analisando os dados da Tabela 31, é possível observar, novamente, que a porcentagem de preenchimento, é o parâmetro com maior influência, com 93,29%, seguido da espessura de camada, com uma influência de 2,28%.

Nessa análise, apesar de a combinação ótima obtida a partir da Análise Relacional de Grey ter coincidido com a amostra de maior Grau Relacional de Grey, amostra 4, foi também decidido realizar as análises das amostras separadas e, como resultado, foi obtido que a porcentagem de influência do parâmetro “tipo de preenchimento” passou de 0%, para as amostras impressas com 100% de preenchimento, para 54,91%, nas amostras impressas com 25% de preenchimento. Comportamento diferente do observado nas amostras em PLA, onde o parâmetro de maior influência, para essa mesma análise, foi a espessura de camada.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais do trabalho, incluindo a validação do método utilizado, um resumo dos resultados e outros pontos de interesse identificados durante sua execução. Em seguida, serão propostas algumas sugestões de trabalhos futuros com temas semelhantes aos abordados nesta dissertação.

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo identificar a combinação ótima dos níveis dos parâmetros selecionados para alcançar e obter o melhor resultado nos ensaios que foram realizados, e determinar quais desses parâmetros têm maior influência no processo de impressão 3D pelo método FDM.

Para essa otimização, foram empregados três métodos: o método Taguchi, que permite criar uma matriz de ensaios reduzida, possibilitando estudar a interação de um ou mais fatores e determinar a combinação ótima para cada resposta analisada individualmente; a Análise Relacional de Grey, que permite identificar a combinação ótima abrangendo todos os ensaios realizados; e por fim, a análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar o grau de influência de cada parâmetro nos resultados, tanto nos ensaios individuais, a partir do método de Taguchi, quando na combinação dos ensaios, a partir da Análise Relacional de Grey.

Para o ensaio de tração dos espécimes impressos em PLA, a combinação de parâmetros que proporcionou o melhor resultado foi a porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 200 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague. Para os espécimes impressos em PETG, a melhor combinação foi a porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão de 235 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague.

Para o ensaio de flexão dos espécimes impressos em PLA, a combinação de parâmetros que proporcionou o melhor resultado foi a porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 215 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague. Para os espécimes impressos em PETG, essa melhor combinação foi a porcentagem de preenchimento de 100%, temperatura de impressão de 235 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague.

Por fim, para se obter o melhor resultado para ambos os ensaios, tração e flexão, a combinação ótima encontrada, para o PLA, foi a de porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 215 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague, e para o PETG a combinação foi a de porcentagem de preenchimento 100%, temperatura de impressão 235 °C, espessura de camada de 0,1 mm e tipo de preenchimento zigue-zague.

Para ambos os materiais a combinação ideal encontrada a partir da Análise Relacional de Grey foi a combinação referente a amostra 4. No caso do PLA essa amostra obteve um valor para o Grau Relacional de Grey 54,84% mais alto do que a média para esse material, para o PETG esse valor superou a média em 66,75%.

Com a Análise de Variância (ANOVA) foi possível encontrar quais os parâmetros mais influentes nos resultados dos ensaios experimentais, para ambos os materiais o parâmetro mais influente foi a porcentagem de preenchimento, com 97,32% de influência nas amostras em PLA e 93,29% de influência nas amostras em PETG.

Foi possível, também, validar os métodos de otimização utilizados, a partir desses métodos foi identificado que as amostras impressas com 100% de preenchimento, por serem muito densas, acabaram por interferir na influência dos demais parâmetros. A partir dessa constatação foram realizadas novas análises, dessa vez sem o parâmetro “porcentagem de preenchimento”, e com isso foi possível identificar a real influência dos demais parâmetros. Para o ensaio de tração, o parâmetro de maior influência, para as amostras impressas com 25% de preenchimento, foi o tipo de preenchimento, isso ocorre pois o tipo de preenchimento interfere diretamente no comportamento das amostras durante esse ensaio, nesse caso, o preenchimento “zigue-zague” resultou em maiores valores de tensão de tração para ambos os materiais. Para o ensaio de flexão o parâmetro de maior influência para as amostras com 25% de preenchimento foi a espessura de camada, para as amostras em PLA, e o tipo de preenchimento, para as amostras em PETG, porém, neste último caso, a espessura de camada teve uma porcentagem de influência muito próxima do parâmetro mais influente, o tipo de

preenchimento, isso acontece, pois, no ensaio de flexão, a espessura de camada interfere no número de camadas que a amostra terá e, quanto maior esse número, maior tende a ser o valor de tensão máxima de flexão, o que é corroborado pela resposta encontrada, onde a espessura de camada de 0,1 mm resultou em valores maiores de tensão máxima.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A impressão 3D é uma área extremamente vasta que está em constante desenvolvimento. Embora muitos estudos tenham sido realizados sobre os parâmetros de impressão, ainda há uma necessidade significativa de aprofundar os estudos sobre esse processo. Neste trabalho, foram otimizados os valores máximos de tensão de tração e de flexão. Seria interessante investigar como outros fatores, como a velocidade de impressão, o uso de suportes, a temperatura da mesa, a espessura das paredes e o diâmetro do filamento, influenciam esses resultados, buscando também uma combinação ótima desses parâmetros. Além disso, poderia ser realizado um estudo focado na otimização dos mesmos parâmetros deste trabalho, mas avaliando os defeitos de impressão.

Além disso, se houver tempo e material disponíveis, é recomendável aumentar o número de iterações do modelo, passando de três para quatro ou cinco níveis e/ou utilizando mais parâmetros. Isso aumentará a precisão dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Book, *The IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2019. doi: 10.1351/goldbook.
- [2] J. Coreño-Alonso and M. T. Méndez-Bautista, “Relación estructura-propiedades de polímeros,” *Educación Química*, vol. 21, no. 4, pp. 291–299, Oct. 2010, doi: 10.1016/S0187-893X(18)30098-3.
- [3] S. Canevarolo, *Ciência dos Polímeros—Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros*. 2010.
- [4] V. I. Popa and G. Asachi, “Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/290440728>
- [5] L. B. Neves, I. S. Afonso, G. Nobrega, L. G. Barbosa, R. A. Lima, and J. E. Ribeiro, “A Review of Methods to Modify the PDMS Surface Wettability and Their Applications,” *Micromachines* 2024, Vol. 15, Page 670, vol. 15, no. 6, p. 670, May 2024, doi: 10.3390/MI15060670.
- [6] G. F. Brito, P. Agrawal, E. M. Araújo, and T. J. A. Mélo, “Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes,” no. 2, pp. 127–139, 2011, [Online]. Available: www.braskem.com.br
- [7] E. Castro-Aguirre, F. Iñiguez-Franco, H. Samsudin, X. Fang, and R. Auras, “Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107. Elsevier B.V., pp. 333–366, Dec. 15, 2016. doi: 10.1016/j.addr.2016.03.010.
- [8] J. Scheirs and T. E. Long, Eds., *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters*. Wiley, 2004. doi: 10.1002/0470090685.
- [9] *Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites*. Elsevier, 2015. doi: 10.1016/C2013-0-19172-6.
- [10] *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*. Elsevier, 2020. doi: 10.1016/C2018-0-03664-6.
- [11] Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal, J. B. Aguiar, and C. Jesus, “Durability Performance of Fly Ash Based One-Part Geopolymer Mortars,” *Key Eng Mater*, vol. 634, pp. 113–120, Dec. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.634.113.
- [12] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping*. WORLD SCIENTIFIC, 2010. doi: 10.1142/6665.
- [13] “3D printing STL files: A step-by-step guide | Protolabs Network.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide/>
- [14] R. B, “How does part orientation affect a 3D print? Practical design tips for additive manufacturing | Protolabs Network.”

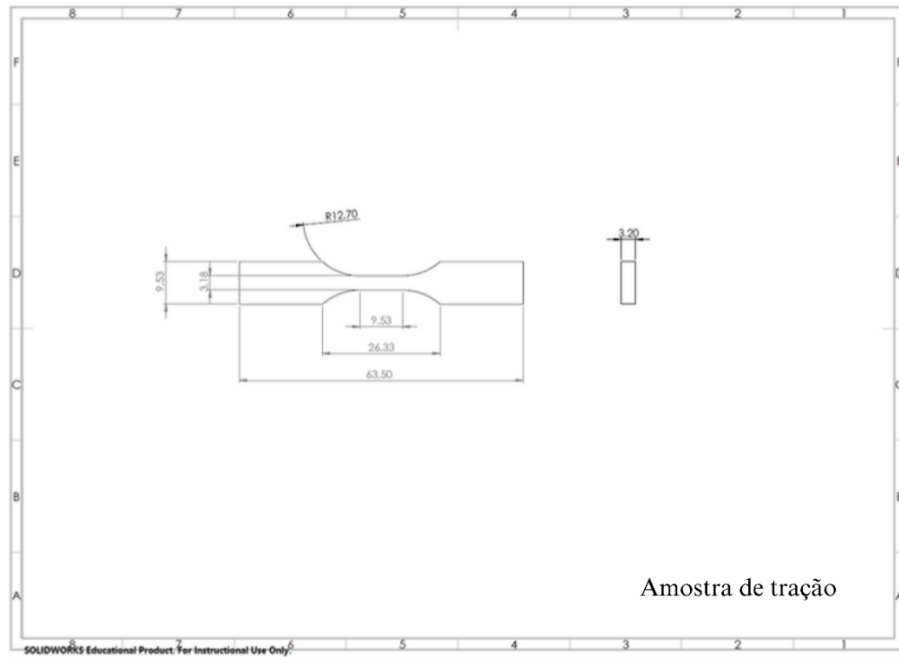
- [15] J. V. L. Silva and R. A. Rezende, "Additive manufacturing and its future impact in logistics," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, IFAC Secretariat, 2013, pp. 277–282. doi: 10.3182/20130911-3-BR-3021.00126.
- [16] C. Schmutzler, A. Zimmermann, and M. F. Zaeh, "Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-form Deformation," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 1017–1022. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.078.
- [17] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing," *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15. American Chemical Society, pp. 10212–10290, Aug. 09, 2017. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [18] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, "Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS," *Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- [19] L. Santana, J. L. Alves, A. da C. Sabino Netto, and C. Merlini, "A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical and mechanical characterization," *Revista Materia*, vol. 23, no. 4, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180004.0601.
- [20] K. Hibbert, G. Warner, C. Brown, O. Ajide, G. Owolabi, and A. Azimi, "The Effects of Build Parameters and Strain Rate on the Mechanical Properties of FDM 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene," *Open Journal of Organic Polymer Materials*, vol. 09, no. 01, pp. 1–27, 2019, doi: 10.4236/ojopm.2019.91001.
- [21] "UltiMaker Cura - Support settings." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667417606331>
- [22] "Infill settings." Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667411002588>
- [23] "Investigation On Influence of Infill Pattern and Layer Thickness On Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology | PDF | 3 D Printing | Regression Analysis." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://pt.scribd.com/document/515906073/20052019-jesr-27-37>
- [24] K. Elhattab, S. B. Bhaduri, and P. Sikder, "Influence of Fused Deposition Modelling Nozzle Temperature on the Rheology and Mechanical Properties of 3D Printed β -Tricalcium Phosphate (TCP)/Polylactic Acid (PLA) Composite," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/polym14061222.
- [25] K. Rajan, M. Samykano, K. Kadirgama, W. S. W. Harun, and M. M. Rahman, "Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 3–4. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 1531–1570, May 01, 2022. doi: 10.1007/s00170-022-08860-7.
- [26] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp J*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, Mar. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.
- [27] A. Garcia, J. A. Spim, and C. A. dos Santos, *Ensaio dos Materiais*. 2000.

- [28] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Ciência e Engenharia de Materiais*, 9th ed. 2018.
- [29] ASTM D683-14, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1," *American Society for Testing Materials*. 2014. doi: 10.1520/D0638-14.
- [30] ASTM D618-13, "Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing," *American Society for Testing Materials*. 2013.
- [31] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp J*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, Mar. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.
- [32] K. G. Jaya Christiyana, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, "Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 3, pp. 363–367, Jun. 2018, doi: 10.1007/s40032-016-0344-8.
- [33] Y. Hindieh, "Flexural Analysis of 3D Printed Members." [Online]. Available: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/2471>
- [34] ISO 178, *Plastics — Determination of flexural properties*. 2003.
- [35] R. K. Roy, *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. 2001.
- [36] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2nd ed., no. 3. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qre.4680050312>
- [37] D. Pereira, J. Ribeiro, and L. Queijo, "Otimização de parâmetros de fresagem usando o método de Taguchi com a Análises Relacional de Grey," 2018.
- [38] Y. F. Hsiao, Y. S. Tarng, and W. J. Huang, "Optimization of Plasma Arc Welding Parameters by Using the Taguchi Method with the Grey Relational Analysis," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 23, no. 1, pp. 51–58, Dec. 2007, doi: 10.1080/10426910701524527.
- [39] S. Pal, S. K. Malviya, S. K. Pal, and A. K. Samantaray, "Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 11–12, pp. 1250–1260, Oct. 2009, doi: 10.1007/s00170-009-1931-0.
- [40] G. Taguchi, *Introduction to Quality Engineering*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.
- [41] Y. Kuo, T. Yang, and G.-W. Huang, "The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems," *Comput Ind Eng*, vol. 55, no. 1, pp. 80–93, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.cie.2007.12.002.
- [42] S. A. N. Mohamed, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, M. A. Md. Deros, and A. M. Tajul Arifin, "Integration of Taguchi-Grey relational analysis technique in parameter process optimization for rice husk composite," *Bioresources*, vol. 14, no. 1, pp. 1110–1126, Dec. 2018, doi: 10.15376/biores.14.1.1110-1126.
- [43] N. Ghosh, P. K. Pal, and G. Nandi, "Parametric Optimization of MIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Grey-based Taguchi Method," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 1038–1048, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.204.

- [44] I. Ertugrul, T. Öztaş, A. Ozcil, and G. Z. Oztas, "Grey relational analysis approach in academic performance comparison of university a case study of Turkish universities," *Eur Sci J*, vol. 12, 2016, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:148043447>
- [45] S.-T. Lin *et al.*, "Application of grey-relational analysis to find the most suitable watermarking scheme," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 7, Sep. 2011.
- [46] Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, N. Z. Khan, U. Khan, and G. A. Quadir, "Multi Response Optimization of Wire Electrical Discharge Machining Process Parameters Using Taguchi based Grey Relational Analysis," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1683–1695, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.154.
- [47] A. Panda, A. K. Sahoo, and A. K. Rout, "Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study," *Decision Science Letters*, pp. 581–592, 2016, doi: 10.5267/j.dsl.2016.3.001.
- [48] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Wiley, 2004. doi: 10.1002/9780470258354.
- [49] S. H. Park, *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. London: Hall, 1996.
- [50] J. C. Ferreira and C. M. Patino, "What does the p value really mean?," *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, vol. 41, no. 5, pp. 485–485, Oct. 2015, doi: 10.1590/S1806-37132015000000215.
- [51] ASTM D883-19c, "Standard Terminology Relating to Plastics," *American Society for Testing Materials*. 2019.

ANEXOS

Anexo 1 – Espécime para ensaio de tração



Anexo 2 – Espécime para ensaio de flexão

