

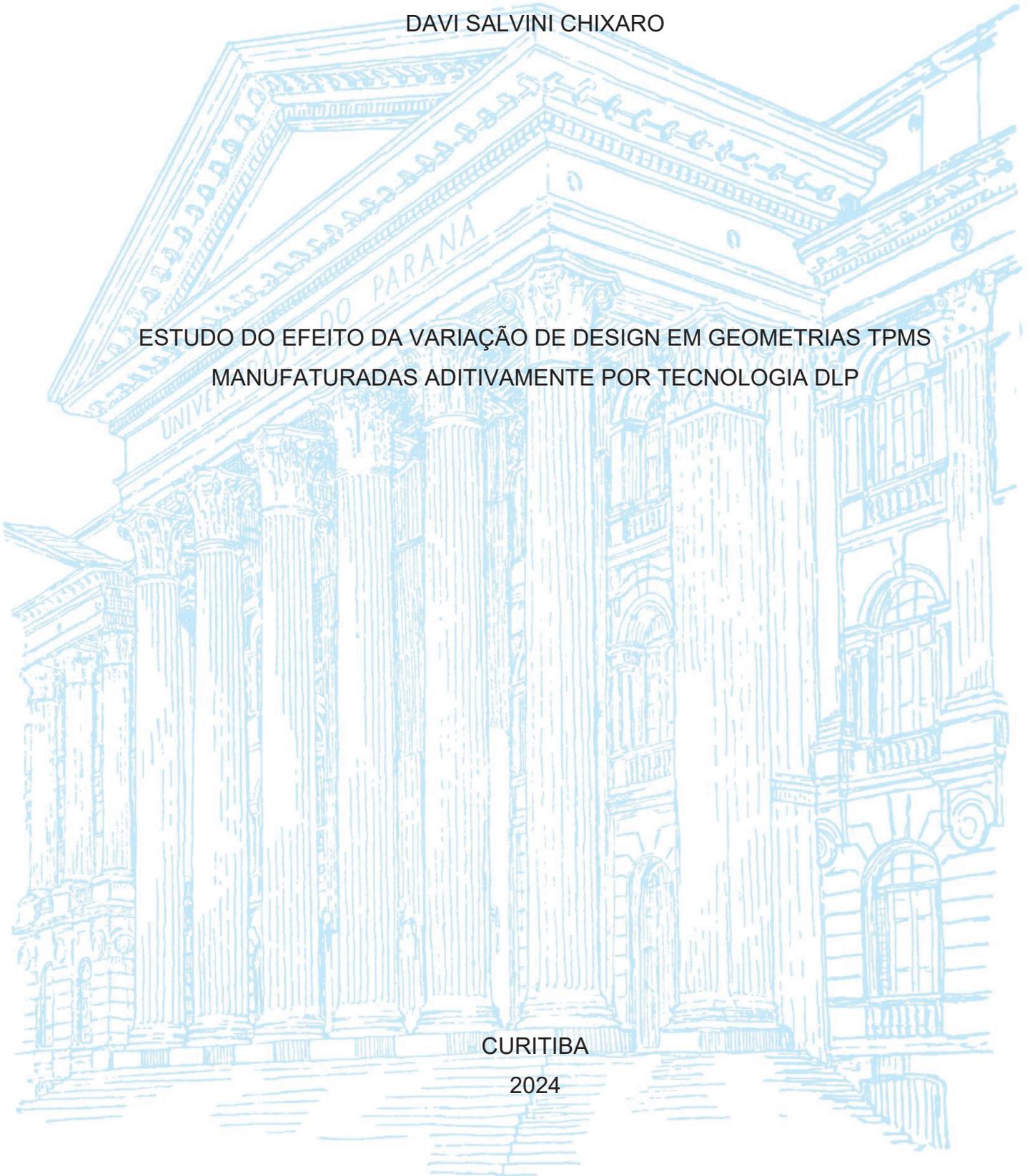
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAVI SALVINI CHIXARO

ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE DESIGN EM GEOMETRIAS TPMS
MANUFATURADAS ADITIVAMENTE POR TECNOLOGIA DLP

CURITIBA

2024



DAVI SALVINI CHIXARO

ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE DESIGN EM GEOMETRIAS TPMS
MANUFATURADAS ADITIVAMENTE POR TECNOLOGIA DLP

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Chixaro, Davi Salvini

Estudo do efeito da variação de design em geometrias TPMS
manufaturadas aditivamente por tecnologia DLP. / Davi Salvini Chixaro.
– Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda.

1. Manufatura Aditiva. 2. Tecnologia tridimensional (Processamento
de Luz Direta). I. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção. II. Drozda, Fabiano Oscar. III.
Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DAVI SALVINI CHIXARO** intitulada: **ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE DESIGN EM GEOMETRIAS TPMS MANUFATURADAS ADITIVAMENTE POR TECNOLOGIA DLP**, sob orientação do Prof. Dr. FABIANO OSCAR DROZDA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Março de 2024.

Assinatura Eletrônica
02/04/2024 07:13:14.0
FABIANO OSCAR DROZDA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
01/04/2024 14:29:32.0
SERGIO FERNANDO LAJARIN
Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE ENG. MECÂNICA UFPR)

Assinatura Eletrônica
05/04/2024 16:53:37.0
DALMARINO SETTI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
01/04/2024 15:02:13.0
MARCELL MARIANO CORREA MACENO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Aos meus pais, a quem devo toda minha vida. Em especial minha querida
mãe que nos deixou durante esse período.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo Henriques Chixaro e Ivone Irene Salvini, por todo incentivo durante esse momento e apoio em todas as etapas de minha vida.

À pessoa que se tornou minha esposa durante esse período, Amanda Cecchetto Peixoto, por toda compreensão, paciência e incentivo nas decisões que tomei.

A minha família Curitibana, por todos os encontros semanais, risadas, festas e alegrias proporcionadas, tornando tudo mais suave.

Aos meus colegas de mestrado, Ricardo Júnior de Oliveira Silva, Filipe Eduardo Martins Guedes e Paola Andrea Rico Belalcazar, por todo apoio e ajuda.

Ao meu orientador, Fabiano Oscar Drozda, por ter aceitado todas as minhas ideias, incentivado e me ensinado durante todo o caminho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, é a ilusão do conhecimento.”

Stephen Hawking

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) se tornou nos últimos anos um processo muito útil na fabricação de produtos altamente customizáveis e de grande complexidade. Dentro da MA uma das tecnologias amplamente popularizadas é o Processamento de Luz Direta (DLP). Tal tecnologia é utilizada desde áreas complexas como a médica e odontológica até a produção de calçados e equipamentos de segurança, devido a sua facilidade de manuseio e alta resolução nos detalhes das peças produzidas. Utilizando tecnologias como DLP, estruturas *Triply Periodic Minimal Surface* (TPMS) puderam ser finalmente fabricadas e aplicadas em diversos produtos. Tais estruturas são estudadas desde o século 19 como proposta de curvas onde não ocorre a presença de cantos vivos, dificultando assim a propagação de trincas quando submetidas a esforços mecânicos. Devido a sua alta complexidade, sua fabricação era impossível até o surgimento de tecnologias de manufatura aditiva. Ao analisar estudos referentes as estruturas TPMS, percebe-se a falta de definição dos parâmetros de *design* e sua influência em ensaios mecânicos de compressão como também um comparativo entre estruturas. O presente estudo propõe uma avaliação das estruturas TPMS mais estudadas sendo elas giroide, diamante e Schwarz P e seus parâmetros de design tamanho de célula e espessura de parede, para identificar quais são os comportamentos observados quando tais estruturas são submetidas a ensaios de compressão utilizando o design de experimento de Taguchi metodologia de análise de experimentos. O objetivo principal do estudo foi analisar a influência de cada estrutura e parâmetro diante de esforços de compressão. Os resultados obtidos mostraram que tamanho de célula unitária não apresentou significância estatística, já a geometria e espessura de parede apresentaram forte relação com os valores de módulo de elasticidade calculados. Cada geometria apresentou diferentes comportamentos quando variados seu design, sendo Schwarz P a maior variação de módulo de elasticidade e giroide a menor variação, podendo concluir que cada geometria se comporta diferentemente em relação aos seus parâmetros.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Processamento de Luz Direta (DLP); *Triply Periodic Minimal Surfaces* (TPMS).

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has become a very useful tool in recent years to produce highly customizable and complex products. Within AM, one of the widely popularized technologies is Direct Light Processing (DLP). This technology is used in complex areas such as medical and dental, as well as in the production of footwear and safety equipment, due to its ease of handling and high resolution in the details of the parts produced. Using technologies like DLP, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) structures could finally be manufactured and applied in various products. Such structures have been studied since the 19th century as a proposal for curves where sharp corners do not occur, thus making it difficult for cracks to propagate when subjected to mechanical stress. Due to their high complexity, their manufacture was impossible until the emergence of additive manufacturing technologies. Analyzing studies concerning TPMS structures, there is a noted lack of definition of design parameters and their influence on mechanical compression tests, as well as a comparison between structures. The present study proposes an evaluation of the most studied TPMS structures, namely gyroid, diamond, and Schwarz P, and their design parameters of cell size and wall thickness, to identify the observed behaviors when such structures are subjected to compression tests using Taguchi's experimental design and analysis of experiments methodology. The main objective of the study was to analyze the influence of each structure and parameter under compression forces. The results showed that the unit cell size did not present statistical significance, while geometry and wall thickness showed a strong relationship with the calculated elasticity modulus values. Each geometry exhibited different behaviors when their design was varied, with Schwarz P showing the greatest variation in elasticity modulus and gyroid the least variation, concluding that each geometry behaves differently in relation to its parameters.

Keywords: Additive Manufacturing; Digital Light Processing (DLP); Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ABORDAGEM METODOLÓGICA	21
FIGURA 2 - FLUXO DE PROCESSO DA IMPRESSÃO 3D.....	22
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO MANUFATURA ADITIVA ISO/ASTM 52900:2024 ...	24
FIGURA 4 - CATEGORIAS DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA.....	24
FIGURA 5 - IMPRESSORA SLA.....	25
FIGURA 6 - DIFERENÇA ENTRE SLA E DLP	26
FIGURA 7 - IMPRESSORA CDLP	27
FIGURA 8 – MODELO DE IMPRESSORA DLP.....	27
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DE UMA CÉLULA UNITÁRIA DE GIROIDE E SUA REPETIÇÃO EM UM CUBO	32
FIGURA 10 - CÉLULAS UNITÁRIAS TPMS	33
FIGURA 11 - MODELO GERAL DE UM PROCESSO	34
FIGURA 13 - ETAPAS DA RSL.....	39
FIGURA 14 - PALAVRAS-CHAVE DE PESQUISA POR ÁREA.....	40
FIGURA 15 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO	48
FIGURA 16 - CORPO DE PROVA SCHWARZ P ASTM D3574	51
FIGURA 17 - MODELO PARA CALIBRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO	54
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DE IMPRESSÃO CHITUBOX.....	55
FIGURA 19 – LEGENDA CORPOS DE PROVA.....	56
FIGURA 20 - CORPO DE PROVA COM LEGENDA.....	56
FIGURA 21 - CORPOS DE PROVA COM PROBLEMAS DE IMPRESSÃO	59
FIGURA 22 - CORPOS DE PROVA.....	60
FIGURA 23 - CORPO DE PROVA TOTALMENTE ROMPIDO	60
FIGURA 24 - CORPOS DE PROVA COM RACHADURAS SUPERFICIAIS.....	61
FIGURA 25 - DETALHE DE ACABAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	61
FIGURA 26 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA SCHWARZ P.....	62
FIGURA 27 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA GIROIDE	62
FIGURA 28 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA DIAMANTE	62
FIGURA 29 - PONTO CENTRAIS DE MEDIÇÃO	63
FIGURA 30 - MÉDIA DAS MASSAS	65
FIGURA 31 - CURVA TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO GIROIDE	68

FIGURA 32 – DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS GI080075, GI100105 E GI125090 RESPECTIVAMENTE.	69
FIGURA 33 - CURVA TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO DIAMANTE.....	70
FIGURA 34 - DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS DI080105, DI100090 E DI125075 RESPECTIVAMENTE.....	71
FIGURA 35 - CURVA TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO SCHWARZ P.....	72
FIGURA 36 - DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS SP080090, SP100075 E SP125105 RESPECTIVAMENTE.	73
FIGURA 37 - TENSÃO ESPECÍFICA PARA CADA CORPO DE PROVA	75
FIGURA 38 – EFEITOS NA MÉDIA PARA RAZÕES S/N.....	77
FIGURA 39 - INTERAÇÃO ENTRE FATORES E NÍVEIS.....	78

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Arranjos ortogonais.....	35
QUADRO 2 – Resultados das buscas.....	41
QUADRO 3 – Artigos para realização da síntese.....	43
QUADRO 4 – Resultados RSL.....	46
QUADRO 5 – Características técnicas da impressora.....	49
QUADRO 6 - Características técnicas da resina.....	49
QUADRO 7 – Fatores e níveis	52
QUADRO 8 – Matriz ortogonal L27	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ORDEM DE ENSAIO.....	58
TABELA 2 - VARIAÇÃO DIMENSIONAL	64
TABELA 3 - MÉDIA DAS DENSIDADES	66
TABELA 5 - MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	74
TABELA 6 – ANOVA PARA RAZÕES SINAL RUÍDO	76
TABELA 7 - RESPOSTAS PARA RAZÕES SINAL RUÍDO	76

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABS	- Acrilonitrila butadieno estireno
CE	- Critérios de Exclusão
CI	- Critérios de Inclusão
CP	- Corpo de Prova
CDLP	- Processamento de Luz Direta Contínuo
DLP	- Processamento por Luz Direta
FDM	- <i>Fused Deposition Modeling</i>
IWP	- <i>I Wrapped Package</i>
LCD	- <i>Display</i> de Cristal Líquido
MA	- Manufatura Aditiva
PLA	- Ácido Polilático
RSL	- Revisão Sistemática da Literatura
SLA	- Estereolitografia
STL	- <i>Standard Triangle Language</i>
TPMS	- <i>Triply Periodic Minimal Surface</i>
TPU	- Poliuretano Termoplástico
UV	- Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTO E PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	22
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA	23
2.2.1 SLA – Estereolitografia.....	25
2.2.2 DLP – Processamento de luz direta	25
2.2.3 CDLP – Processamento de luz direta contínuo	26
2.3 PRINCÍPIO DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA - DLP	27
2.3.1 Características e parâmetros da DLP	29
2.3.1.1 Tempo de exposição	29
2.3.1.2 Altura de camada.....	29
2.3.1.3 Orientação de impressão.....	29
2.3.1.4 Suportes	30
2.3.1.5 Pós processamento	30
2.4 POLÍMEROS	30
2.5 ESTRUTURAS <i>TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE</i> (TPMS).....	31
2.6 MÉTODO ROBUSTO DE TAGUCHI	34
2.6.1 Razão Sinal-Ruído	36
2.6.2 Problemas estáticos e dinâmicos	36
2.7 ENSAIO MECÂNICOS EM POLÍMEROS.....	37
2.7.1 Ensaio de compressão.....	37
2.8 ESTUDOS CORRELATOS	38
2.8.1 Revisão Sistemática da Literatura (RSL).....	38
2.8.2 Definição do protocolo da RSL.....	39
2.8.3 Condução e desenvolvimento da RSL	41
2.8.4 Apresentação de resultados.....	43

2.8.5 Síntese da revisão sistemática	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	48
3.2 MÉTODO – DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO	50
3.2.1 Modelagem do corpo de prova e método de Taguchi	50
3.2.1.1 Modelagem dos corpos de prova	50
3.2.1.2 Método de Taguchi	52
3.2.2 Caracterização dos parâmetros de impressão 3D e impressão das peças	53
3.2.3 Caracterização do ensaio de compressão	57
3.2.4 Análise de dados	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 ASPECTOS DAS IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	59
4.1.1 Análise dimensional	63
4.1.2 Análise da massa dos corpos de prova	64
4.1.3 Variação da temperatura ambiente	66
4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO	67
4.2.1 Resultados ensaio de compressão	67
4.2.2 Cálculo do módulo de elasticidade	74
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1 IDEAS PARA ESTUDOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

O conceito de manufatura aditiva não é algo novo, apesar de antigamente não se utilizar desse nome. Segundo Volpato (2017), já era possível observar esse conceito na construção das pirâmides do Egito, as quais foram feitas de blocos de materiais sobrepostos um a um até a formação da pirâmide. A ideia de Manufatura Aditiva não se limita as tecnologias de impressão 3D, e sim em utilizar um método de produção que se baseia em adição de material.

No ano de 1984, Chuck Hull cria a primeira impressora 3D que utiliza a tecnologia estereolitografia. Logo após, por volta dos anos 90, Scott e Lisa Crump fundaram a *Stratasys* e patentearam a tecnologia por deposição fundida, mais conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*). Segundo Su e Al'Aref (2018) a partir dos anos 90 novas áreas começaram a surgir com foco em peças de engenharia com alta complexidade, área médica, automotiva etc. Como também em impressões 3D voltadas para desenvolvimento e prototipagem rápida de peças em estado inicial de criação.

Devido a maneira como as camadas são depositadas e os fatores que interferem na manufatura de peças, Rodríguez-Panes *et al.* (2018) mencionam que as características mecânicas de peças são altamente dependentes dos parâmetros de impressão. Pereira *et al.* (2021) menciona que o processo de fabricação de peças nas impressoras 3D é fortemente influenciado pela escolha dos parâmetros de impressão.

Na manufatura aditiva, o padrão geométrico de preenchimento interno das peças é um parâmetro de impressão que pode ser escolhido dentre várias possibilidades. Desde padrões mais simples como linear, triângulo, hexagonal até outras mais complexas como o giroide. Sendo essa última, parte de uma série de estruturas denominadas de *Triply Periodic Minimal Surface* (TPMS).

De acordo com Maskery *et al.* (2018) as estruturas TPMS possuem excelentes características, como: grande área superficial em relação ao volume, porosidade elevada, como também suas propriedades mecânicas apresentando alta absorção de energia, alto módulo de elasticidade e dureza elevada. Este tipo de estrutura é baseado em uma complexa geometria celular repetida periodicamente num espaço tridimensional.

Estudos como de Feng *et al.* (2022) menciona a grande variabilidade das estruturas TPMS e suas aplicações, como também a dependência de seus parâmetros para cada finalidade, dentre eles está o tipo de geometria, tamanhos de célula e espessura de parede. Sendo que os dois últimos afetam a quantidade de poros na estrutura, como também sua densidade volumétrica. Shen *et al.* (2021) ainda menciona diversos estudos onde avaliam a variação de geometrias TPMS e quais as diferenças nas propriedades mecânicas.

Diante disso, elaborou-se a pergunta que move essa pesquisa: “Qual a influência de diferentes geometrias TPMS, tamanho de célula e espessura de parede na propriedade mecânica durante esforço de compressão de peças manufaturadas aditivamente em resina flexível por fotopolimerização em cuba?”.

O presente estudo tem a intenção de contribuir fornecendo uma base de informação e dados que servirão para engenheiros e designers projetarem peças e produtos com segurança e mantendo a integridade em condições em que compressão mecânica e absorção de energia sejam requisitos para o sistema.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

- i. Avaliar a influência em esforço mecânico de compressão as variações do tamanho de célula e espessura de parede nas geometrias giroide, Schwarz P e diamante manufaturadas em resina flexível por tecnologia DLP.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Identificar na literatura as geometrias TPMS mais estudadas.
- ii. Identificar na literatura as variações no *design* interno de estruturas TPMS mais estudadas.
- iii. Desenvolver peças em resina flexível com geometrias e variações de *design* definidos.
- iv. Avaliar curvas tensão *versus* deformação provenientes do ensaio de compressão.

- v. Relacionar módulo de elasticidade com o tipo de geometria e parâmetros de *design* utilizados.
- vi. Analisar a estatística de Taguchi e identificar quais fatores são significativos e suas influências no resultado do ensaio de compressão.

1.3 JUSTIFICATIVA E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

De acordo com Lubombo e Huneault (2018) propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva dependem dos parâmetros de impressão, tais como: densidade de preenchimento, espessura da camada, e do tipo de geometria de preenchimento utilizado. Algumas geometrias de preenchimento como giroide, são definidas como TPMS e são modeladas por equações matemáticas. Al-Ketan *et al.* (2018) menciona sobre as geometrias TPMS existentes, suas aplicações e estudos atuais, como também o avanço tecnológico na manufatura aditiva possibilitando a produção de peças com tal complexidade tridimensional. Tais estruturas eram praticamente impossíveis de serem construídas anteriormente ou o custo era muito alto devido à sua alta complexidade.

Outro ponto importante é a grande opção de matérias-primas a serem trabalhadas dentro da manufatura aditiva e o impacto nas propriedades mecânicas da peça final, dentre elas: polímeros como Ácido Polilático (PLA); poliuretano termoplástico (TPU); acrilonitrila butadieno estireno (ABS); resinas foto polimerizáveis e metais como alumínio; titânio e ligas de aço (AL-KETAN *et al.* 2018).

No levantamento bibliográfico feito, pode-se observar que grande parte das pesquisas envolvendo estruturas TPMS são utilizados metais, polímeros tradicionais (PLA, ABS), resinas com ou sem carga cerâmica ou metálica como matéria prima e para os parâmetros de *design* são estudados o tamanho de célula unitária e espessura de parede. Não foram encontrados estudos em que se analisa a influência de cada parâmetro e variação de geometrias TPMS na peça final como também sua importância estatística. Outro ponto importante analisado no levantamento bibliográfico, em especial na Revisão Sistemática da Literatura (RSL), foi a falta de estudos envolvendo o material flexível como a resina escolhida para esse estudo em ensaios de compressão.

Esse presente trabalho mostra promissor para contribuir com a literatura, visto que, estruturas TPMS estão sendo largamente estudadas para aplicação em diversas áreas da engenharia, Al-Ketan *et al.* (2018) menciona estudos em engenharia estrutural, engenharia de tecidos, com foco em condutividade térmica e elétrica, como também aplicações em isolamentos acústicos. Feng *et al.* (2023) ainda mencionam que estruturas TPMS tem melhores propriedades mecânicas quando comparadas com geometrias mais tradicionais, como as encontradas em *softwares* de planejamento, *honeycomb*, triângulo, linha, cúbico etc.

Entretanto a aplicação de tal estrutura juntamente com resina flexível é pouco estudado de acordo com a revisão sistemática da literatura. Acredita-se que pela dificuldade de se trabalhar com resinas flexíveis devido ao comportamento imprevisível pós impressão seja um dos fatores responsáveis. Tal material vem sendo aplicado em diversos equipamentos, empresas como *Carbon*, desenvolvem solado de tênis, capacetes de futebol americano e *hockey*, todos manufaturados utilizando resinas flexíveis foto polimerizáveis e altamente customizáveis.

Encontrando um *gap* na literatura para se preencher e uma oportunidade para esse estudo colaborar com a comunidade científica com dados práticos sobre estruturas TPMS aplicadas as resinas flexíveis, bem como fomentar futuros estudos sobre o tema. Esta pesquisa não fará uma análise econômica sobre custo, devido ao foco do estudo ser puramente voltado aos processos e parâmetros de impressão citados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está dividido da seguinte forma: introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões e considerações finais.

Na introdução é apresentado a contextualização e problema da pesquisa juntamente com os objetivos e justificativa do trabalho. Já no próximo capítulo foi elaborada a revisão bibliográfica, onde é apresentado os principais conceitos teóricos fundamentados na literatura. Após, apresenta-se a seção de materiais e métodos utilizados e desenvolvidos para o estudo. O próximo capítulo tem-se os resultados obtidos e discussões acerca dos tópicos e no último apresenta-se as considerações finais que o presente trabalho gerou como também ideias de trabalhos futuros.

A FIGURA 1 a seguir ilustra como foi desenvolvida a estrutura do trabalho em relação a classificação da pesquisa.

FIGURA 1 - ABORDAGEM METODOLÓGICA

Natureza da Pesquisa	Abordagem	Processo de Raciocínio	Tipo de Investigação	Instrumentos
Aplicada	Qualitativa	Indutivo	Exploratória	Survey
Básica	Quantitativa	Dedutivo	Descritiva	Estudo de Caso
		Hipotético-Dedutivo	Explicativa	Experimento
		Dialético		Pesquisa-Ação
		Fenomenológico		<i>Design Science</i>

FONTE: Adaptado de Lúcia da Silva e Muszkat Menezes (2005)

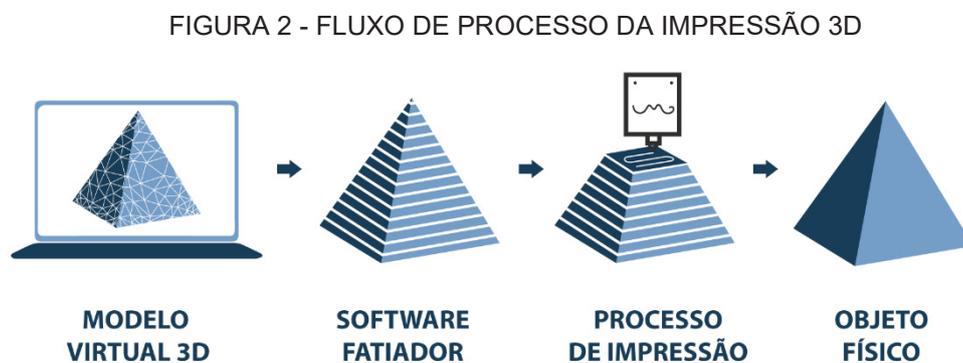
Quanto a natureza da pesquisa, ela é aplicada, pois gera um conhecimento para aplicação prática na manufatura aditiva. Em relação a abordagem é quantitativa, pois utiliza-se de análise estatística para gerar conclusões. O processo de raciocínio é indutivo por ser um estudo derivado de observações da realidade. Quanto a investigação é explicativa, pois visa identificar fatores que causam ocorrência de um fenômeno. Em relação ao instrumento de pesquisa, é o experimento, onde um objeto de estudo é determinado e são estudados as variáveis e os efeitos que eles causam neste objeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo abordam-se os principais conceitos teóricos que embasam o estudo na literatura.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Popularmente conhecida como impressão 3D, a Manufatura Aditiva (MA), vem sendo empregada em diversos setores devido sua praticidade, facilidade e flexibilidade de produção. De acordo com Altıparmak *et al.* (2022) o termo Manufatura Aditiva pode ser descrito como sendo o processo de adicionar material, camada por camada, para construção de peças com base em um modelo tridimensional. Altıparmak *et al.* (2022) menciona sobre o contraste entre MA e manufatura convencional por usinagem, onde o material é subtraído da peça original até atingir a forma final. O fluxo do processo de uma impressão 3D é apresentado a seguir pela FIGURA 2.



FONTE: MOUSTA (2023)

A primeira etapa do processo é a modelagem da peça em *software* 3D, o qual será responsável por definir todas as dimensões da peça, então o projeto é convertido para um formato compatível e padrão, normalmente é utilizado o formato *Standard triangle Language* (STL). Então o arquivo é carregado no *software* de planejamento, comumente chamado de “fatiador” cuja função é traduzir o desenho em camadas e assim definir qual a trajetória o bico de impressão irá seguir, quantidade de material extrudado, velocidade e etc. também irá definir informações necessárias referentes a

configurações da impressora 3D. Ao final o arquivo é carregado na impressora 3D que irá seguir a ordem pré-estabelecida pelo “fatiador” e manter as dimensões definidas pelo *software* 3D. Após a impressão, algumas peças necessitam de tratamento para remoção de rebarbas e suportes utilizados, assim dando um acabamento mais estético e funcional à peça.

Diversas áreas têm analisado e estudado aplicação da manufatura aditiva como opções de processo de fabricação, é possível observar que tanto setores mais básicos como hobbistas, uso pessoal, possuem grande popularidade das impressoras 3D, mas também setores com alta tecnologia embargada como a área da saúde, aeroespacial, militar e automobilística (SU; AL'AREF, 2018). Zocca *et al.* (2022) menciona o desenvolvimento da MA no setor aeroespacial, as dificuldades encontradas referente aos parâmetros como microgravidade, dificuldade em simular testes no espaço e como a manufatura aditiva vem mudando para se adaptar a tal cenário. De acordo com Armstrong *et al.* (2022) a manufatura aditiva de metal vem se desenvolvendo com foco na fabricação de estruturas complexas e leves, mencionando até que a manufatura em metal pode vir a ser uma importante tecnologia na próxima revolução industrial. Rouf *et al.* (2022) traz uma revisão de várias áreas, como saúde, alimentação, ortodontia, próteses, indústria da moda, aeroespacial e menciona o impacto que a manufatura aditiva traria para essas áreas, como a redução nas perdas de material, sustentabilidade, redução no consumo energético e importância que a MA será dentro da indústria 4.0. Rouf *et al.* (2022) ainda menciona a grande versatilidade da MA, produção de volumes menores, facilidade para mudança de design das peças e a possibilidade de alta complexidade no design.

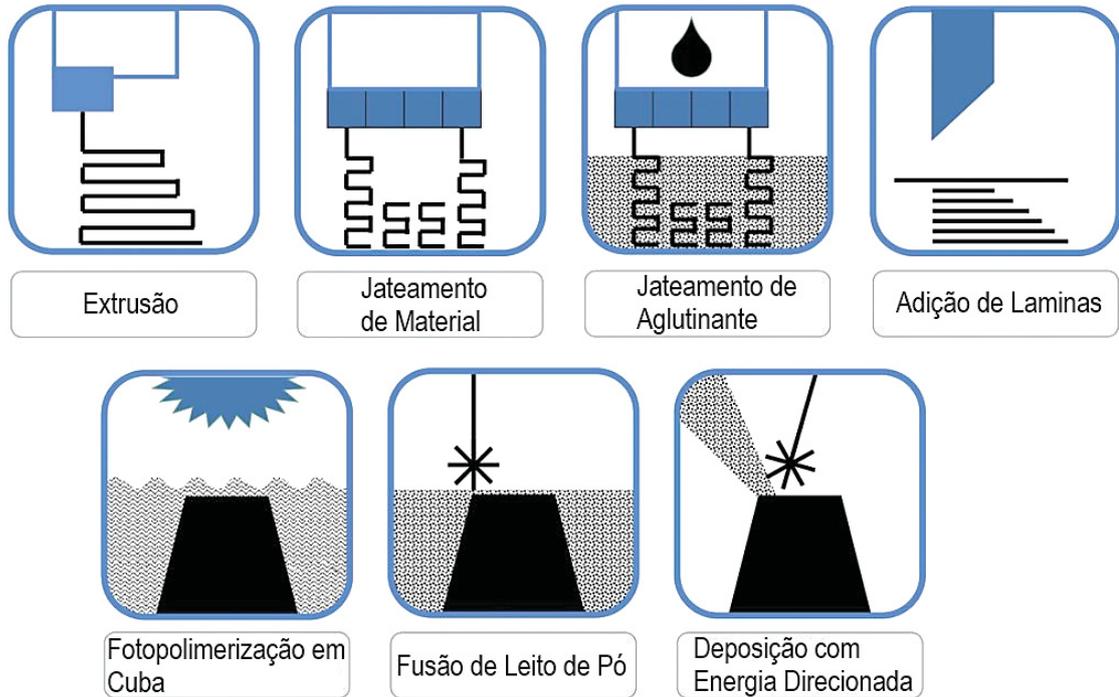
De acordo com Savolainen e Collan (2020) a manufatura aditiva ainda se encontra em estudo e desenvolvimento da tecnologia com adoção gradual das empresas, apesar de ser algo revolucionário, não irá substituir os meios de produção tradicionais e sim trabalhar em conjunto com foco na produção de peças com alta customização e complexidade.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA

Os processos de manufatura aditiva podem ser classificados baseados em sua matéria prima, podendo ser líquido, sólido ou pó VOLPATO (2017). A fim de unificar esse conceito com as tecnologias de adição e adesão envolvidos no processo,

a norma ISO/ASTM 52900 propõe a divisão de sete categorias apresentadas na FIGURA 3.

FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO MANUFATURA ADITIVA ISO/ASTM 52900:2024



FONTE: Adaptado de Seidel (2021)

O grupo de tecnologias classificadas como fotopolimerização em cuba é subdividida em outras três categorias apresentadas pela FIGURA 4.

FIGURA 4 - CATEGORIAS DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

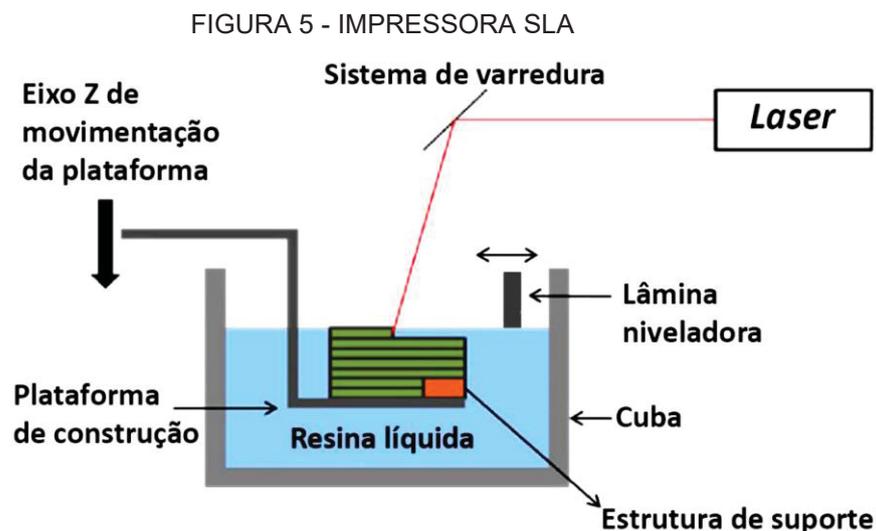


FONTE: Adaptado de Engineering Product Design (2021)

As três categorias são descritas a seguir, exemplificando suas diferenças e peculiaridades.

2.2.1 SLA – Estereolitografia

Criada por Chuck Hull em 1984, foi a primeira tecnologia em impressão 3D para uso em prototipagem rápida (SU; AL'AREF, 2018). O processo de estereolitografia (SLA) consiste em quatro componentes básicos, o primeiro é a cuba contendo a resina foto polimérica, o segundo é a plataforma de impressão onde a resina será curada e aderida camada por camada, terceiro é a fonte de luz ultravioleta ou *laser* responsável por transmitir uma projeção de cada ponto do objeto para a plataforma de impressão e o último componente é o computador responsável por controlar todo o processo (JADHAV; JADHAV, 2022). Todos os componentes básicos são apresentados na FIGURA 5.



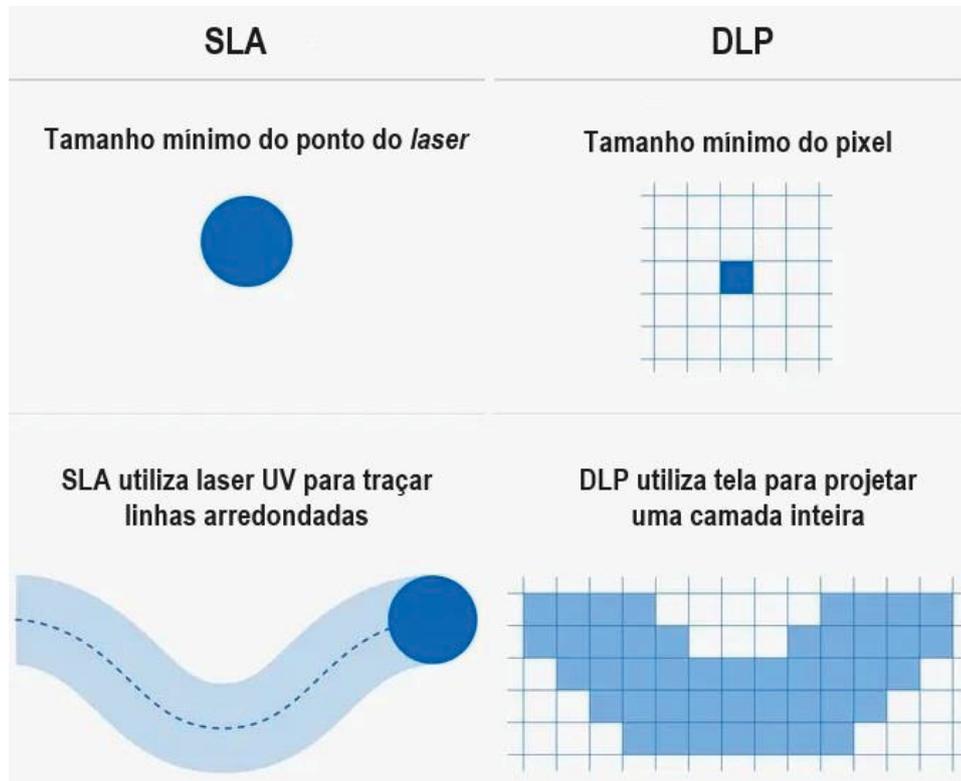
FONTE: Volpato (2017)

2.2.2 DLP – Processamento de luz direta

A tecnologia de Processamento de Luz Direta (DLP), inspirada pela SLA, evoluiu para uma tecnologia única. A grande diferença é a área de cura que o *laser* incide, ao invés de ser ponto a ponto como na SLA, a DLP consegue curar uma camada inteira ao mesmo tempo (TAMEZ; TAHA, 2021). Srivastava *et al.* (2022) traz um comparativo entre SLA e DLP, porém a grande diferença aparece na resolução de

impressão, onde a SLA consegue cerca de 10 μm contra 35 μm a 100 μm da DLP. A FIGURA 6 apresenta a diferença entre DLP e SLA.

FIGURA 6 - DIFERENÇA ENTRE SLA E DLP

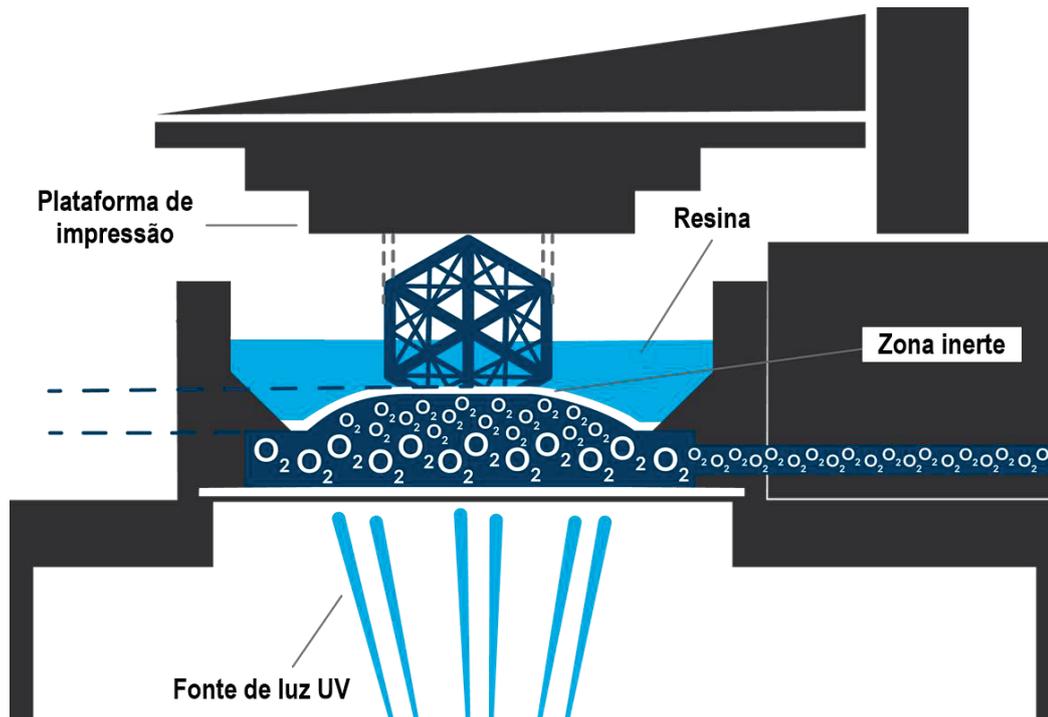


FONTE: Adaptado de Formlabs (2023)

2.2.3 CDLP – Processamento de luz direta contínuo

Por último, o Processamento de Luz Direta Contínuo (CDLP), FIGURA 7, nada mais é do que um avanço da DLP. Onde o princípio de impressão de uma área simultaneamente permanece o mesmo, apenas adicionando uma camada inerte de oxigênio juntamente ao fundo da cuba. Possibilitando assim uma impressão contínua sem a necessidade do deslocamento camada impressa da superfície transparente (TUMBLESTON *et al.*, 2015). Tal tecnologia traz uma melhoria significativa na velocidade de impressão, possibilitando assim uma melhor competitividade em relação a processos de manufatura complexos tradicionais (REDMANN *et al.*, 2020).

FIGURA 7 - IMPRESSORA CDLP

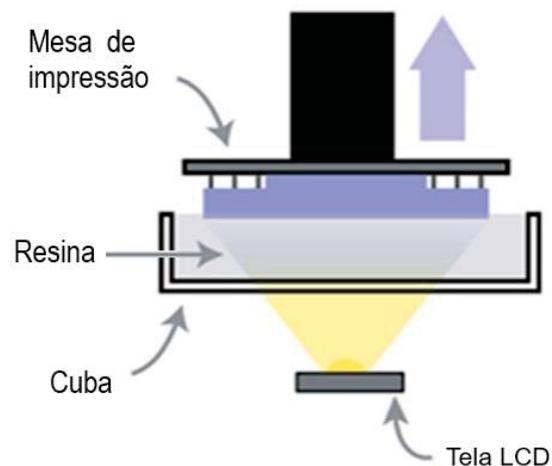


FONTE: Adaptado de Proto3000 (2024)

2.3 PRINCÍPIO DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA - DLP

A FIGURA 8 apresenta o funcionamento geral de uma impressora 3D que utiliza tecnologia DLP juntamente com seus componentes mais importantes: Mesa de impressão; cuba; resina e projetor.

FIGURA 8 – MODELO DE IMPRESSORA DLP



FONTE: Adaptado de Al Rashid *et al.* (2021)

- Mesa de impressão: superfície onde a camada de resina sofrera o processo de cura feito pela imagem projetada.
- Resina: material fotossensível polimerizado por meio de luz ultravioleta (405nm) utilizado nas tecnologias DLP, podendo ter variações de cor e propriedades mecânicas dependendo dos compostos utilizados em sua formulação.
- Cuba: recipiente onde é armazenado a resina e acontece o contato da mesa de impressão com a camada translúcida logo acima do projetor.
- Projetor: fonte geradora da projeção 2D do objeto de interesse.

De acordo com Al Rashid *et al.* (2021) a foto polimerização em cuba é uma forma de manufatura aditiva na qual um material fotossensível é exposto a luz controlada para criação de camadas polimerizadas. Todo esse processo ocorre pela exposição da resina a projeção 2D de uma camada do objeto, curando em poucos segundos, posteriormente move-se a mesa de impressão de baixo para cima e uma nova camada de resina é polimerizada. A tecnologia DLP evoluiu em comparação com a SLA, ao invés de utilizar um laser pontual para curar a área transversal da peça ponto a ponto, toda a secção transversal dentro de uma camada é curada de uma só vez (TAMEZ; TAHA, 2021).

O desenvolvimento do processo DLP resultou na introdução da mais recente tecnologia de Display de Cristal Líquido (LCD). A principal distinção em relação ao DLP é o emprego de uma tela LCD como sistema de imagem. Embora esse método geralmente permita uma alta resolução de impressão, a precisão das peças frequentemente fica aquém daquela alcançada pelo DLP. Isso ocorre principalmente devido à incapacidade de alguns cristais líquidos de se reorganizarem perfeitamente quando submetidos à carga elétrica, o que resulta em vazamento de luz (QUAN *et al.*, 2020). O LCD é uma tecnologia mais barata que o DLP facilitando assim sua popularização, entretanto sua durabilidade é menor, necessitando assim de trocas da tela de projeção do equipamento com frequência.

2.3.1 Características e parâmetros da DLP

No tópico a seguir serão apresentadas as principais variáveis envolvidas na fabricação utilizando DLP, entre elas estão: Tempo de exposição; altura de camada; orientação de impressão; suportes e pós processamento.

2.3.1.1 Tempo de exposição

Tempo de exposição da resina à luz tem efeitos significativos no acabamento da peça, podendo ser estético ou em características mecânicas. Butler *et al.* (2024) concluem que o aumento do tempo de exposição também aumenta o esforço por compressão suportado, afetando também a precisão dimensional da peça com um aumento positivo no desvio padrão. De acordo com Zhang *et al.* (2024) um tempo de exposição insuficientemente baixo, pode acarretar uma baixa polimerização entre camadas podendo levar a uma delaminação.

2.3.1.2 Altura de camada

A altura da camada é determinada considerando as características geométricas e morfológicas do objeto, além de sua finalidade (Melchels *et al.*, 2010). Em situações que exigem elevada precisão, a altura da camada é reduzida ao mínimo. Em contrapartida, quando o custo e o tempo são prioritários, opta-se por camadas mais espessas, como na impressão de modelos de teste (PANDEY *et al.*, 2003). Estudos como de Alshamrani *et al.* (2022) e Tahayeri *et al.* (2018) constataram que amostras impressas com uma camada de 100 μm apresentavam maior resistência à flexão, significativamente superior em comparação com o grupo que utilizou camadas de 50 μm .

2.3.1.3 Orientação de impressão

De acordo com Unkovskiy *et al.* (2018) a orientação de impressão pode afetar algumas características da peça como: precisão dimensional; presença de suportes e a capacidade de utilização do volume total de impressão do dispositivo. Reymus *et al.* (2020) verificou que a orientação de impressão também afeta a resistência mecânica a compressão das peças, camadas impressas paralelas ao plano de compressão

apresentam uma maior resistência do que camadas impressas perpendicularmente. Porém a determinação da orientação de impressão ideal pode variar com base na aplicação da resina e na impressora utilizada (PIEDRA-CASCÓN *et al.*, 2021). Tornando assim um parâmetro importante de se analisar devido ao impacto em características da peça.

2.3.1.4 Suportes

Suporte são fortemente influenciados pela orientação de impressão, posição na mesa de fixação e a quantidade, tamanho e localização das peças (PIEDRA-CASCÓN *et al.*, 2021). Alharbi *et al.* (2016) e Osman *et al.* (2017) descrevem sobre a importância na verificação da orientação de impressão e o impacto no uso de suportes, concluindo que algumas variações de ângulos podem gerar uma geometria autoportante, ou seja, sem a necessidade de suportes.

2.3.1.5 Pós processamento

O pós-processamento pode ser dividido em quatro etapas: remoção, limpeza, cura e remoção das estruturas de suporte (TAORMINA *et al.*, 2018). A remoção envolve retirar fisicamente o dispositivo da mesa de fixação, enquanto a limpeza consiste em eliminar a resina não curada do objeto, submergindo-o em um solvente orgânico como álcool isopropílico. A cura é recomendada para concluir a polimerização do dispositivo, utilizando uma máquina de emissão de luz ultravioleta (UV). Por fim, a remoção das estruturas de suporte da peça pode ser realizada com o auxílio de um dispositivo de corte (PIEDRA-CASCÓN *et al.*, 2021).

2.4 POLÍMEROS

Polímeros são compostos por macromoléculas diferenciadas pelo seu tamanho de cadeia, estrutura química e interação intra e intermolecular. São um conjunto de ligações químicas repetidas ao longo da cadeia denominados meros (CASLLISTER; RETHWISCH, 2018). Grande parte dos polímeros utilizados hoje em dia são de origem sintética, produzidos em larga escala e com preços relativamente baixos. Outros materiais como metais e madeiras são substituídos por polímeros com

características mecânicas parecidas, porém com a vantagem do preço baixo de produção e facilidade de manuseio (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Polímeros plásticos, podem ser divididos em: termoplásticos e termorrígidos. De acordo com Canevarolo (2013) os polímeros termoplásticos são materiais que se tornam maleáveis com o aumento da temperatura, permitindo que eles fluam e sejam moldados, como também a possibilidade de reutilização através do reaquecimento do material. Já os termorrígidos possuem a diferença de reagirem quimicamente, essa reação forma ligações cruzadas entre cadeias e enrijecessem. Diferentemente dos termoplásticos, não podem ser reaquecidos para uma reutilização (CANEVAROLO, 2013).

Resinas utilizadas em tecnologias de fotopolimerização em cuba são polímeros termorrígidos, devido a reação química que ocorre com a presença de luz ultravioleta e cura total do material. Grande parte da fórmula química das resinas foto polimerizáveis comerciais são confidenciais, porém normalmente consistem em metacrilatos multifuncionais como: acrilato de uretano; acrilato de epóxi e monômero/oligômero acrílico (ZHANG; XIAO, 2018).

Resinas ainda tem a capacidade de serem dopadas com outros tipos de materiais, como ligas de metais e cerâmicos, com o intuito de se obter diferentes características mecânicas. A revisão sistemática da literatura presente nessa dissertação traz exemplos de diferentes tipos de materiais utilizados desde resinas comerciais de marcas como *Anycubic* e *Formlabs* presentes nos estudos de SAVA *et al.* (2023), Yu *et al.* (2019) e Haney e Siller (2023), até resinas com carga cerâmica presentes nos estudos de Shen *et al.* (2021) e Shi *et al.* (2023) fabricadas pelos autores.

2.5 ESTRUTURAS *TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE* (TPMS)

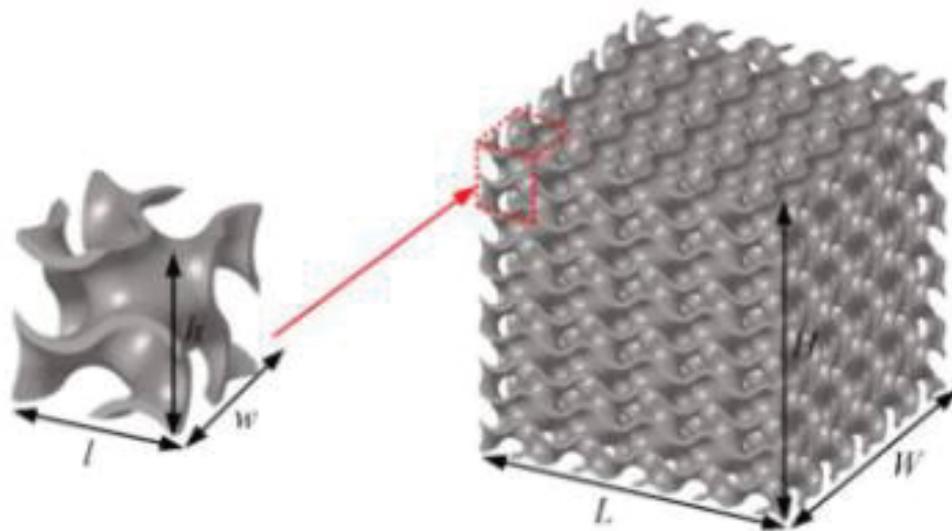
Estruturas geométricas como *honeycomb* são conhecidas e largamente estudadas na maximização de propriedades mecânicas quando empregadas em peças manufaturadas. De acordo com Park *et al.* (2022) tais geometrias tem uma limitação devido a presença de quinas, canto vivo, e nós, onde a propagação de fraturas ocorrem nesses locais. Devido a este problema, uma nova estrutura foi proposta por modelo matemático por volta do século 19, onde não ocorre a presença de tais quinas e cantos vivos, chamada de *Triply Periodic Minimal Surface*, porém devido a sua

complexidade de fabricação, só foi possível ser produzida com a chegada da manufatura aditiva por volta do ano de 2010 (PARK *et al.*, 2022).

Recentes avanços na manufatura aditiva facilitaram na produção de geometrias com grande complexidade, tamanhos reduzidos e possibilitou a fabricação de estruturas que não são possíveis de se produzir através de técnicas tradicionais de fabricação. De acordo com Khaleghi *et al.* (2021) materiais celulares são geralmente conhecidos por possuir uma estrutura sólida resistente e porosa com baixa densidade, naturalmente presente em ossos, madeira e argilas, possuem uma alta permeabilidade, alta absorção de energia e alta resistência mecânica por peso.

Esse tipo de estrutura é dividida em células unitárias repetidas ao longo de toda a estrutura criando assim um padrão (AL-KETAN *et al.*, 2018). A FIGURA 9 exemplifica a repetição da estrutura celular giroide dentro de um cubo.

FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DE UMA CÉLULA UNITÁRIA DE GIROIDE E SUA REPETIÇÃO EM UM CUBO

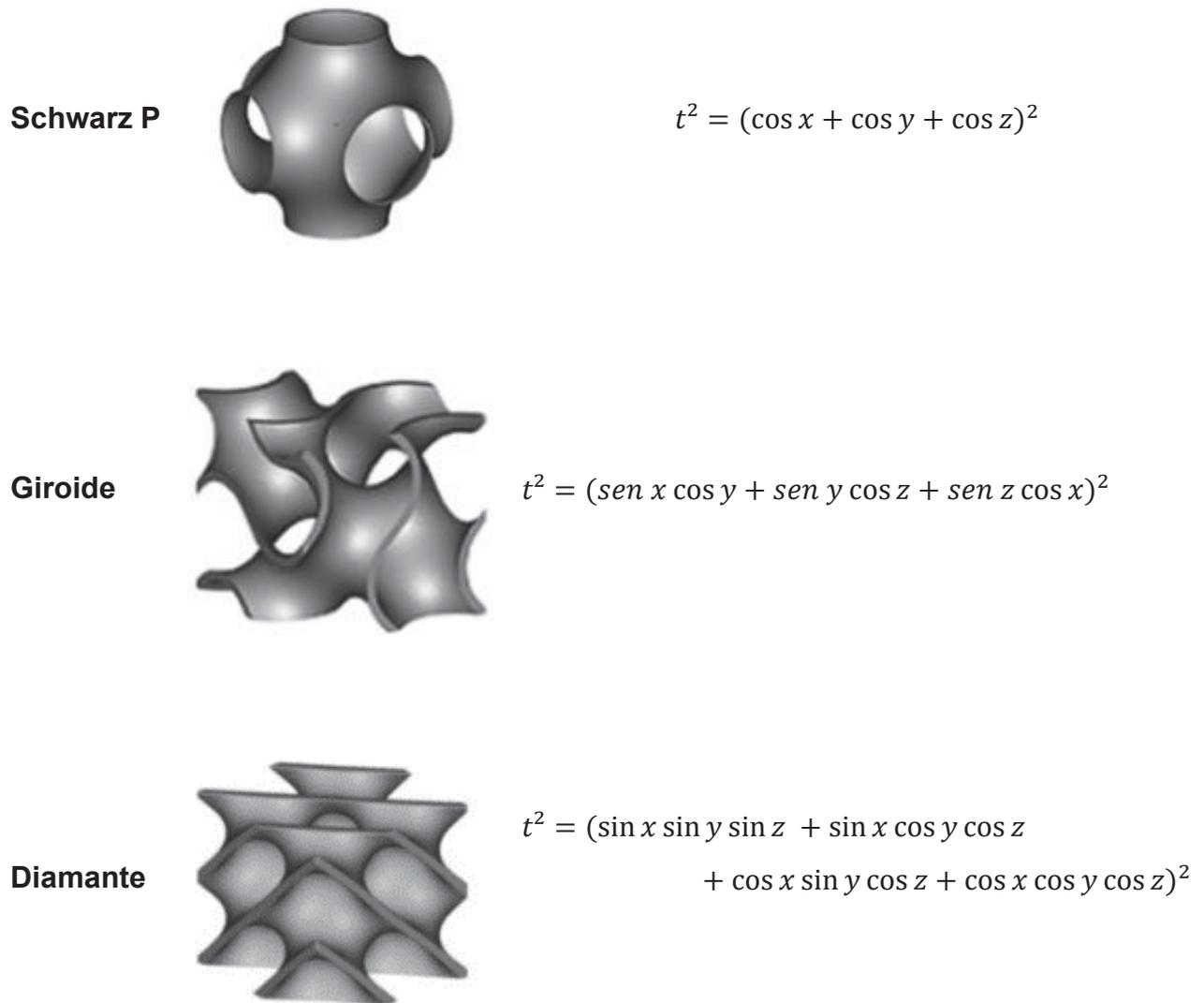


FONTE: Feng *et al.* (2023)

Esse *design* é descrito e modelado por equações matemáticas relativamente simples que se repetem ao longo de toda peça, uma variedade de estruturas já foram modeladas, dentre elas: Schwarz P, *I Wrapped Package* (IWP), Diamante, Giroide, Neovius, Split P, Lidinoid.

Para este estudo, foram utilizadas três estruturas descritas na FIGURA 10 com a representação de cada célula unitária ao seu lado:

FIGURA 10 - CÉLULAS UNITÁRIAS TPMS



FONTE: Al-Ketan *et al.* (2018) e Kladovasilakis *et al.* (2022)

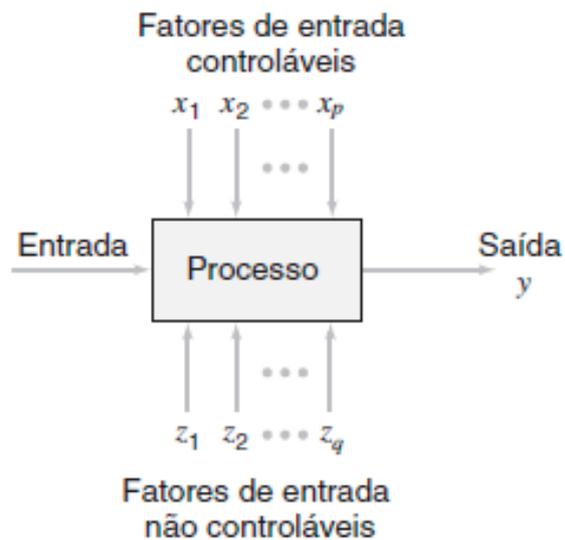
Al-Ketan *et al.* (2018) menciona que nos últimos anos esse tipo de estrutura vem sendo largamente estudada devido suas propriedades mecânicas como alta rigidez em ensaios de compressão e deformação quando comparadas com estruturas mais tradicionais presentes em *softwares* de planejamento de processo, como *honeycomb*, cúbica, linha, triângulo etc. De acordo com Feng *et al.* (2023) estudos comprovaram que estruturas TPMS possuem uma maior absorção de energia quando comparadas com estruturas tradicionais como *honeycomb*. (Peng *et al.*, 2022) descreve esse tipo de estrutura como sendo uma otimização para o design que necessitam de baixo peso e boas propriedades mecânicas, já que boa parte da estrutura é composta por espaços vazios.

Devido seu design simples, habilidade de variar espessura de parede e consequentemente sua densidade, estão entre algumas das vantagens do TPMS, tornando-o assim um forte candidato em uma variedade de aplicações (KHALEGHI *et al.*, 2021).

2.6 MÉTODO ROBUSTO DE TAGUCHI

Desenvolvido pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi tem como objetivo o controle da qualidade, tanto de produtos quanto processos e aumento da produtividade e diminuição dos custos. Montgomery (2016) descreve o processo como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transformam um material de entrada em um produto de saída. Dentro desse processo existem variáveis controláveis e não controláveis (também chamadas de fatores de ruído). A FIGURA 11 a seguir exemplifica o que é processo de acordo com Montgomery.

FIGURA 11 - MODELO GERAL DE UM PROCESSO



FONTE: Montgomery (2016)

Métodos de planejamento de experimento desempenham um papel importante dentro da engenharia, onde novos produtos são desenvolvimentos ou os existentes são melhorados. O resultado do método impacta diretamente numa melhora na fabricação do produto, desempenho do processo, maior confiabilidade, menor custo e menor tempo de desenvolvimento (MONTGOMERY, 2016).

O método Taguchi possui vantagens quando comparado entre os métodos tradicionais de design de experimentos, utiliza uma quantidade reduzida de experimentos necessários por analisar pares de possibilidades ao invés de todas as combinações, reduzindo assim o tempo e custos necessários desse processo (ANSARI; KAMIL, 2022).

O método gira em torno do uso de um planejamento ortogonal para os fatores controláveis e seu resultado é expresso na média de cada observação e uma estatística que combina a média e variância, chamada de razão sinal-ruído (TAGUCHI, 1986). Os arranjos ortogonais seguem o padrão do QUADRO 1 a seguir.

QUADRO 1 – Arranjos ortogonais

Arranjo Ortogonal	Nº de linhas	Nº máximo de fatores	Nº máximo de fatores com esses níveis			
			2	3	4	5
<i>L</i> ₄	4	3	3	-	-	-
<i>L</i> ₈	8	7	7	-	-	-
<i>L</i> ₉	9	4	-	4	-	-
<i>L</i> ₁₂	12	11	11	-	-	-
<i>L</i> ₁₆	16	15	15	-	-	-
<i>L'</i> ₁₆	16	5	-	-	5	-
<i>L</i> ₁₈	18	8	1	7	-	-
<i>L</i> ₂₅	25	6	-	-	-	6
<i>L</i> ₂₇	27	13	-	13	-	-
<i>L</i> ₃₂	32	31	31	-	-	-
<i>L'</i> ₃₂	32	10	1	-	9	-
<i>L</i> ₃₆	36	23	11	12	-	-
<i>L'</i> ₃₆	36	16	3	13	-	-
<i>L</i> ₅₀	50	12	1	-	-	11
<i>L</i> ₅₄	54	26	1	25	-	-
<i>L</i> ₆₄	64	63	63	-	-	-
<i>L'</i> ₆₄	64	21	-	-	21	-
<i>L</i> ₈₁	81	40	-	40	-	-

FONTE: Phadke (1989)

Como exemplo, para um experimento com 4 fatores de 2 níveis cada, é possível utilizar tanto o arranjo L₈ com oito experimentos, quanto L₁₂ com doze experimentos.

2.6.1 Razão Sinal-Ruído

A métrica conhecida como Razão Sinal-Ruído representa uma medida quantitativa da confiabilidade de um processo ou produto. Em outras palavras, ela avalia a eficiência da conversão de energia no processo (TAGUCHI *et al.*, 1999). Em vez do desvio padrão, a Razão Sinal-Ruído é preferida como um indicador de qualidade devido à sua menor sensibilidade à média em comparação com o desvio padrão (KARNA; SAHAI, 2012). Derivada da função perda quadrática de Taguchi, essa métrica é mais simples de calcular e interpretar, tornando-a mais amplamente utilizada. Geralmente, é empregada para reduzir a sensibilidade ao ruído antes de ajustar a média (PHADKE, 1989).

2.6.2 Problemas estáticos e dinâmicos

Segundo Phadke (1989), os problemas estáticos são caracterizados pela ausência de fatores de sinal, consistindo apenas de fatores de ruído e fatores de controle. Nesse contexto, a razão sinal-ruído é abordada de três maneiras distintas para esses problemas. São elas:

- Menor é melhor: quando é necessário minimizar a variável resposta, a equação para calcular a razão sinal-ruído é apresentada na Equação (1).

(1)

$$SN = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right)$$

- Nominal é melhor: quando a variável resposta precisa alcançar um valor alvo, a equação para calcular esse tipo está na Equação (2).

(2)

$$SN = 10 \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right)$$

Onde μ^2 é a média quadrada do fator e σ^2 é a variância.

- Maior é melhor: a variável resposta precisa ser maximizada, a equação é apresentada na Equação (3).

(3)

$$SN = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

As características dos problemas dinâmicos diferem dos estáticos devido à presença de fatores de sinal. De acordo com Phadke (1989) esses problemas podem ser classificados como:

- Contínuo-Contínuo (C-C): Quando tanto o sinal quanto a resposta apresentam variáveis contínuas;
- Contínuo-Digital (C-D): Quando o sinal é contínuo, mas a resposta é categórica (como 1 ou 0, SIM e NÃO);
- Digital-Digital (D-D): Quando tanto o sinal quanto a resposta são categóricos;
- Digital-Contínuo (D-C): Quando o sinal é categórico, mas a resposta é contínua.

2.7 ENSAIO MECÂNICOS EM POLÍMEROS

Nesta seção será abordado os princípios para os ensaios de compressão e resiliência em polímeros.

2.7.1 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão abrange muitas características diferentes e materiais, desde metais até polímeros. De maneira geral o ensaio ocorre com um corpo de prova de tamanho e formato padronizado é colocado no centro da estrutura, então a parte superior da máquina é acionada comprimindo o corpo de prova até a uma altura desejável.

Hoje em dia grande parte das máquinas são instrumentadas, ou seja, fornecem um gráfico tensão *versus* deformação gerado pelo computador. Na norma

ASTM D3574, temos a opção de alguns testes relativos à compressão, sendo o mais comum o teste C.

Para o teste C, o corpo de prova deve apresentar uma estrutura de 50 mm x 50 mm x 25 mm, caso possível, pode-se utilizar tamanhos maiores, sempre respeitando a altura ser menor ou igual a 75 % da menor dimensão superior da peça, e apresentar paralelismo entre as superfícies superior e inferior. Devem possuir um mínimo de 2500mm² de área superficial e um mínimo de 20 mm de altura. Deve-se utilizar três corpos de prova por amostra, calculando assim a média observada (ASTM D3574 – 17, 2017).

Em relação ao procedimento, referente ao teste C, primeiramente deve-se fazer duas compressões do corpo de prova entre 75 e 80 % da sua altura original, com uma velocidade de 250 mm/min, após deixar descansar por cerca de 6 minutos. A seguir o teste se inicia a uma velocidade de 50 mm/min e é determinado sua altura assim que a carga total atingir 140 Pa, em seguida continua-se a compressão até 50 % de sua altura original a 50 mm/min de velocidade e é determinada a força final, em N, depois de 60 s (ASTM D3574 – 17, 2017).

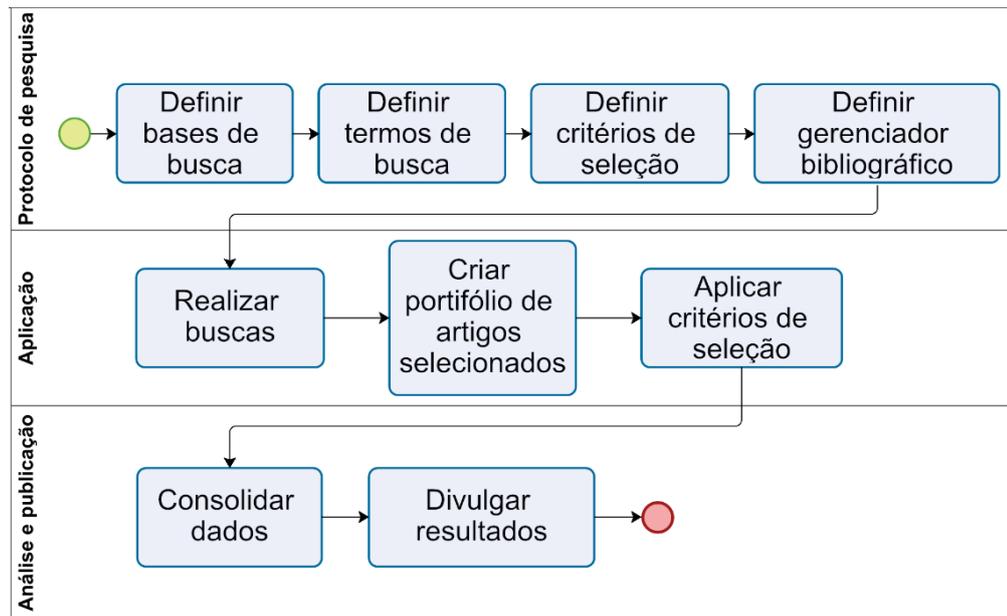
2.8 ESTUDOS CORRELATOS

Nesta parte é apresentada uma revisão sistemática da literatura de estudos correlatos encontrados.

2.8.1 Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Como base da revisão utilizou-se o seguinte fluxograma apresentado na FIGURA 12 para condução da RSL.

FIGURA 12 - ETAPAS DA RSL



FONTE: O autor (2023)

2.8.2 Definição do protocolo da RSL

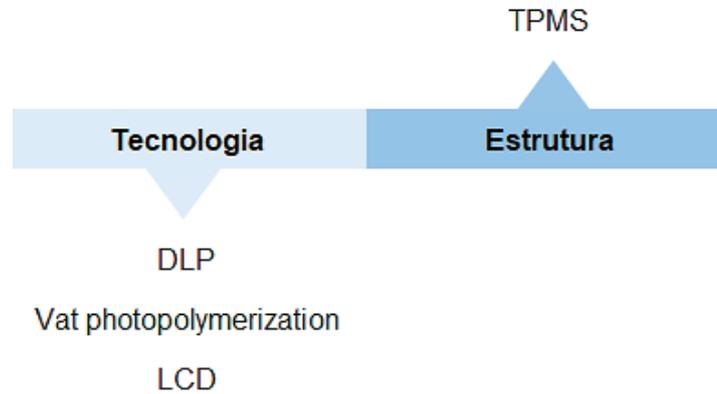
O protocolo da RSL foi elaborado após uma breve pesquisa para conhecer um pouco dos estudos atuais sobre o assunto, para então, definir com maior certeza o protocolo final de revisão. Tal pesquisa foi feita através das bases de dados *Science Direct*, *Web of Science* e *Google Scholar*, utilizando palavras-chave mais gerais como: manufatura aditiva; impressão 3D, TPMS, foto polimerização em cuba, ensaio de compressão. Tanto em português quanto em inglês.

Após a definição do objetivo geral da revisão como sendo: “apresentar estudos que tratem sobre peças modeladas com base em geometrias TPMS e manufaturadas através de tecnologia de fotopolimerização em cuba, e seu comportamento em ensaios de compressão”, deu-se início a criação do protocolo definitivo de RSL. Foram estipulados nesse protocolo: as palavras-chave de pesquisa; *string* de busca; critérios de inclusão e exclusão; bases de busca; intervalo de tempo de publicação; tratamento e análise dos dados, e por fim, a pergunta que moveu a RSL, sendo essa:

- Quais estruturas TPMS e seus parâmetros de impressão foram utilizados para obterem os melhores resultados em ensaios de compressão?

Após as primeiras pesquisas exploratórias, estipulou-se o conjunto de palavras-chave FIGURA 13.

FIGURA 13 - PALAVRAS-CHAVE DE PESQUISA POR ÁREA



FONTE: O autor (2023)

Definiu-se também a *string* de busca por meio dos operadores booleanos *AND* e *OR* para utilização nas bases de dados, sendo essa: (“*DLP*” *OR* “*vat photopolymerization*” *OR* “*LCD*”) *AND* “*TPMS*”.

As bases de dados escolhidas para o levantamento foram: *Web of Science* e *Science Direct*. A escolha se deu por serem bases muito utilizadas dentro da área de engenharia, tema desse estudo. O período estipulado para a revisão foi de 2013 até 2024, cerca de 10 anos para aumentar a quantidade de estudos alcançados.

Para os critérios de inclusão (CI) e exclusão (CE), esses foram estipulados da seguinte forma:

- Critérios de Inclusão:
 - CI1: Possui afinidade com o tema ou termos de busca?
 - CI2: Somente artigos de periódicos;
 - CI3: Somente estudos utilizando estruturas TPMS;
 - CI4: Ter utilizado ensaios de compressão;
 - CI5: Discutir sobre parâmetros de impressão como: % de preenchimento, altura de camada, espessura de linha.

- Critérios de Exclusão:
 - CE1: Repetição;
 - CE2: Não atende ao CI1;
 - CE3: Artigos de outros idiomas além do português e inglês.

A análise de dados foi feita primeiramente dentro do *software* Excel, pela facilidade em verificar repetições e posteriormente transferida para o gerenciador *Mendeley*.

2.8.3 Condução e desenvolvimento da RSL

A *string* de busca foi submetida nas bases de dados no mês de janeiro de 2024, e resultaram nas seguintes quantidades de artigos, apresentadas na QUADRO 2.

QUADRO 2 – Resultados das buscas

<i>String</i>	Science Direct	Web of Science
<i>("DLP" OR "vat photopolymerization" OR "LCD") AND "TPMS"</i>	218	36
Total =	254	

FONTE: O autor (2023)

A busca retornou um total de 254 artigos que foram transferidos para o Excel onde foi feita a avaliação de acordo com os critérios de inclusão CI1, CI2 e CI3. Vale ressaltar que foi definido a utilização de palavras-chave mais abrangentes para aumentar a quantidade de artigos, visto que foram encontrados poucos resultados caso mais palavras fossem incluídas, como: *compression; flexible resin; elastic resin*.

A primeira avaliação teve foco em palavras-chave, título e caso o título não fosse claro foi analisado o resumo. Todos os estudos encontrados eram de periódicos, então a CI2 foi atendida, como também, todos os estudos analisam estruturas TPMS e possuíam afinidade com o tema, atendendo assim a CI 1 e CI3, permanecendo um total de 53 artigos.

No segundo filtro, teve como foco a análise de todos os resumos e verificação dos critérios CI4 e CI5. Ao final permaneceram 21 artigos para a análise.

Desses 21 artigos finais, foi feita uma leitura breve dos métodos e conclusão para definição se os artigos tratavam da variação de parâmetros em estruturas TPMS e posteriormente submetendo-as a ensaios de compressão, desse total apenas 4 artigos foram selecionados para uma leitura completa. Também foi encontrado mais um artigo fora da busca, utilizando o google acadêmico e a mesma *string* de busca, que foi adicionado ao final por cumprir todos os critérios de inclusão, totalizando 5 artigos para a revisão.

Vale ressaltar que grande parte dos artigos abordam o uso de resinas dopadas com compostos cerâmicos para impressão, dificultando assim a encontrar artigos que abordam o uso de resinas flexíveis e/ou elásticas que é o foco de estudo da presente dissertação. Resultando assim em um possível *gap* de literatura acerca desse tema. Os artigos restantes são apresentados no QUADRO 3.

QUADRO 3 – Artigos para realização da síntese

Título	Autores	Periódico
<i>Evaluation of the mechanical behavior of 3D printed cellular metamaterials with special geometries</i>	Sava Rareş, Apostol Dragoş Alexandru, Constantinescu Dan Mihai	<i>Proceedings of the Romanian Academy</i>
<i>Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing</i>	Shixiang Yu, Jinxing Sun, Jiaming Bai	<i>Materials & Design</i>
<i>Anthropo-fidelic behavior of elastic-plastic lattice structures</i>	Christopher W. Haney, Hector R. Siller	<i>Polymer Testing</i>
<i>Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures</i>	Minhao Shen, Wei Qin, Bohang Xing, Weiming Zhao, Shuyue Gao, Ying Sun, Ting Jiao, Zhe Zhao	<i>Journal of the European Ceramic Society</i>
<i>Characterization and enhancement of quasi-static and shear mechanical properties of 3D printed lightweight SiOC lattices: Effects of structural design and parameters</i>	Kaiwen Shi, Wenqiang Yang, Hui Mei, Yuekai Yan, LinDong Xu, Laifei Cheng, Litong Zhang	<i>Journal of the European Ceramic Society</i>

FONTE: O autor (2023)

Esses cinco artigos foram sintetizados e os resultados apresentados a seguir.

2.8.4 Apresentação de resultados

Sava *et al.* (2023) teve como objetivo principal o estudo da influência da variação das quantidades de células unitárias em três geometrias diferentes. Foram utilizadas as geometrias giroide, diamante e Schwarz P e variações de 1x1x1, 4x4x4, 6x6x6 e 8x8x8 quantidade de células unitárias em cada corpo de prova. Lembrando que o volume total foi mantido o mesmo em todas as combinações, assim o *software* calculou automaticamente os parâmetros de espessura de parede para que não

variassem o volume da estrutura. O estudo concluiu que a combinação de giroide com 8x8x8 células unitárias apresentou o melhor comportamento em ensaios de compressão, ou seja, suportaram uma carga maior antes do colapso total da estrutura.

Yu *et al.* (2019) estudaram o efeito dos parâmetros, tamanho de célula unitária e densidade relativa em ensaios de compressão e fratura. Utilizando uma resina com composto cerâmico, foram fabricados corpos de provas com estruturas diamante, Schwarz P e giroide, com densidades (percentual de massa pelo volume da peça) de 15, 20 e 30 %, tamanhos de célula de 2,5; 5 e 10 mm (medida da aresta de cada célula) em arranjos de 4x4x4, 2x2x2 e 1x1x1 células. Foi concluído que estruturas de densidade de 30 % e arranjo de 4x4x4 células unitárias obtiveram os maiores valores de tensão. Também foi observado que estruturas com células unitárias maiores apresentaram maiores resultados do que estruturas menores.

Hane e Siller (2023) utilizaram cinco estruturas, Schwarz P, giroide, diamante, lidinoid e splitP, com variações em densidade (percentual de massa pelo volume da peça) de 15 %, 25 % e 50 %. Ou seja, o *software* controlou a espessura de parede para se adequar a densidade selecionada. A resina utilizada para impressão foram duas, de nomenclatura 50A e 80A da empresa *Formlabs* com características flexíveis. Foram impressos cilindros com 12,5 mm de altura e diâmetro igual a 29 mm. O trabalho pode concluir que estruturas giroide impressas em 80A possuíram uma maior absorção de energia quando comparada com outras, já Schwarz P obteve a maior tensão observada no ensaio de compressão.

Shen *et al.* (2021) estudaram quatro estruturas TPMS, sendo elas: Schwarz P; giroide; IWP e s14 (proposta pelos autores). Foram impressos corpos de prova em resina com carga cerâmica com dimensões fixas de 10x10x10 mm, espessura de parede fixa de 0,1 mm e variação no tamanho da célula unitária, de 2x2x2 mm, 3x3x3 mm, 4x4x4 mm e 5x5x5 mm. Através da variação dos parâmetros o estudo teve como objetivo avaliar a influência da densidade relativa da peça e geometria através de ensaios de compressão. O artigo concluiu que a geometria s14 obteve uma maior tensão antes de deformar, seguido por IWP, giroide e Schwarz P. Quando relacionado a baixas densidades, o giroide apresentou um melhor comportamento, tornando um candidato interessante para aplicações leves com densidade relativa de 6,7 % e tensão máxima de 5,6 MPa. Já a geometria s14 obteve a maior resistência com uma densidade relativa de 30 % e 105 MPa.

Shi *et al.* (2023) abordaram um comparativo entre duas estruturas TPMS, Schwarz P e giroide. Foram feitas variações na geometria onde cada célula unitária iria aumentando de tamanho formando um gradiente, como também, corpos de prova com geometrias uniformes. Houve variação de densidade relativa de cada uma, sendo elas, 67,18 %; 67,44 %; 66,08 % e 66,23 %. Tamanho de corpo de prova de 50x50x50 mm, contendo distribuição de 5x5x5 células unitárias em cada. A espessura de parede variou de 0,5 a 2,1 mm para o Schwarz P gradiente e fixo em 1,3 mm para o uniforme, para o giroide gradiente variou de 0,5 a 1,5 mm e fixo de 1 mm para o uniforme. Tais valores tiveram com objetivo de igualar a densidade relativa entre eles. Foram impressos em tecnologia SLA com uma resina padrão LGPWH04 da *Formlabs*. Os resultados obtidos foram que as estruturas Schwarz P gradiente conseguiram absorver uma maior energia quando comparadas com giroide. Outro resultado interessante foi que tanto o giroide uniforme quanto o gradiente se comportaram de forma muito similar durante os ensaios de compressão. Entre as estruturas, Schwarz P gradiente teve a maior tensão registrada, seguido por ambos giroide e por final o Schwarz P uniforme. A energia absorvida foi calculada, colocando Schwarz P gradiente como a melhor estrutura, obtendo valores maiores que o restante.

2.8.5 Síntese da revisão sistemática

Concluída a revisão sistemática e apresentado os resultados, respondeu-se à pergunta que moveu a revisão, sendo essa: “quais estruturas TPMS e seus parâmetros de impressão foram utilizados para obterem os melhores resultados em ensaios de compressão?”. Os resultados encontram-se apresentados no QUADRO 4.

QUADRO 4 – Resultados RSL

Nome artigo	Geometrias	Material e processo	Parâmetros de Processo	Valores	Síntese da conclusão do artigo
<i>Evaluation of the mechanical behavior of 3D printed cellular metamaterials with special geometries</i>	Giroide, Schwarz P e Diamante	Resina padrão Anycubic Impressora DLP	Quantidade de célula unitária por corpo de prova	1x1x1 4x4x4 6x6x6 8x8x8	Combinação de giroide com 8x8x8 células suportou um maior pico de tensão durante a compressão.
<i>Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing</i>	Schwarz P Giroide	Resina LGPWH04 Impressora SLA	Densidade relativa	Entre 66 e 67 %	Schwarz P gradual apresentou maior limite de resistência e absorção de energia
			Espessura de parede	Gradual Schwarz P 0,5 a 2,1mm Giroide 0,5 a 1,5mm Uniforme Schwarz P 1,3mm Giroide 1mm	
<i>Characterization and enhancement of quasi-static and shear mechanical properties of 3D printed lightweight SiOC lattices: Effects of structural design and parameters</i>	Diamante, Giroide, e Schwarz P	Resina composto cerâmico Impressora DLP	Densidade relativa	15, 20 e 30 %	Geometria giroide de densidade relativa de 30% e arranjo de 4x4x4 células unitárias obtiveram os maiores valores de tensão.
			Quantidade de célula	1x1x1 2x2x2 4x4x4	
<i>Anthropo-fidelic behavior of elastic-plastic lattice structures</i>	Schwarz P, giroide, diamante, lidinoid e splitP	Resina 50A e 80A Impressora SLA	Densidade relativa	15, 25 e 50 %	Giroide obteve a maior energia absorvida e SchwarzP obteve maior tensão suportada em compressão
<i>Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures</i>	Schwarz P; giroide; IWP e s14	Resina composto cerâmico Impressora DLP	Tamanho de célula unitária	2x2x2 mm 3x3x3 mm 4x4x4 mm 5x5x5 mm	Geometria s14 obteve uma maior tensão antes de deformar, seguido por IWP, giroide e Schwarz P. Quando relacionado a baixas densidades, o giroide apresentou melhores resultados

FONTE: O autor (2023)

A partir dos resultados analisados pode-se observar que estruturas giroide e Schwarz P estão presentes em todos os artigos, tornando assim candidatos interessantes para serem avaliados em outros cenários. Uma conclusão presente em três dos cinco artigos, foi que corpos de prova com giroide obtiveram os melhores resultados. Porém, vale ressaltar que em alguns artigos essa tendência não foi seguida, podendo ter outros fatores influenciando os resultados, como: diferentes parâmetros utilizados, materiais e tecnologias de impressão diferentes, que podem impactar diretamente nos resultados.

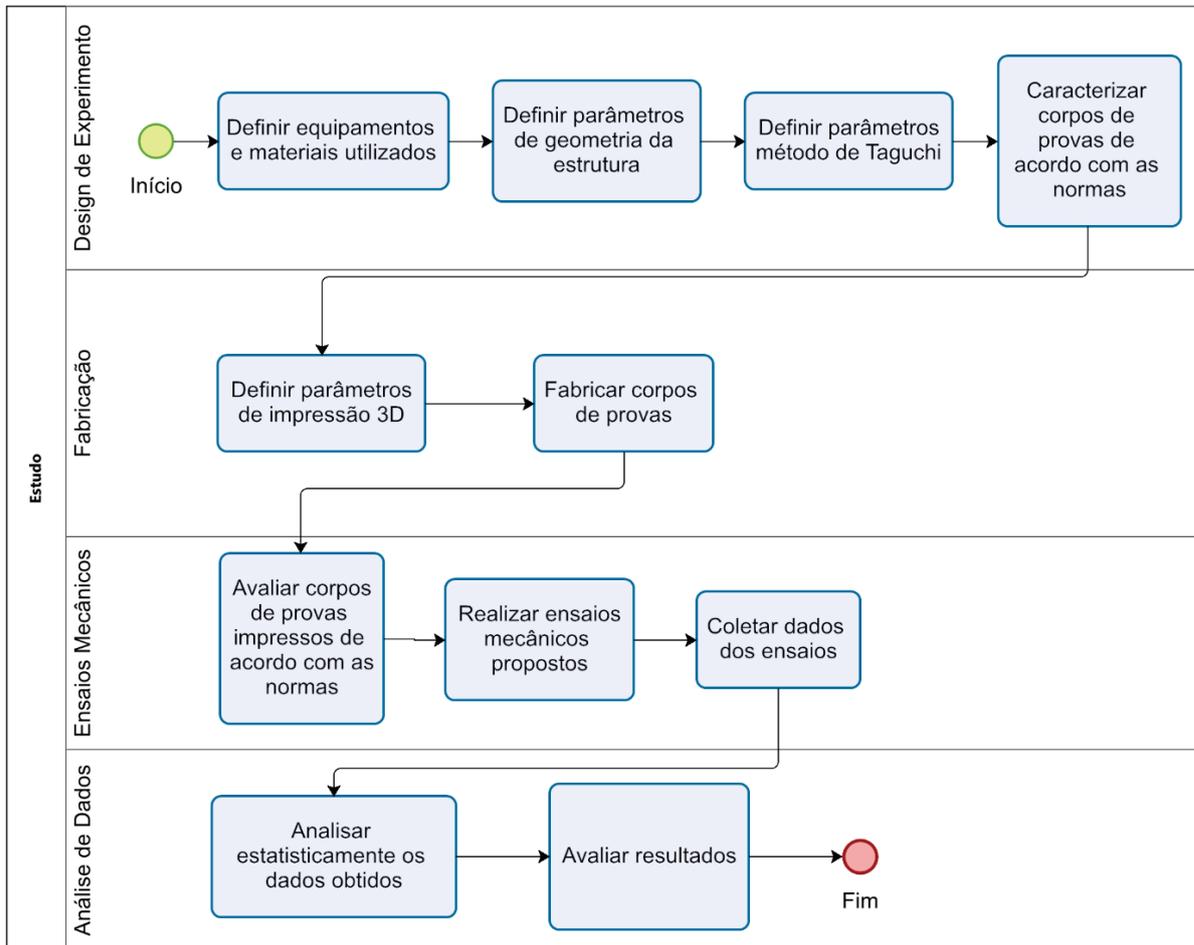
Outro ponto para se levar em consideração é o tipo de material utilizado, todos os artigos utilizam de materiais diferentes do proposto. Um artigo apresentou o uso de um material próximo (Resina 50A e 80A), que parecem ter características flexível, porém não podemos concluir que seja o mesmo composto da resina para tecnologias DLP, visto que a tecnologia utilizada foi a SLA.

Vale ressaltar que a presente pesquisa pretende trabalhar com uma característica não encontrada na revisão da literatura, que seria a utilização de tecnologia DLP combinado com uma resina flexível, produzindo peças com capacidade de resistir a compressão. Utilizando a revisão da literatura como um norte para esta pesquisa, tem como objetivo avaliar outros experimentos similares a este estudo e poder trazer mais informações sobre estruturas TPMS.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental estabelecido de acordo com o fluxograma da FIGURA 14.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO



FONTE: O autor (2023)

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para o presente estudo foram utilizados os seguintes equipamentos.

- i. Impressora 3D *Anycubic Photon Mono*
- ii. Resina flexível 3D Lab
- iii. Balança de precisão
- iv. Paquímetro
- v. Máquina ensaio de compressão Emic DL10000
- vi. Softwares *nTopology*, *Minitab*, *Excel* e *Chitubox*

Para o estudo foi utilizado uma impressora 3D de tecnologia LCD da marca *Anycubic* modelo *Photon Mono*, sediada no projeto Engenhar-MEC da UFPR, com as seguintes características técnicas apresentadas no QUADRO 5.

QUADRO 5 – Características técnicas da impressora

LCD	2,8 polegadas 2560*1620 (2K)
Tecnologia	LCD - baseado em SLA
Fonte de Luz	405nm (UV)
Precisão XY	0.051mm
Precisão Z	0,01mm
Material	Resina fotossensível UV 405nm

FONTE: Adaptado de *Anycubic* (2024)

A resina utilizada foi de marca 3DLAB, produzida e vendida no Brasil, produto com nome de Resina Flexível apresentando as seguintes características técnicas apresentadas no QUADRO 6 a seguir. Sua composição química não é fornecida devido a segredo industrial da empresa.

QUADRO 6 - Características técnicas da resina

Aparência	Líquido levemente amarelado
Odor	Suave
Viscosidade (25°C)	190 - 350cP
Densidade	1,1 g/cm ³
Resistência a ruptura	4 - 10 Mpa
Módulo de Elasticidade	8 Mpa
Alongamento	120 - 130 %
Resistência a rasgo	80 N/mm
Dureza Shore D	40

FONTE: Adaptado de 3DLAB (2024)

Para a medição da massa dos corpos de prova, foi utilizada uma balança de marca Ohaus modelo DV215CD classe I com precisão de 0,001 g. Para análise dimensional foi utilizado um paquímetro digital para as medições da marca MTX 150mm.

A máquina de ensaio de compressão utilizada foi uma Emic DL10000 equipada com célula de carga modelo CC150 500 N/50 kgf, presente no Laboratório de Ensaio mecânicos da UTFPR – Curitiba.

O *software* utilizado para a modelagem 3D da peça foi o *nTopology* devido a possibilidade de trabalhar exclusivamente a geometria interna em manufatura aditiva. Para fazer o planejamento de processo de impressão, o *software* utilizado foi o Chitobox basic v1.9.5. Por fim para a análise de dados estatísticos e gráficos, foram utilizados o MiniTab e Excel.

3.2 MÉTODO – DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento foi dividido em quatro etapas:

1. Modelagem do corpo de prova, geometrias, normas e método de Taguchi.
2. Caracterização da peça com base nos parâmetros do processo de impressão 3D.
3. Caracterização de propriedades mecânicas da peça utilizando ensaio de compressão.
4. Análise dos dados e discussão final.

3.2.1 Modelagem do corpo de prova e método de Taguchi

Nesta etapa é descrito como foram modelados os corpos de prova de acordo com as normas fornecidas pelos ensaios mecânicos, como também, a definição do método de Taguchi.

3.2.1.1 Modelagem dos corpos de prova

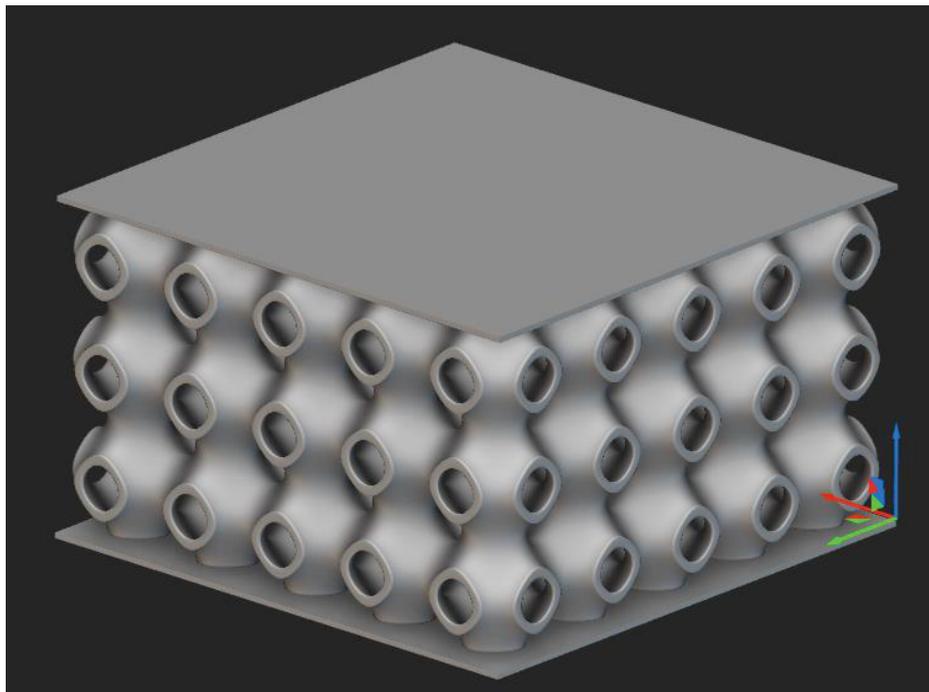
A definição da geometria se baseou nos estudos encontrados na etapa de RSL, grande parte se utilizou do giroide, diamante e Schwarz P. Todas as geometrias são de padrão TPMS, já explicado anteriormente sobre sua aplicação. Os corpos de prova foram manufaturados com base no modelo descrito nas normas ASTM D3574 para os ensaios de compressão.

A norma ASTM D3574 define o corpo de prova padrão com dimensões de 50x50x25 mm onde a altura não pode ser superior a 75 % da menor dimensão, porém é mencionado que corpos de prova maiores são preferíveis, quando possível.

Neste caso optou-se por utilizar um corpo de prova com 50 x 50 x 30 mm, definido essa altura baseada nas dimensões de célula unitária e espessura de parede que melhor se ajustaria no volume da peça. Ou seja, uma dimensão que não fosse grande a ponto de se utilizar muita resina para a confecção, mas que também atendesse as variações de dimensões dos parâmetros propostos. Outro ponto mencionado na norma era sobre a obrigatoriedade de apresentar superfícies superior e inferior paralelas, nesse caso optou-se por criar tal superfície com dimensões 50 x 50 x 3 mm.

Na FIGURA 15 é apresentado um corpo de prova que foi modelado utilizando o *software nTopology*.

FIGURA 15 - CORPO DE PROVA SCHWARZ P ASTM D3574



FONTE: O autor (2023)

Os corpos de prova foram modelados seguindo os fatores e níveis mencionados no próximo tópico, apresentados no QUADRO 7.

3.2.1.2 Método de Taguchi

Definido as dimensões e características dos corpos de prova por meio da RSL e normas, foi aplicado o *design* de experimentos Taguchi afim de proporcionar um experimento com validade estatística.

Primeiramente foram definidos os fatores a serem trabalhados, foi levado em consideração os estudos encontrados na etapa de RSL e as opções de modelagem fornecidas pelo *software nTopology* e para cada fator, separamos três níveis, sendo esses descritos no QUADRO 7 a seguir:

QUADRO 7 – Fatores e níveis

Fatores	Níveis
Geometria	Giroide
	Schwartz P
	Diamante
Tamanho de célula	12,5 x 12,5 x 12,5 mm
	10 x 10 x 10 mm
	8 x 8 x 8 mm
Espessura de parede	1,05 mm
	0,9 mm
	0.75 mm

FONTE: O autor (2023)

Definido os fatores e níveis, prosseguiu-se para a construção da matriz ortogonal de Taguchi. Para o presente estudo, dentro do *software Minitab*. O número de experimentos ficou limitado a 9 ou 27, devido a construção da matriz. Primeiramente optou-se por L27, utilizando 9 corpos de prova com 3 réplicas cada. Dado que a norma ASTM 3574 requer ensaios com pelo menos 3 réplicas. O QUADRO 8 apresenta a matriz ortogonal gerada.

QUADRO 8 – Matriz ortogonal L27

Célula Unitária (mm)	Espessura de parede (mm)	Geometria
8	0,75	Giroide
8	0,75	Giroide
8	0,75	Giroide
8	0,90	Schwarz P
8	0,90	Schwarz P
8	0,90	Schwarz P
8	1,05	Diamante
8	1,05	Diamante
8	1,05	Diamante
10	0,75	Schwarz P
10	0,75	Schwarz P
10	0,75	Schwarz P
10	0,90	Diamante
10	0,90	Diamante
10	0,90	Diamante
10	1,05	Giroide
10	1,05	Giroide
10	1,05	Giroide
12,50	0,75	Diamante
12,50	0,75	Diamante
12,50	0,75	Diamante
12,50	0,90	Giroide
12,50	0,90	Giroide
12,50	0,90	Giroide
12,50	1,05	Schwarz P
12,50	1,05	Schwarz P
12,50	1,05	Schwarz P

FONTE: O autor (2023)

3.2.2 Caracterização dos parâmetros de impressão 3D e impressão das peças

Apesar de não ser objetivo do estudo, devido a limitação de apenas 3 fatores devido ao tamanho do experimento necessário, foi analisado qual seria a influência da orientação de impressão. Em relação a impressão dos corpos de prova, a única influência no processo seria a variação no posicionamento na mesa, caso fossem posicionadas perpendicularmente teria a possibilidade de incluir um número maior de peças a serem impressas simultaneamente. Resultando em uma redução do tempo

total de impressão de todos os corpos de prova, já que poderiam ser impressos cerca de três corpos de prova por vez.

Outro ponto relevante da pesquisa foi a orientação das camadas em relação ao ensaio de compressão. Estudos feitos nessa área discutidos na revisão da literatura, concluíram que a variação da orientação de impressão pode afetar a propagação de trincas, fissuras e deslizamento entre camadas, tornando assim um aspecto mais frágil ao objeto de estudo. Sendo assim, foi definido a orientação de impressão como sendo paralelamente ao plano relativo ao ensaio de compressão, evitando assim alguns efeitos indesejáveis inerentes da orientação de impressão.

Antes de iniciar a impressão dos corpos de prova, foram feitos alguns testes de calibração para averiguar o melhor valor para o parâmetro de exposição para esta resina. Foi utilizado um arquivo padrão disponível no *link* a seguir (<https://www.printables.com/model/229429-photonsters-validation-matrix-v2>), chamado de *Resin XP2 Validation* onde apresenta acabamento que varia de acordo com os valores de exposição, apresentado na FIGURA 16.

FIGURA 16 - MODELO PARA CALIBRAÇÃO DE EXPOSIÇÃO



FONTE: O autor (2023)

Após cerca de quatro iterações, foi definido um valor de 3 segundos para o tempo de exposição, onde se obteve o melhor acabamento superficial. Apresentando a melhor qualidade da peça necessária para o estudo, como também se encontrava entre os valores sugeridos pelo fabricante da resina (entre 1,5 e 4 segundos).

De acordo com o *software Chitubox*, o processo de impressão total levaria cerca de 3 h, para impressão simultânea de duas peças, o tempo real foi menor, variando entre 2 h e 45 minutos e 2 h e 55 minutos.

Em seguida ocorreu a limpeza feita por imersão em álcool isopropílico por cerca de 5 minutos e cura em câmara UV por cerca de 20 minutos, ao final todas as peças foram deixadas expostas em uma mesa para finalizar a evaporação de todo álcool antes de serem guardadas. Todos esses valores de limpeza e cura foram seguidos com base no *datasheet* fornecido juntamente com a resina, valores indicados pelo fabricante. Assim que toda a peça estivesse seca a legenda foi escrita com caneta permanente na parte superior.

Após modelado as nove combinações de corpos de prova foi exportado o arquivo .STL para a próxima etapa de planejamento do processo de impressão. Já dentro do *software Chitubox* foram definidas algumas etapas do planejamento, entre elas: parâmetros do processo e utilização de suportes. Alguns parâmetros importantes foram seguidos, fornecidos pelo fabricante da resina 3D Lab, como: número de camadas base; tempo de exposição da camada base e das demais camadas. Outros parâmetros foram testados a fim de se obter uma melhor combinação para tal resina, foram necessários alguns testes com uma impressão de calibração antes da definição dos parâmetros. A FIGURA 17 demonstra os valores finais, retirados do *Chitubox*, encontrados para todos os parâmetros de configuração, como também valores padrões que não foram ajustados.

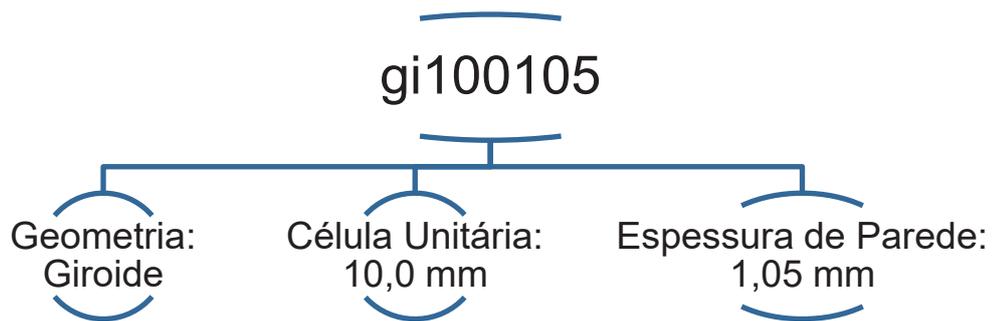
FIGURA 17 – CONFIGURAÇÃO DE IMPRESSÃO CHITUBOX

Altura camada:	<input type="text" value="0,050"/>	mm	Dist elevação inferior:	<input type="text" value="7,000"/>	mm
Camadas de base:	<input type="text" value="6"/>		Distância elevação:	<input type="text" value="7,000"/>	mm
Tempo exposição:	<input type="text" value="3,000"/>	s	Distância de retração inferior:	<input type="text" value="7,000"/>	mm
Tempo exposição base:	<input type="text" value="30,000"/>	s	Distância de retração:	<input type="text" value="7,000"/>	mm
Retardo desligar UV:	<input type="text" value="0,500"/>	s	Vel. elevação inferior:	<input type="text" value="120,000"/>	mm/min
			Vel. elevação:	<input type="text" value="120,000"/>	mm/min
			Velocidade de retração inferior:	<input type="text" value="180,000"/>	mm/min
			Vel. retração:	<input type="text" value="180,000"/>	mm/min

FONTE: O autor (2023)

Terminado o planejamento, iniciou-se a impressão dos primeiros corpos de prova seguindo o planejamento proposto na QUADRO 8 Taguchi. Definiu-se uma nomenclatura padrão para cada corpo de prova seguindo a ordem de: geometria; tamanho de célula unitária e espessura de parede, de acordo com a FIGURA 18.

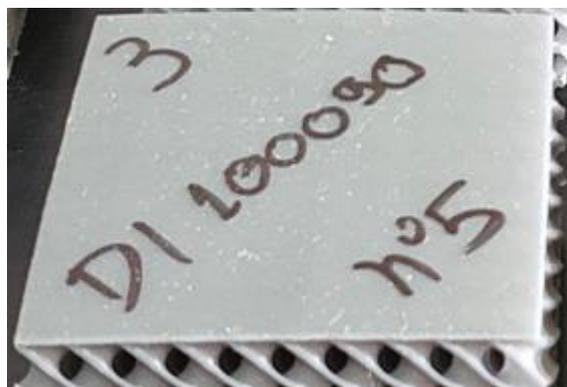
FIGURA 18 – LEGENDA CORPOS DE PROVA



FONTE: O autor (2023)

Para definição das réplicas, que seriam três ao total para cada corpo de prova, definiu-se a adição do número 1 a 4 diretamente no corpo de prova impresso na parte superior. O número 4 foi utilizado para réplicas que precisaram ser reimpressas devido algum erro durante o processo. E na parte inferior foi adicionado o número relativo ao corpo de prova, de 1 até 9, referente as variações de combinações. A FIGURA 19 a seguir demonstra como ficaram as peças com a legenda.

FIGURA 19 - CORPO DE PROVA COM LEGENDA



FONTE: O autor (2023)

Utilizando o exemplo acima, a legenda representa o corpo de prova número 5 com geometria diamante, tamanho de célula 10 mm e espessura de parede 0,9mm, e esse seria a réplica de número 3.

3.2.3 Caracterização do ensaio de compressão

Devido à natureza do material (resina flexível) e as variações de geometria, tamanho de célula e espessura de parede, dificultaram a decisão da escolha de uma norma correta para o estudo. Devido as variações de parâmetros de geometria, tamanho de célula e espessura de parede, o objeto adquire características de um material celular, muito parecido com uma espuma flexível de uretano. Sendo assim, decidiu-se por escolher a norma ASTM D3574, com aplicação em materiais celulares de espumas uretanas e utilizando especificamente o teste C onde é descrito o ensaio de compressão.

Ainda assim o trabalho encontrou limitações, apesar de atender a norma, uma parte do teste não pode ser verificada devido o polímero ser mais denso que uma espuma uretana, assim não foi aplicado uma compressão de 140 Pa e ter alguma deformação no corpo de prova. Outro ponto que não foi atendido foi a pré-flexão do corpo de prova até 75 % da sua espessura original, por ser um polímero com características não conhecidas previamente, foi decidido não fazer a pré - flexão para não correr o risco de ter algum rompimento interno da estrutura e isso afetar o decorrer do experimento. Também foi modificado a velocidade de compressão para cerca de 2,5 mm/min, devido ao sistema de ensaio não comportar altas velocidades.

Todas essas variações na norma se deram pelo pouco conhecimento do comportamento do material quando variados tais parâmetros nos corpos de prova e a falta de uma norma específica para tal avaliação.

A célula de carga utilizada no ensaio foi de 500 N, escolhida devido as características apresentadas pelos corpos de prova como uma certa baixa resistência quando comprimidos com as mãos. O ensaio teve dois critérios de parada pré-definidos, sendo eles: valor seguro máximo da célula de carga e deformação máxima do corpo de prova. Sendo assim o valor máximo, em newtons, foi definido em 450 N e a compressão máxima em 20 mm, tais valores foram definidos por precaução, para evitar qualquer dano ao aparelho.

A temperatura ambiente no local estava controlada por ar-condicionado com termostato configurado a 23 °C, o ensaio teve início no período da manhã e finalizando no mesmo dia no período da tarde. A máquina de ensaio permaneceu ligada e estável durante todo o ensaio e um celular foi utilizado para gravação do ensaio de uma réplica de cada corpo de prova.

O ensaio seguiu ordem por corpo de prova, ou seja, foram feitos os ensaios das três réplicas em seguida, posteriormente movendo em ordem crescente seguindo a TABELA 1 baseada no modelo de Taguchi.

TABELA 1 – ORDEM DE ENSAIO

Ordem	Corpo de Prova
1	gi080075
2	sp080090
3	di080105
4	sp100075
5	di100090
6	gi100105
7	di125075
8	gi125090
9	sp125105

FONTE: O autor (2024)

Todos os resultados foram armazenados pelo *software* que conduziu o experimento e posteriormente exportado os gráficos e valores gerados.

3.2.4 Análise de dados

Toda a parte de análise de dados foi feita utilizando *software Microsoft Excel* e *Minitab*. O *software Microsoft Excel* foi utilizado para organização dos dados, criação de tabelas e gráficos, análise de ambos os dados vindos do ensaio de compressão e das medições de peso e dimensional feitas nos corpos de prova.

Já o *Minitab* foi utilizado para a parte estatística, desde a geração do experimento utilizando *design* de experimentos Taguchi, até a tabela ANOVA e gráficos estatísticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo está organizado em etapas de discussão dos resultados iniciando com impressão e análise, seguido por ensaio de compressão e finalizando com análise estatística.

4.1 ASPECTOS DAS IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os primeiros corpos de prova impressos apresentaram anomalias durante o processo de impressão como falha na impressão, orifícios e peças inacabadas. A FIGURA 20 mostra três corpos de prova que apresentaram problemas no processo.

FIGURA 20 - CORPOS DE PROVA COM PROBLEMAS DE IMPRESSÃO



FONTE: O autor (2023)

Após verificação dos possíveis problemas, foi constatado que a película transparente da cuba possuía um desgaste, o que estaria afetando a cura da resina. Foi feita a troca da película e corrigido o problema.

Todos os corpos de prova foram impressos e passaram por uma análise de qualidade de impressão, apresentados na FIGURA 21.

FIGURA 21 - CORPOS DE PROVA



FONTE: O autor (2023)

Do total de 27 corpos de prova, apenas três apresentaram problemas e precisaram ser reimpressos, discutido posteriormente. Apesar de durante a impressão, limpeza e cura apresentaram normalidade no processo, cerca de alguns minutos após a cura eles começaram a apresentar rompimentos na parte superior como apresentados na FIGURA 22.

FIGURA 22 - CORPO DE PROVA TOTALMENTE ROMPIDO



FONTE: O autor (2023)

Tal problema torna-se de complexa análise devido as diversas variáveis envolvidas no processo. Torna-se custoso analisar todas as variáveis separadamente para averiguar o real problema, e assim divergindo do foco do estudo. Nesse caso a ação tomada foi a reimpressão dos corpos de prova que apresentaram rompimento.

Vale ressaltar que foi considerado inutilizável apenas corpos de prova que tiveram toda a estrutura superior ou inferior afetada. Alguns apresentaram rachaduras na parte superior ou inferior, mas que não afetaram a estrutura interna, objeto principal de estudo do presente trabalho. A FIGURA 23 apresenta os corpos de prova que tiveram rachaduras na superfície.

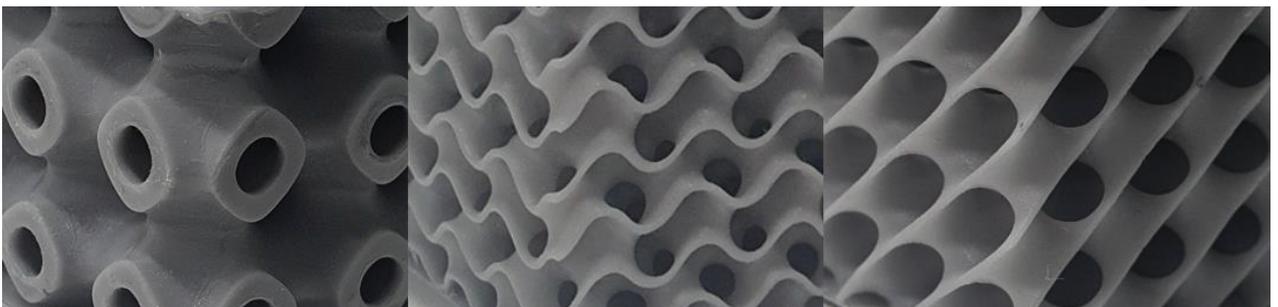
FIGURA 23 - CORPOS DE PROVA COM RACHADURAS SUPERFICIAIS



FONTE: O autor (2023)

Após as reimpressões necessários, foi feita uma inspeção visual, todos apresentaram excelente acabamento das estruturas internas como apresentado na FIGURA 24.

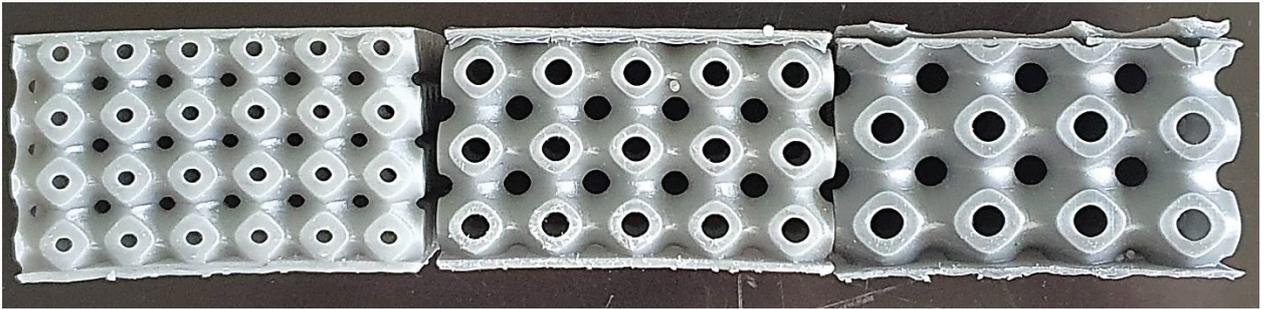
FIGURA 24 - DETALHE DE ACABAMENTO DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O autor (2023)

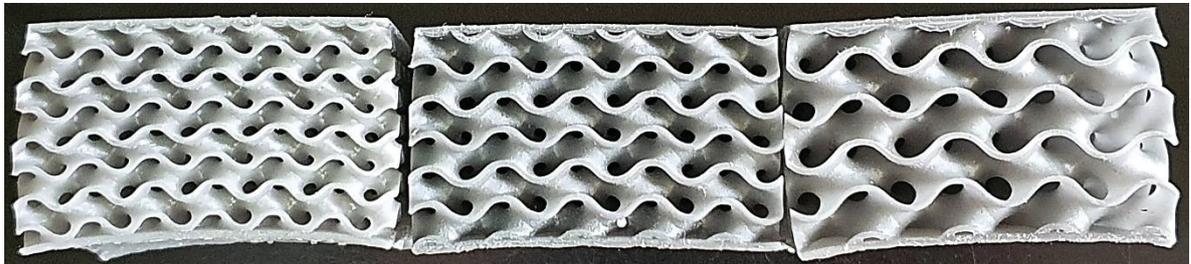
Cada grupo de corpos de prova de mesmas geometrias foi analisado para verificar visualmente a variação dos parâmetros de célula unitária e espessura de parede, assim confirmar a integridade de todos. Demonstrados nas FIGURA 25, FIGURA 26 e FIGURA 27.

FIGURA 25 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA SCHWARZ P



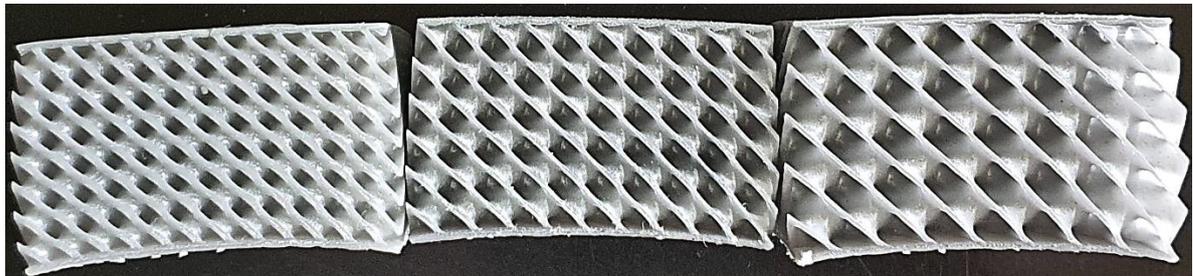
FONTE: O autor (2023)

FIGURA 26 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA GIROIDE



FONTE: O autor (2023)

FIGURA 27 - VARIAÇÕES NA GEOMETRIA DIAMANTE



FONTE: O autor (2023)

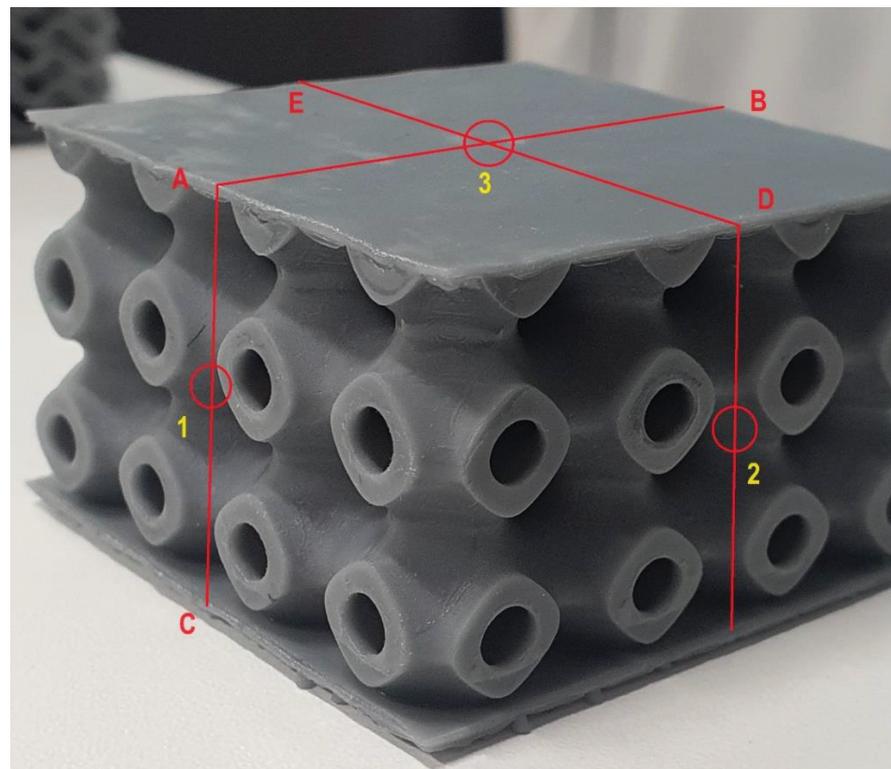
Após uma análise dos grupos apresentados, pode-se observar a diferença aparente nas dimensões. Corpos de prova de geometria Schwarz P apresentaram um formato retangular mais próximo do modelo 3D CAD aparentando ter uma menor variação dimensional. Já a geometria diamante aparentou uma maior variação no dimensional quando comparado ao modelo 3D CAD. Observado tais variações, foi feita uma análise dimensional de todos os corpos de prova.

4.1.1 Análise dimensional

Após a análise visual de cada corpo de prova, validação e reimpressão, foi feita a medida de cada um deles a fim de entender melhor qual seria o comportamento da resina em relação a precisão dimensional das peças. Apenas com a visualização de cada uma, pode se perceber que houve uma variação na dimensão, neste caso, expansão da área central da peça, conforme visto anteriormente na FIGURA 27.

Para a medição dos corpos de prova, feita por meio de um paquímetro digital, optou-se por encontrar os pontos mais centrais de cada dimensão já que apresentaram certa deformação não uniforme, como apresentado na FIGURA 28. Para a altura foi utilizado a reta AC com a ponta do paquímetro em 3, para o comprimento utilizou-se a reta DE com ponta em 2 e para profundidade a reta AB e ponta em 1.

FIGURA 28 - PONTO CENTRAIS DE MEDIÇÃO



FONTE: O autor (2023)

A TABELA 2 apresenta os valores (em percentual) das variações de cada corpo de prova. Foram feitas as medições das três réplicas de cada corpo de prova e utilizado a média delas para o cálculo da variação.

TABELA 2 - VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Corpo de Prova	Varição Lateral	Varição Altura
di080105	6 %	5 %
di100090	6 %	2 %
di125075	5 %	3 %
gi080075	6 %	3 %
gi100105	5 %	2 %
gi125090	4 %	1 %
sp080090	4 %	7 %
sp100075	3 %	2 %
sp125105	2 %	3 %

FONTE: O autor (2023)

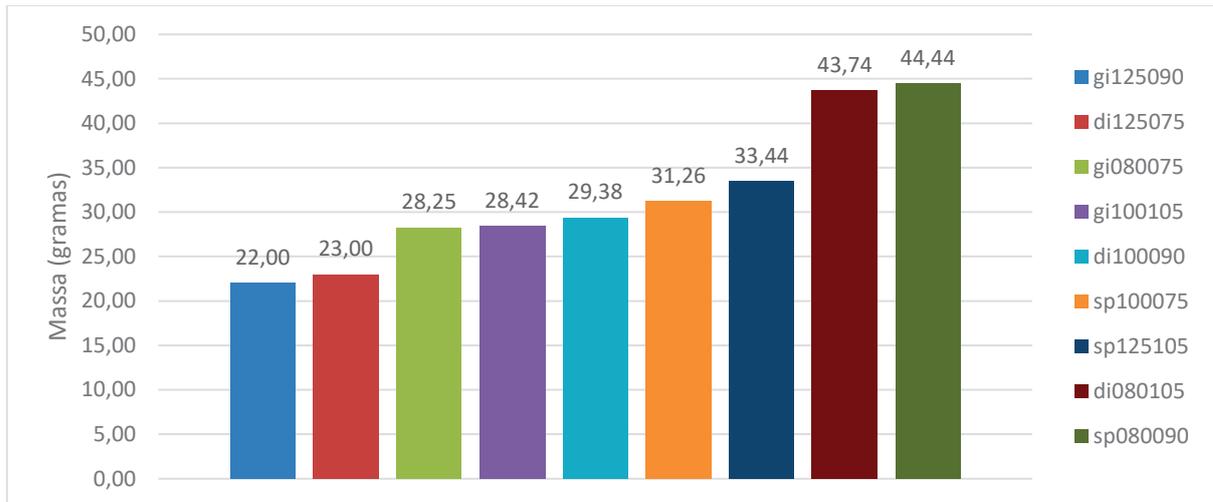
Analisando os valores finais, pode-se observar que realmente corpos de provas com geometria diamante foram os que apresentaram uma maior média na variação dimensional lateral com 5,6 %, seguido por giroide com 5 % e por último Schwarz P com 3 %. Já a variação na altura, geometria Schwarz P apresentou uma maior variação média com 4 %, seguido por diamante com 3,3 % e giroide com 2 %. Desta forma, tais valores devem ser considerados em projetos onde a precisão seja requisito de produto.

Não se sabe ao certo o motivo de tal variação e o porquê ser todas positivas. É conhecido que resinas fotossensíveis possuem certa variação pós cura, o próprio fabricante da resina utilizada, 3D Lab, menciona no *datasheet* que ela apresenta certa variação, porém não cita valores.

4.1.2 Análise da massa dos corpos de prova

A massa dos 27 corpos de prova foi aferida utilizando uma balança de precisão e em seguida feito a média, devido a cada um apresentar 3 réplicas. A FIGURA 29 apresenta as massas obtidas em cada variação.

FIGURA 29 - MÉDIA DAS MASSAS



FONTE: O autor (2023)

Analisando os dados de massa apresentados na FIGURA 29, é possível observar a variação na massa total de cada corpo de prova, sendo o sp080090 cerca de duas vezes mais pesado que gj125090. Observou-se que corpos de prova com geometria Schwarz P tendem a possuir mais massa que diamante, que por sua vez são mais pesados que giroide. Já a geometria diamante foi a que possuiu maior variação de massa entre as combinações, com um delta de 20,74 g, seguido por Schwarz P com 13,18 g e giroide com 7,38 g.

Devido à grande variação de massa em cada corpo de prova, foi sugerido a utilização de um fator que normalizaria os dados em relação as tensões, portanto, utilizando a massa e dimensões dos modelos 3D CAD, foi possível calcular a massa específica, utilizada para calcular o índice de tensão específica para o estudo. Onde leva em consideração a quantidade de material presente em cada corpo de prova em relação a tensão sofrida durante o ensaio. A TABELA 3 apresenta as densidades calculadas em kg/m^3 .

TABELA 3 - MÉDIA DAS DENSIDADES

Corpos de prova	Densidade (kg/m ³)
gi125090	293,28
di125075	306,68
gi080075	376,72
gi100105	378,89
di100090	391,68
sp100075	416,76
sp125105	445,86
di080105	583,19
sp080090	592,55

FONTE: O autor (2023)

4.1.3 Variação da temperatura ambiente

Durante o processo de impressão, que durou cerca de 1,5 mês, a temperatura ambiente teve grande variação entre as impressões. É uma variável importante no processo, visto que resinas poliméricas tem uma faixa de uso ideal, neste caso o fabricante apresenta no *datasheet* que os dados fornecidos foram testados em temperatura ambiente de 25 °C. Nesse período houve uma variação na temperatura ambiente de cerca de 10 °C, ficando entre 20 °C e 30 °C. Corpos de provas eram impressos durante o dia todo, entre 8:15 até 17:10, podendo ter ainda variação de temperatura durante todo o dia.

Vale ressaltar que todo o processo de impressão foi feito em um ambiente fechado, utilizando apenas uma impressora 3D que permaneceu o tempo inteiro no mesmo local. Porém tal ambiente interno apresentou uma sensação térmica relativamente mais alta que externamente, podendo assim ter chegado a temperaturas internas levemente mais altas que as ambientes externas coletadas. Não foi possível a medição da temperatura interna do ambiente devido à falta de termômetro.

Tal variação térmica será levada em conta nas discussões, devido sua possível influência nos resultados, porém não será analisada juntamente com os resultados.

4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

No presente capítulo é discutido os procedimentos, resultados obtidos durante o ensaio de compressão realizado e uma breve discussão ao final.

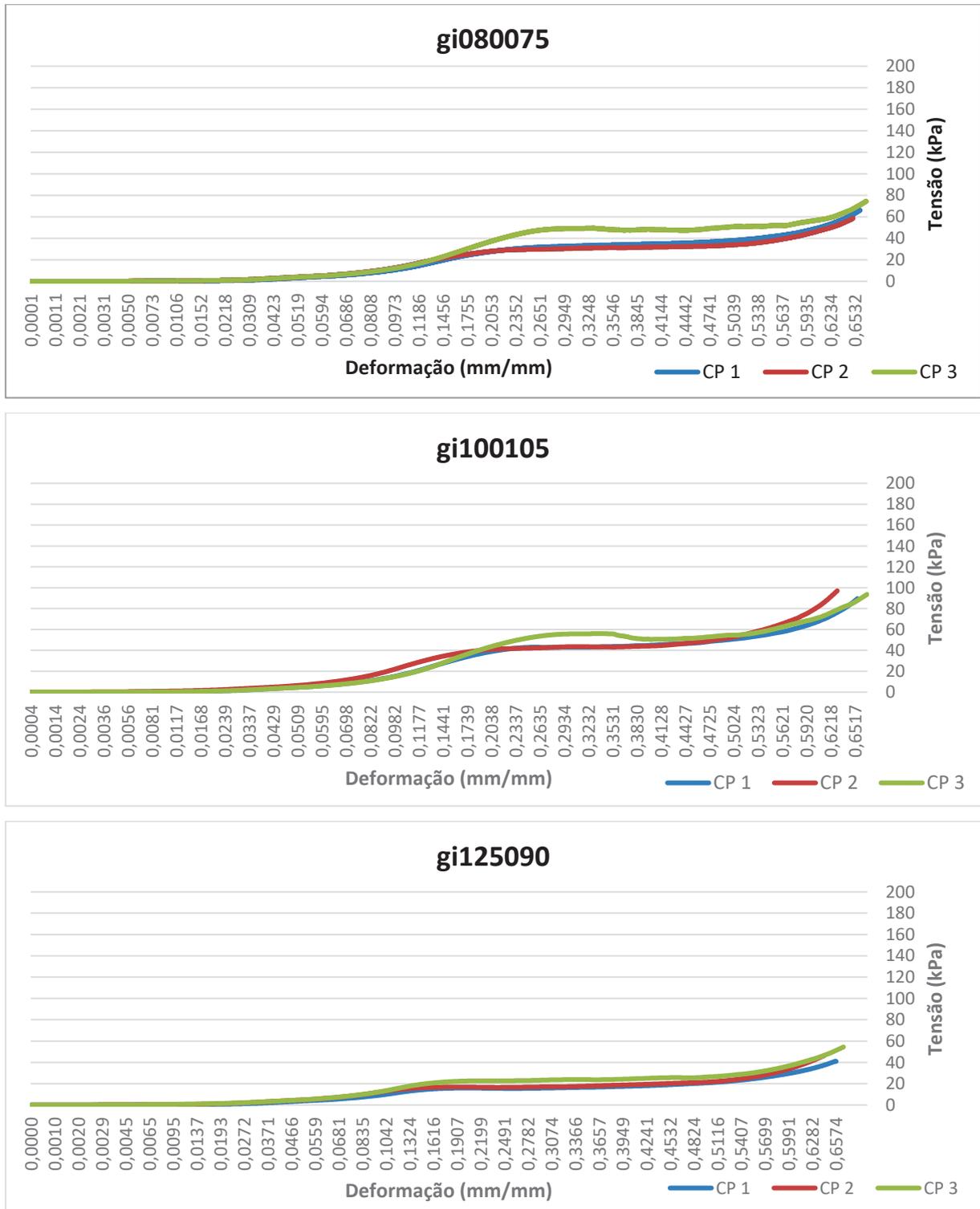
4.2.1 Resultados ensaio de compressão

Foi gerado pelo sistema do ensaio os dados e curvas relacionados a cada um dos corpos de prova (chamados de CP 1, CP 2, CP 3). Devido à falta de normas para reger um ensaio em que estruturas TPMS com material flexível são utilizadas, o estudo utilizou como um comparativo curvas de compressão relativas a espumas poliméricas de células abertas, cujo a funcionalidade e aplicação se assemelham.

Curvas de ensaios de compressão para espumas poliméricas normalmente apresentam: inclinação (região elástica); região de escoamento; platô (região plástica); inclinação final (região de densificação) e por final a região de descarregamento (HWANG *et al.*, 2020).

A FIGURA 30 apresenta as curvas referentes aos corpos de prova de geometria giroide.

FIGURA 30 - CURVA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO GIROIDE



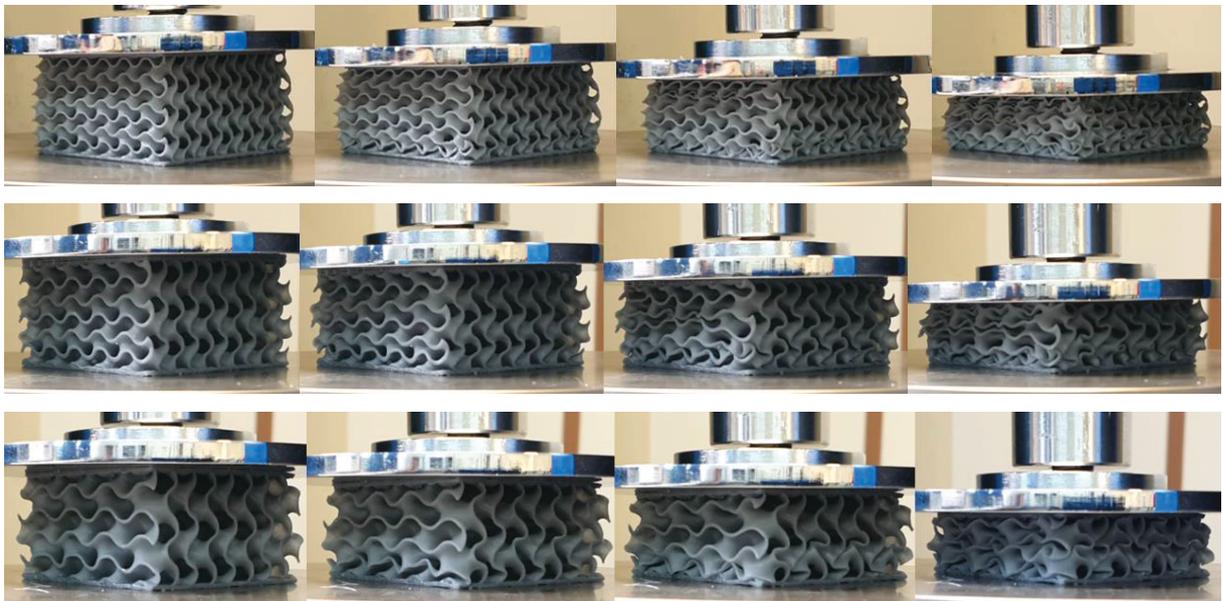
FONTE: O autor (2024)

Pode-se observar um comportamento parecido entre as curvas de todas as estruturas, com uma inclinação inicial após cerca de 0,10 mm/mm, seguido de um platô entre 0,16 até 0,50 mm/mm, finalizando com uma inclinação até o critério de

parada. Todas as curvas apresentaram limites de tensão máximo a 0,66 mm/mm de deformação (20mm de deformação, devido ao critério de parada da máquina) entre 40 a 100 kPa. Vale ressaltar que após a parada do sistema no critério de 20mm de compressão, todos os corpos de prova retornaram ao tamanho inicial e não possuíram nenhuma fissura ou falha aparente na estrutura.

Juntamente foi feito um vídeo de um corpo de prova (CP1) de cada estrutura e posteriormente selecionado fotos das deformações: 10, 20, 30 e 50% apresentados na FIGURA 31.

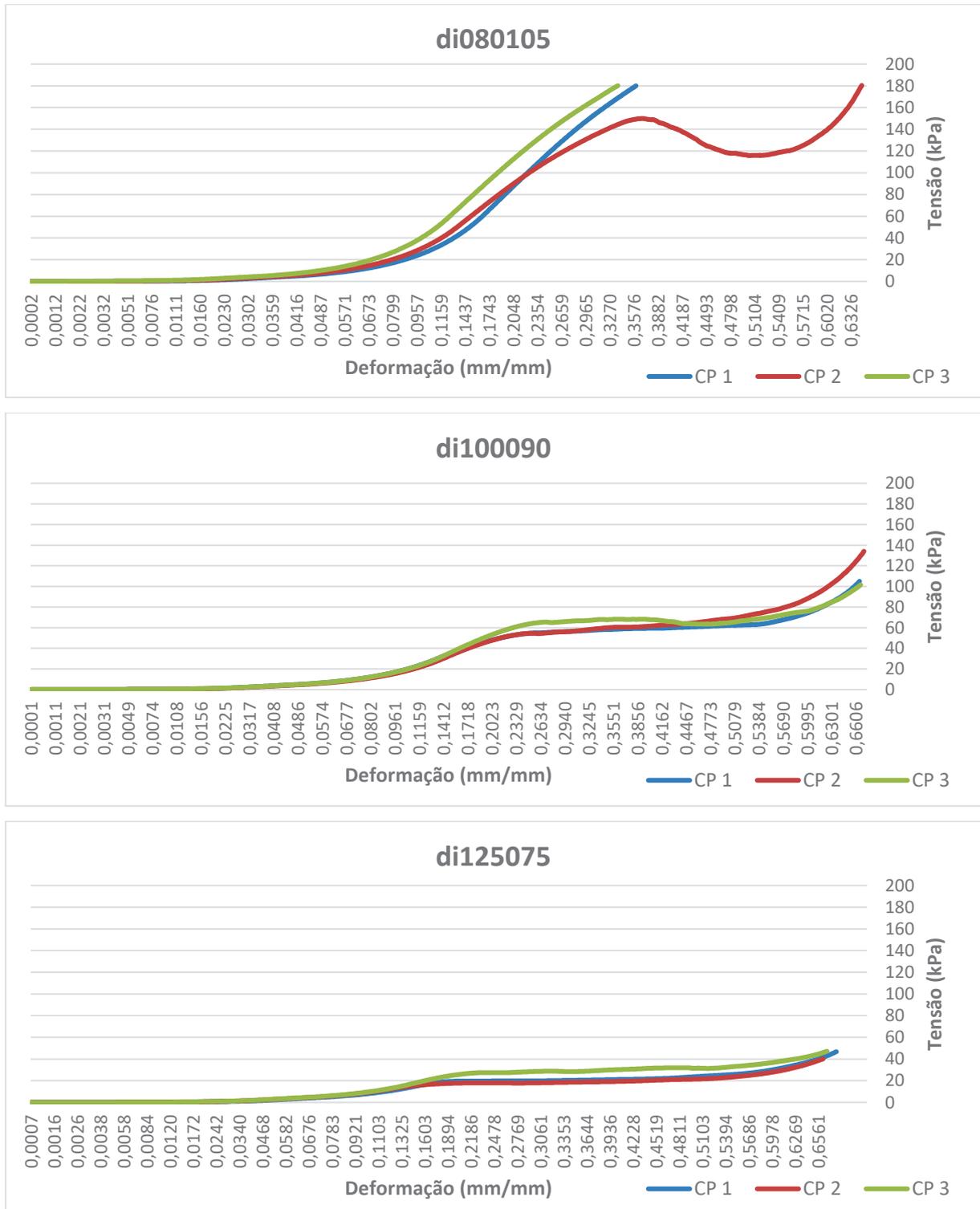
FIGURA 31 – DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS GI080075, GI100105 E GI125090 RESPECTIVAMENTE.



FONTE: O autor (2023)

A FIGURA 32 apresenta as curvas referentes aos corpos de prova de geometria diamante.

FIGURA 32 - CURVA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO DIAMANTE



FONTE: O autor (2024)

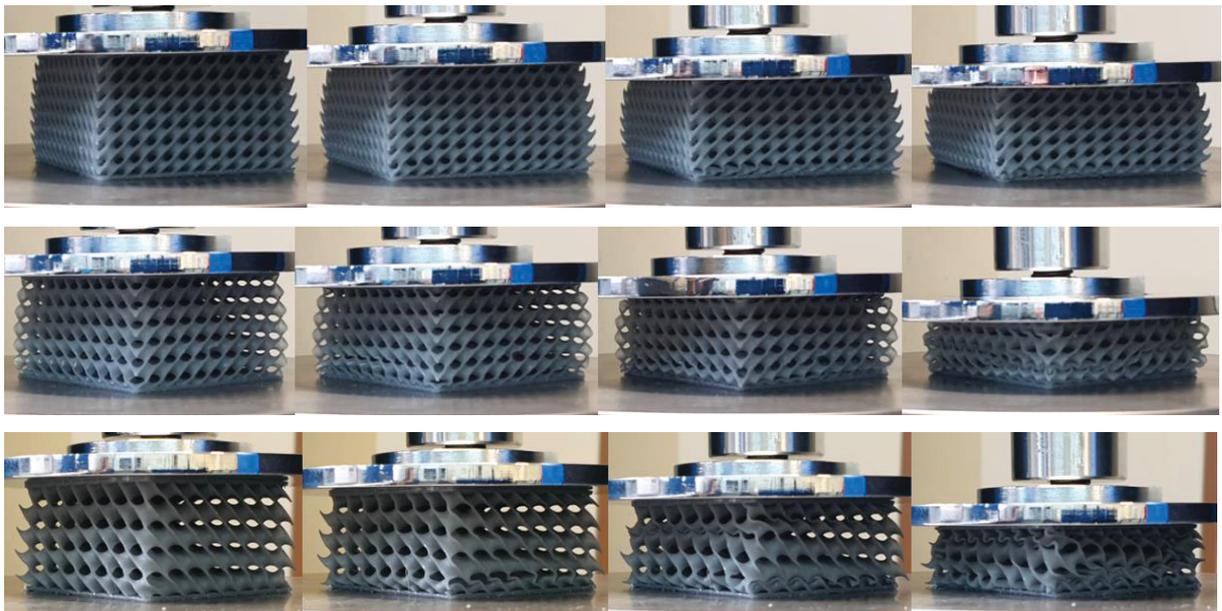
Pode-se observar um comportamento parecido em relação as curvas de di100090 e di125075, porém valores de tensão máximos bem distintos, entre 120 e 50 kPa, respectivamente. Apresentaram características como inclinação da curva por

volta de 0,10 mm/mm, platô entre 0,20 mm/mm até 0,54 mm/mm e novamente inclinação a partir de 0,54 mm/mm até a parada o ensaio.

Já a estrutura di080105 apresentou tensões máximas (cerca de 0,33 mm/mm de deformação) muito altas em comparação com as outras, inclusive interrompendo o ensaio devido ao limite da célula de carga. Apresentaram inclinação abrupta 0,07 mm/mm até 0,33 mm/mm onde ocorreu a parada do ensaio. Porém o segundo corpo de prova (CP 2) apresentou uma queda abrupta logo após atingir cerca de 150 kPa de tensão ou 36 % de deformação, em seguida eleva-se rapidamente até o limite da célula de carga, de 180 kPa.

Foi feito um vídeo de um corpo de prova (CP1) de cada estrutura e posteriormente selecionado fotos das deformações: 10, 20, 30 e 50% apresentados na FIGURA 33.

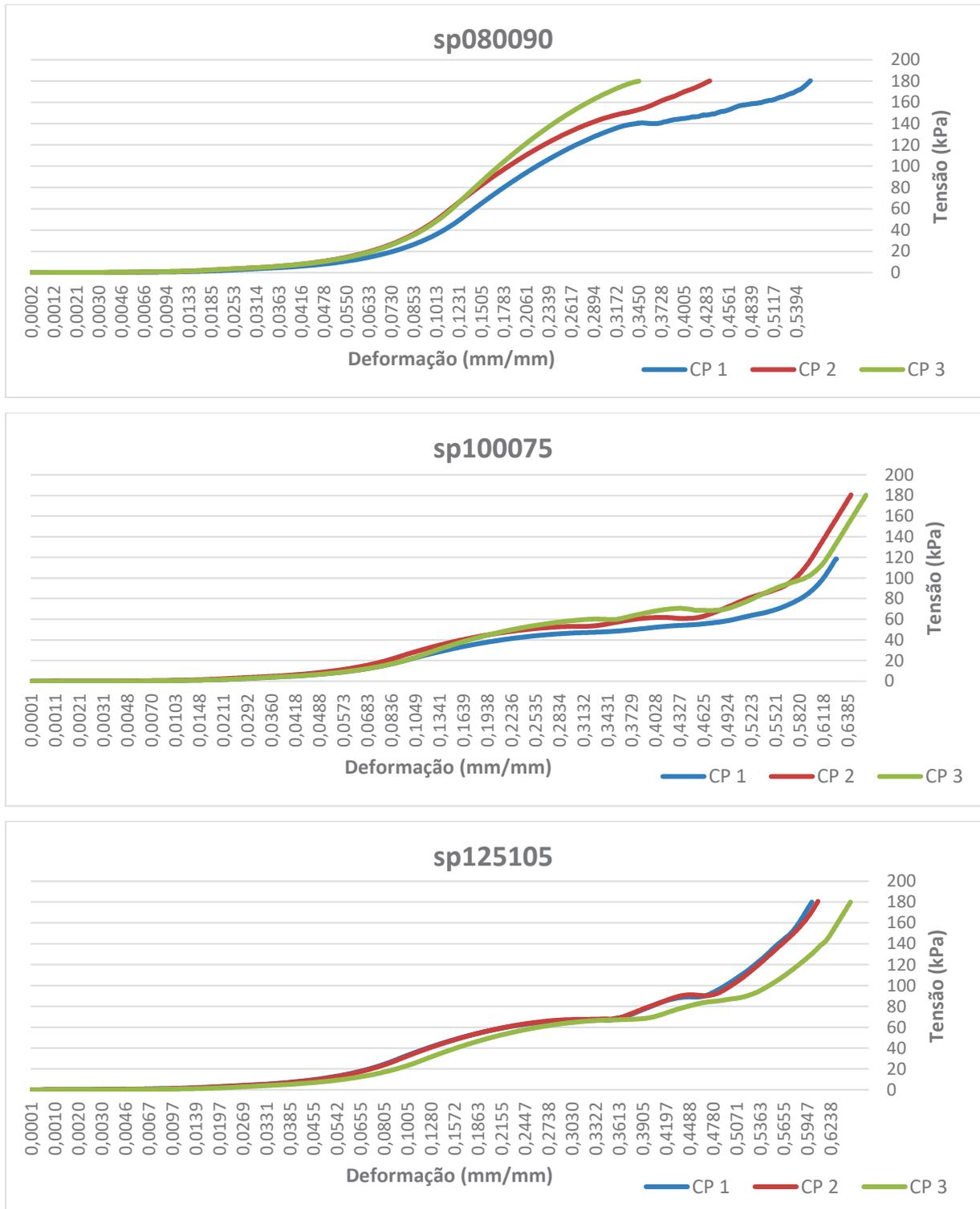
FIGURA 33 - DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS DI080105, DI100090 E DI125075 RESPECTIVAMENTE.



FONTE: O autor (2023)

A FIGURA 34 apresenta as curvas referentes aos corpos de prova de geometria Schwarz P.

FIGURA 34 - CURVA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO SCHWARZ P



FONTE: O autor (2024)

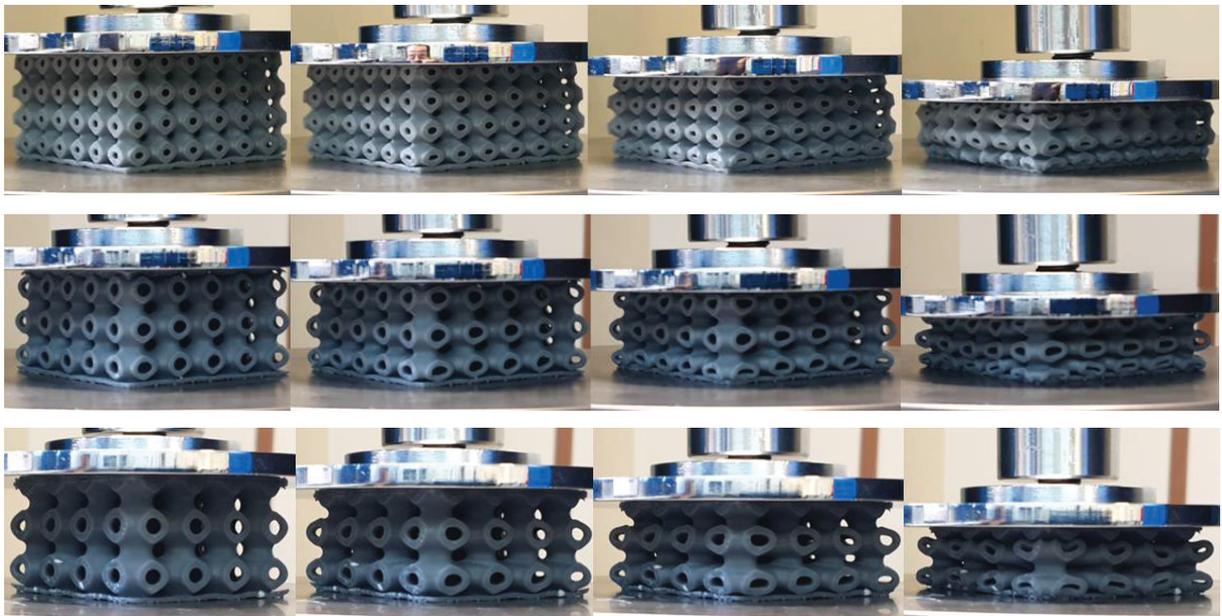
Os gráficos sp100075 e sp125105 aparenta uma semelhança entre as estruturas, atingindo o limite máximo de 180 kPa por volta de 0,61 mm/mm de deformação, que é o limite da célula de carga. A única diferença levemente perceptível

é a inclinação da reta próximo a 0,3 de deformação, onde sp125105 está acima de 50 kPa e sp100075 fica em torno de 50 kPa.

Já a curva sp080090 possui uma inclinação a partir de 0,06 mm/mm de deformação permanecendo até o limite da célula de carga, em 180 kPa (0,34; 0,43; 0,55 mm/mm de deformação para CP3, CP2 e CP1, respectivamente).

Foi feito um vídeo de um corpo de prova (CP1) de cada estrutura e posteriormente selecionado fotos das deformações: 10, 20, 30 e 50% apresentados na FIGURA 35.

FIGURA 35 - DEFORMAÇÕES 10, 20, 30 E 50% DAS ESTRUTURAS SP080090, SP100075 E SP125105 RESPECTIVAMENTE.



FONTE: O autor (2023)

Feita a análise das curvas e vídeos de todas as estruturas, pode-se observar que a partir de cerca de 20 % de deformação as células unitárias começaram sua deformação, onde, de acordo com os gráficos tensão *versus* deformação próximo a 0,2 mm/mm de deformação (ou 20 %) é uma região aparentemente de escoamento para grande maioria das estruturas, até uma total densificação próximo de 50 % de deformação. Tal deformação aparenta ser elástica devido à falta de presença de trincas, rasgos e falhas aparentes, apenas um rearranjo da geometria de cada célula unitária.

Quando analisado apenas as curvas, verifica-se a presença de região elástica, platô (plástica) e região de densificação para quase todas as estruturas seguindo o padrão proposto por (HWANG *et al.*, 2020).

Porém devido a configuração das estruturas TPMS, pode-se observar que a partir de cerca de 20 a 30 % de deformação todas as estruturas apresentaram uma deformação de cada célula unitária, fazendo com que suas paredes se toquem. Tal deformação levantou o questionamento que o platô gerado não seja uma região plástica e sim um rearranjo do formato das células unitárias, porém de forma elástica.

Outro ponto observado foi que todos os corpos de prova tiveram a completa recuperação de dimensões após compressão e apenas sp080090 apresentou ruptura externa evidente. Deixando assim uma dúvida sobre a integridade interna de cada peça.

4.2.2 Cálculo do módulo de elasticidade

Com base nos gráficos e dados coletados do ensaio de compressão, foram calculados os módulos de elasticidade. De acordo com Rahimidehgolan e Altenhof (2023) a região elástica de polímeros rígidos celulares é em torno de 10 % de deformação de engenharia, quando não se tem um gráfico tensão *versus* deformação com escoamento evidente. Os valores obtidos estão apresentados na TABELA 4 a seguir.

TABELA 4 - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Estrutura	Módulo de Elasticidade (kPa)
sp080090	433
di080105	298
sp125105	256
sp100075	203
di100090	180
gi100105	163
gi080075	114
gi125090	113
di125075	93

FONTE: O autor (2024)

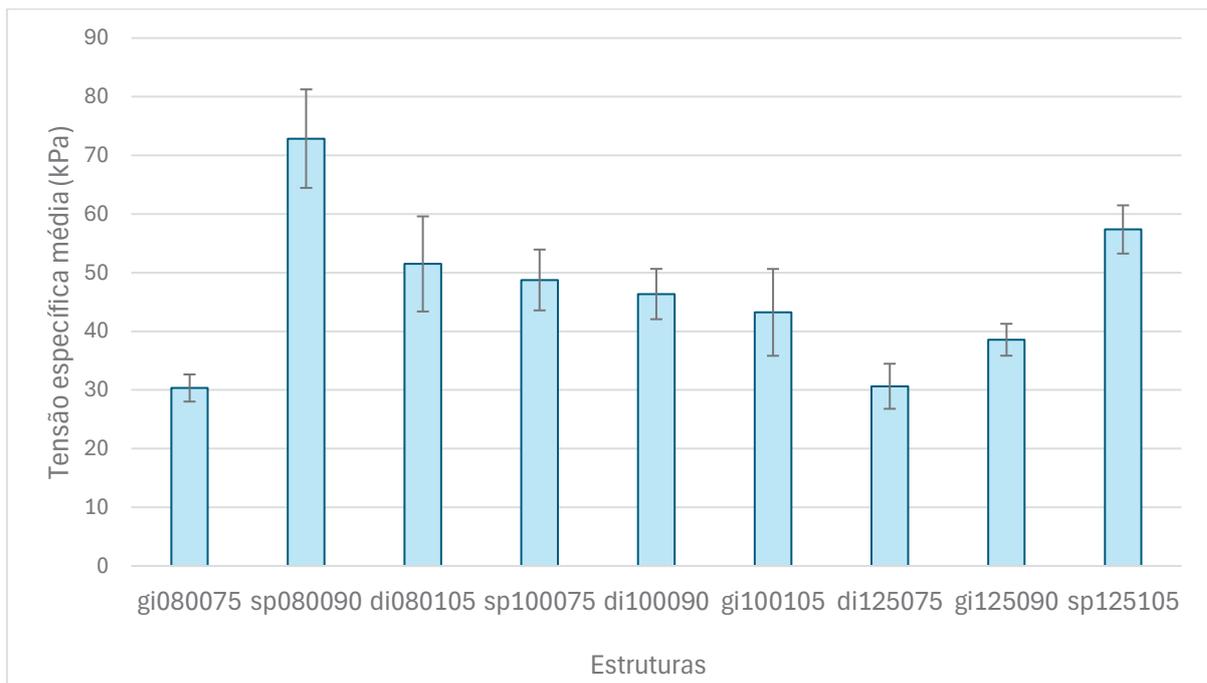
De acordo com os valores de módulo de elasticidade obtidos observa-se que geometrias Schwarz P possuem os maiores módulos de elasticidade. A fim de analisar a variação total de módulo de elasticidade de cada geometria, foi calculado a amplitude entre o maior e menor módulo de elasticidade, Schwarz P apresentou uma variação de 230 kPa, a diamante obteve uma variação de 205 KPa, já giroide obteve variação de 50 kPa.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a coleta de dados dos ensaios, foram calculadas as massas específicas (Kg/m^3) para assim obter uma tensão específica como resposta do ensaio. A tensão específica leva em conta a quantidade de material presente em cada corpo de prova para assim calcular de tensão.

Os cálculos das densidades foram feitos baseados na massa de cada corpo de prova dividido por seu volume previsto (valores dimensionais retirados do projeto 3D CAD). Para os valores de tensão, foi definido o valor de tensão em 10 % de deformação para cada corpo de prova descrito anteriormente. A FIGURA 36 apresenta os resultados obtidos com a média e desvio padrão de cada estrutura.

FIGURA 36 - TENSÃO ESPECÍFICA PARA CADA CORPO DE PROVA



FONTE: O autor (2024)

A próxima etapa foi a análise de experimentos Taguchi no *software Minitab* utilizando a tensão específica como resposta, célula unitária, espessura de parede e geometria como fatores. A TABELA 5 ilustra a ANOVA para Razões Sinal Ruído.

TABELA 5 – ANOVA PARA RAZÕES SINAL RUÍDO

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Célula Unitária	2	3,2767	3,2767	1,6384	8,79	0,102
Espessura de Parede	2	18,0536	18,0536	9,0268	48,43	0,02
Geometria	2	26,6349	26,6349	13,3175	71,45	0,014
Erro de Resíduos	2	0,3728	0,3728	0,1864		
Total	8	48,3381				

FONTE: O autor (2024)

Pela ANOVA para razões de Sinal Ruído percebe-se que espessura de parede e geometria tem um p-valor menor que 0,05 (assumindo 5 % de significância), ou seja, tais parâmetros são estatisticamente significativos para o estudo com influência na tensão específica da estrutura. Já a célula unitária mostra p-valor de 0,102 sendo assim, não é um fator estatisticamente significativo.

A TABELA 6 apresenta em ordem de importância, chamados de postos, quais parâmetros mais influenciam no resultado segundo a ANOVA, sendo geometria o mais importante (posto 1), seguido por espessura de parede (posto 2) e por último célula unitária (posto 3).

TABELA 6 - RESPOSTAS PARA RAZÕES SINAL RUÍDO

Nível	Célula Unitária	Espessura de Parede	Geometria
1	33,57	30,94	31,25
2	33,13	34,02	35,3
3	32,13	33,87	32,27
Delta	1,44	3,08	4,05
Posto	3	2	1

FONTE: O autor (2024)

A partir disso, verificou-se que o modelo de regressão obtido com esses fatores caracteriza 99,23 % do processo, conforme 6.

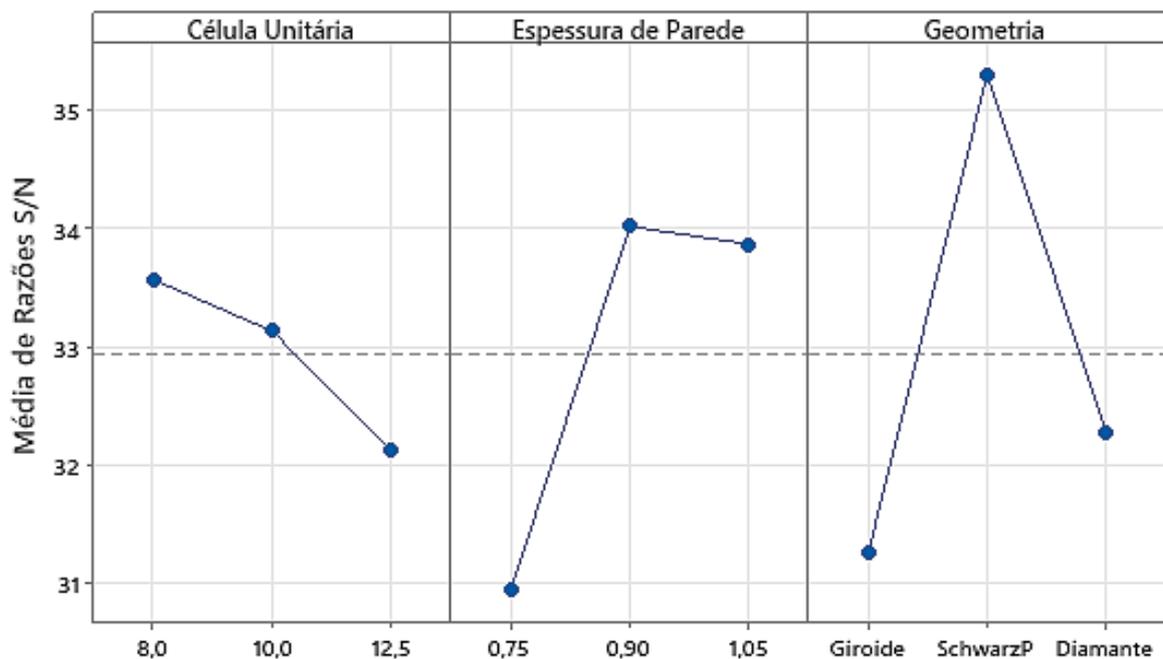
$$P = \frac{SQ_{CU} + SQ_{EP} + SQ_{GEO}}{SQ_{TOTAL}} * 100 \quad (4)$$

$$P = \frac{47,9652}{48,3381} * 100 \quad (5)$$

$$P = 99,23 \quad (6)$$

A FIGURA 37 ilustra a influência de cada parâmetro na média de razões Sinal Ruído, onde deixa evidente que a combinação de geometria Schwarz P, com célula unitária 8 mm e espessura de parede de 0,9 mm obteve a maior tensão específica. De acordo com a FIGURA 36, são os corpos de prova de estrutura sp080090.

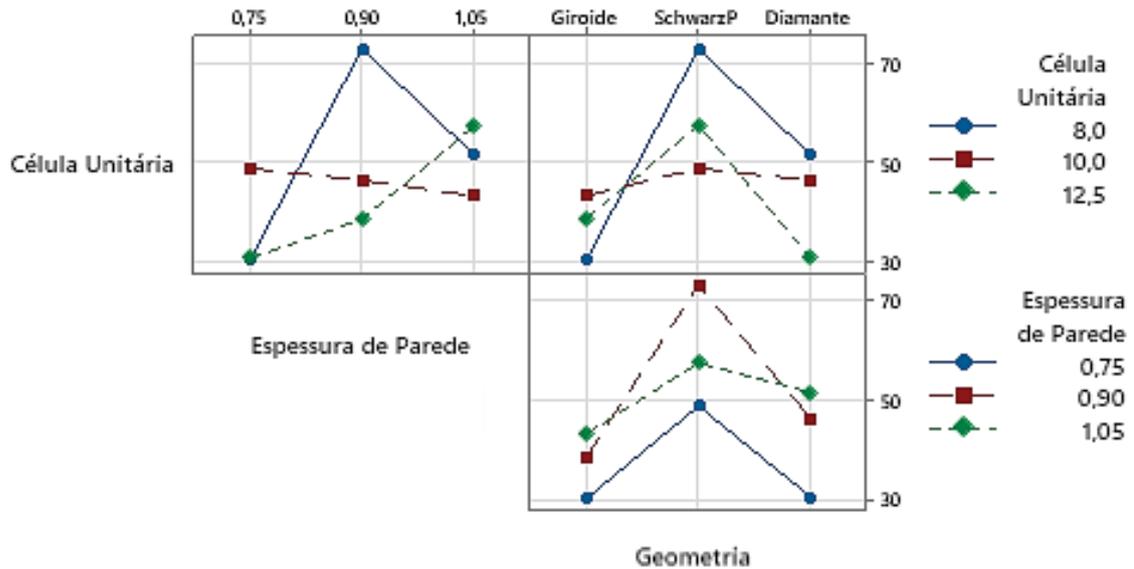
FIGURA 37 – EFEITOS NA MÉDIA PARA RAZÕES S/N



FONTE: O autor (2024)

Quanto a interação entre os fatores e níveis, a FIGURA 38 ilustra o comparativo entre os fatores: Célula Unitária, Espessura de Parede e Geometria.

FIGURA 38 - INTERAÇÃO ENTRE FATORES E NÍVEIS



FONTE: O autor (2024)

Primeira análise, célula unitária *versus* espessura de parede: Observa-se que para células unitárias com 10 mm (linha quadrado), quanto maior a espessura de parede menor será os valores de tensão específica, já para células unitárias de 12,5 mm (linha losango) quanto maior a espessura de parede maior será a tensão específica. Porém para células unitárias de 8 mm (linha círculo), a variação na espessura de parede não segue um padrão, tornando o ponto média 0,9 mm como sendo o de maior tensão específica.

Segunda análise, feita entre célula unitária *versus* geometria: Observa-se que a geometria tem grande influência na tensão específica, sendo que, o giroide tem o melhor resultado com 10 mm de célula unitária (linha quadrado), já Schwarz P e diamante obtiveram a maior tensão específica com 8 mm de célula unitária (linha círculo). Porém o pior resultado para Schwarz P foi com 10 mm (linha vermelha) e para diamante 12,5 mm de célula unitária (linha losango). Tornando assim um fator extremamente importante de se analisar, visto que existe uma relação entre os dois fatores.

Terceira análise entre espessura de parede e geometria: Seguiu um padrão onde giroide e diamante se comportaram muito parecido, com melhor resultado utilizando espessura de parede de 1,05 mm (linha losango) e pior resultado com 0,75 mm (linha círculo). Já Schwarz P obteve o melhor resultado com 0,9 mm (linha quadrado) e o pior com 0,75 mm (linha círculo).

Um fator interessante observado é que a espessura de parede de 0,9 mm obteve os maiores resultados, mesmo sendo um valor intermediário. Tornando assim um candidato interessante para otimização em relação ao peso de uma peça, já que a quantidade de material gasto para 0,9 mm é menor que 1,05 mm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar como diferentes parâmetros de *design* de uma peça influenciam o comportamento perante ensaios de compressão em peças fabricadas por tecnologia DLP de MA utilizando resina flexível, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A variação dos parâmetros de *design* escolhidos tem grande influência na quantidade de material gasto, chegando a duplicar de quantidade. Estrutura gi125090 teve a menor massa com cerca de 22 g, já a estrutura sp080090 obteve 44,44 g. Tornando assim um fator de importância quando o interesse é o peso final das peças.
- Giroide apresentou um comportamento bem parecido entre todas as variações de parâmetros: no módulo de elasticidade em que todas as variações tiveram valores muito próximos com variação em 50 kPa e massa com variação de 7,38 g. Já a geometria diamante apresentou variação de massa de 20,74 g, o menor valor de módulo de elasticidade entre todas as estruturas com o di125075 (93 kPa) e a segunda menor variação com 205 kPa. Por fim, a geometria Schwarz P apresentou variação de massa de 13,18 g, os maiores módulos de elasticidade dos experimentos como também a maior variação de módulo de elasticidade com 230 kPa. Observados os resultados pode-se concluir que a geometria Schwarz P apresentou sensibilidade a variação de seu *design*, apesar de sempre possuir altos valores de módulo de elasticidade específica. Já a geometria diamante também apresentou sensibilidade no *design*, porém apresentou variação de posição entre os módulos de elasticidade, ou seja, possui estruturas entre os menores e maiores módulos de elasticidade.
- Já a análise estatística obteve resultados estatisticamente significativos, concluindo que espessura de parede e geometria realmente impactam diretamente nos valores de tensão específica, sendo a geometria o parâmetro que mais tem impacto. Por outro lado, o tamanho da célula unitária não obteve valores estatisticamente significativos.

- Quando analisados a interação entre os parâmetros, pode se observar que espessura de parede obteve um valor otimizado para geometria Schwarz P, sendo que 0,9 mm obtiveram os maiores valores de tensão específica, ou seja, gastando menos material que espessura 1,05 mm conseguiu ter uma tensão específica maior. Tornando assim um valor interessante quando se trata de economia de material e peso final da peça, pois o gasto de material aumenta à medida que a espessura de parede aumenta.
- Outro fator verificado foi a influência de cada geometria em relação a variação dos outros parâmetros, ou seja, cada geometria se comporta diferentemente quando variados os parâmetros. Como exemplo: giroide e diamante obteve uma maior tensão específica quando a espessura de parede foi de 1,05 mm, já Schwarz P obteve a maior tensão específica para 0,9 mm de espessura de parede.

Em geral o estudo pode concluir que estruturas TPMS são afetadas diferentemente pelas variações em seus parâmetros de *design*. Algumas tiveram uma maior estabilidade nos resultados de tensão específica mesmo variando seus parâmetros como foi o caso da giroide, outras possuíram grande sensibilidade como diamante e Schwarz P. Sendo que diamante demonstrou um comportamento versátil onde dependendo dos valores de parâmetros escolhidos, ela pode se comportar próximo a algumas estruturas giroide ou Schwarz P, tornando assim uma geometria mais adaptativa para se trabalhar.

5.1 IDEAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Sendo assim, fator importante para se ressaltar do estudo foi a influência da célula unitária nos resultados, onde não obteve significância estatística para sua análise ser válida neste presente trabalho. Trabalhos futuros que possam envolver uma maior variação em valores de espessura de parede e geometrias, com tamanho de célula unitária fixa, torna-se interessante para fins de otimização topológica de tais geometrias. Como também trabalhos onde o foco seja células unitárias, com o intuito de analisar onde geometria e espessura de parede sejam

valores fixos a fim de se encontrar valores de células unitárias que possam ter significância estatística.

Outro assunto abordado é a sensibilidade de cada geometria as variações de parâmetros, tornando assim um ponto interessante a ser estudado. Onde seria analisado mais detalhadamente o comportamento de cada tipo de geometria TPMS em relação as variações de seus parâmetros.

Um tema não abordado pelo presente trabalho que gerou uma ideia de estudos futuros, seria a análise de fratura em estruturas TPMS manufaturadas por polímeros flexíveis submetidos a ensaios de compressão, foi observado um comportamento quando analisado as curvas, porém seria necessário a confirmação da fratura através de análise interna de todas as estruturas, o que saiu do foco do presente trabalho.

Estruturas TPMS tem grande influência nos resultados e diversas aplicabilidades como demonstrado nesse estudo e em sua revisão sistemática da literatura. Porém elas não são otimizadas em relação aos seus parâmetros de *design*, que podem impactar diretamente em quantidade de material gasto e propriedades mecânicas. Tais estruturas tem potencial para aplicações diversas na engenharia de produto, a manufatura aditiva possibilitou a fabricação de tais geometrias devido sua complexidade e agora surge o momento de analisar mais detalhadamente suas possíveis aplicações.

O presente estudo acrescentou ainda mais a literatura referente a tais estruturas e utilização de polímero flexível, trazendo assim a possibilidade de aplicação em produtos onde esforços de compressão são aplicados e necessário certa customização que a manufatura aditiva pode proporcionar. Aplicações de material para absorção de energia em capacetes e tênis já estão sendo produzidas por empresas como Carbon utilizando a manufatura aditiva e estrutura complexas para otimizar tais produtos.

REFERÊNCIAS

- ALHARBI, N.; OSMAN, R.; WISMEIJER, D. Factors Influencing the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Full-Coverage Dental Restorations Using Stereolithography Technology. **The International Journal of Prosthodontics**, v. 29, n. 5, p. 503–510, 2016.
- AL-KETAN, O.; ROWSHAN, R.; ABU AL-RUB, R. K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. **Additive Manufacturing**, v. 19, p. 167–183, 2018.
- ALSHAMRANI, A. A.; RAJU, R.; ELLAKWA, A. Effect of Printing Layer Thickness and Postprinting Conditions on the Flexural Strength and Hardness of a 3D-Printed Resin. **BioMed Research International**, v. 2022, p. 1–9, 2022.
- ALTIPARMAK, S. C.; YARDLEY, V. A.; SHI, Z.; LIN, J. Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 83, p. 607–636, 2022. Elsevier.
- ANSARI, A. A.; KAMIL, M. Izod impact and hardness properties of 3D printed lightweight CF-reinforced PLA composites using design of experiment. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 5, n. 3, p. 369–383, 2022. Elsevier.
- ARMSTRONG, M.; MEHRABI, H.; NAVEED, N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 84, p. 1001–1029, 2022. Elsevier.
- ASTM D3574 - 17. ASTM D3574 - 17: Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials - Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams, 2017.
- BUTLER, N.; ZHAO, Y.; LU, S.; YIN, S. Effects of light exposure intensity and time on printing quality and compressive strength of β -TCP scaffolds fabricated with digital light processing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 44, n. 4, p. 2581–2589, 2024.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering AN INTRODUCTION**. 10^o ed. 2018.
- CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3^o ed. Artliber, 2013.
- ENGINEERING PRODUCT DESIGN. Vat Photopolymerization. Disponível em: <<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/vat-photopolymerization/>>. Acesso em: 22/2/2024.
- FENG, G.; LI, S.; XIAO, L.; SONG, W. Mechanical properties and deformation behavior of functionally graded TPMS structures under static and dynamic loading. **International Journal of Impact Engineering**, v. 176, p. 104554, 2023.

FENG, J.; FU, J.; YAO, X.; HE, Y. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. **International Journal of Extreme Manufacturing**, v. 4, n. 2, p. 022001, 2022.

FORMLABS. SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers. Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>>. Acesso em: 20/2/2024.

HANEY, C. W.; SILLER, H. R. Anthro-fidelic behavior of elastic-plastic lattice structures. **Polymer Testing**, v. 120, p. 107970, 2023.

HWANG, B.-K.; KIM, S.-K.; KIM, J.-H.; KIM, J.-D.; LEE, J.-M. Dynamic compressive behavior of rigid polyurethane foam with various densities under different temperatures. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 180, p. 105657, 2020.

JADHAV, A.; JADHAV, V. S. A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 2094–2099, 2022. Elsevier.

KARNA, DR. S.; SAHAI, R. An overview on Taguchi method. **International Journal of Engineering and Mathematical Sciences**, v. 1, p. 1–7, 2012.

KHALEGHI, S.; DEHNAVI, F. N.; BAGHANI, M.; et al. On the directional elastic modulus of the TPMS structures and a novel hybridization method to control anisotropy. **Materials & Design**, v. 210, p. 110074, 2021.

KLADOVASILAKIS, N.; TSONGAS, K.; KOSTAVELIS, I.; TZOVARAS, D.; TZETZIS, D. Effective mechanical properties of additive manufactured triply periodic minimal surfaces: experimental and finite element study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 11–12, p. 7169–7189, 2022.

LUBOMBO, C.; HUNEULT, M. A. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. **Materials Today Communications**, v. 17, p. 214–228, 2018. Elsevier.

LÚCIA DA SILVA, E.; MUSZKAT MENEZES, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4^o ed. Florianópolis, 2005.

MASKERY, I.; STURM, L.; AREMU, A. O.; et al. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. **Polymer**, v. 152, p. 62–71, 2018.

MELCHELS, F. P. W.; FEIJEN, J.; GRIJPMA, D. W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. **Biomaterials**, v. 31, n. 24, p. 6121–6130, 2010. Elsevier.

MOHAN PANDEY, P.; VENKATA REDDY, N.; DHANDE, S. G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review. **Rapid Prototyping Journal**, v. 9, n. 5, p. 274–288, 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7º ed. Grupo GEN, 2016.

MOUSTA. O que é impressão 3D? Disponível em: <<https://www.mousta.com.br/o-que-e-impressao-3d/>>. Acesso em: 9/2/2023.

OSMAN, R.; ALHARBI, N.; WISMEIJER, D. Build Angle: Does It Influence the Accuracy of 3D-Printed Dental Restorations Using Digital Light-Processing Technology? **The International Journal of Prosthodontics**, v. 30, n. 2, p. 182–188, 2017.

PARK, S. Y.; KIM, K. S.; ALMANGOUR, B.; GRZESIAK, D.; LEE, K. A. Compressive deformation behavior and energy absorption characteristic of additively manufactured sheet CoCrMo triply periodic minimal surface lattices. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 171–184, 2022. Elsevier.

PENG, C.; TRAN, P.; MOURITZ, A. P. Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular composite structures. **Composite Structures**, v. 300, p. 116167, 2022.

PEREIRA, T.; JESUS, A. V. DE; VALVERDE, G.; ROLAND, R.; OLIVEIRA RODRIGUES, L. K. DE. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE PREENCHIMENTO E DA ALTURA DE CAMADA DE DEPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA A PARTIR DE IMPRESSÃO 3D. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 8, n. 1, p. 95–103, 2021.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. Prentice-Hall, 1989.

PIEDRA-CASCÓN, W.; KRISHNAMURTHY, V. R.; ATT, W.; REVILLA-LEÓN, M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. **Journal of Dentistry**, v. 109, p. 103630, 2021. Elsevier.

PROTO3000. Continuous Digital Light Processing (cDLP) 3D Printing Technology™. Disponível em: <<https://proto3000.com/service/3d-printing-services/technologies/cdlp-3d-printing-technology/>>. Acesso em: 20/2/2024.

QUAN, H.; ZHANG, T.; XU, H.; et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. **Bioactive Materials**, v. 5, n. 1, p. 110–115, 2020.

RAHIMIDEHGOLAN, F.; ALTENHOF, W. Compressive behavior and deformation mechanisms of rigid polymeric foams: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 253, p. 110513, 2023.

AL RASHID, A.; AHMED, W.; KHALID, M. Y.; KOÇ, M. Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. **Additive Manufacturing**, v. 47, p. 102279, 2021. Elsevier.

REDMANN, A.; OEHLMANN, P.; SCHEFFLER, T.; KAGERMEIER, L.; OSSWALD, T. A. Thermal curing kinetics optimization of epoxy resin in Digital Light Synthesis. **Additive Manufacturing**, v. 32, p. 101018, 2020. Elsevier.

REYMUS, M.; FABRITIUS, R.; KESSLER, A.; et al. Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: the impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging—an in vitro study. **Clinical Oral Investigations**, v. 24, n. 2, p. 701–710, 2020.

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

ROUF, S.; MALIK, A.; SINGH, N.; et al. Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. **Sustainable Operations and Computers**, v. 3, p. 258–274, 2022. Elsevier.

SAVA, R.; APOSTOL, D. A.; CONSTANTINESCU, D. M. Evaluation of the mechanical behavior of 3D printed cellular metamaterials with special geometries. **Proceedings of the Romanian Academy, Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science**, v. 24, n. 1, p. 61–70, 2023.

SAVOLAINEN, J.; COLLAN, M. How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? – Review of Literature. **Additive Manufacturing**, v. 32, p. 101070, 2020. Elsevier.

SEIDEL, C. Metal Additive Manufacturing: Why standards lay the foundation for continued industry growth. **Metal Additive Manufacturing**, 2021.

SHEN, M.; QIN, W.; XING, B.; et al. Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 41, n. 2, p. 1481–1489, 2021.

SHI, K.; YANG, W.; MEI, H.; et al. Characterization and enhancement of quasi-static and shear mechanical properties of 3D printed lightweight SiOC lattices: Effects of structural design and parameters. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 43, n. 14, p. 5882–5893, 2023.

SRIVASTAVA, M.; RATHEE, S.; PATEL, V.; KUMAR, A.; KOPPAD, P. G. A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 2612–2641, 2022. Elsevier.

SU, A.; AL'AREF, S. J. History of 3D Printing. **3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine**. p.1–10, 2018a. Elsevier.

SU, A.; AL'AREF, S. J. History of 3D printing. **3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine**. p.1–10, 2018b. Elsevier.

TAGUCHI, G. **Introduction to Quality Engineering**. 1986.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, S. **Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market**. 1° ed. New York: McGraw Hill, 1999.

TAHAYERI, A.; MORGAN, M. C.; FUGOLIN, A. P.; et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. **Dental Materials**, v. 34, n. 2, p. 192–200, 2018. Elsevier.

TAMEZ, M. B. A.; TAHA, I. A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101748, 2021. Elsevier.

TAORMINA, G.; SCIANCALEPORE, C.; MESSORI, M.; BONDIOLI, F. 3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, v. 16, n. 3, p. 151–160, 2018.

TUMBLESTON, J. R.; SHIRVANYANTS, D.; ERMOSHKIN, N.; et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. **Science**, v. 347, n. 6228, p. 1349–1352, 2015.

UNKOVSKIY, A.; BUI, P. H.-B.; SCHILLE, C.; et al. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. **Dental Materials**, v. 34, n. 12, p. e324–e333, 2018.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1° ed. Blucher, 2017.

YU, S.; SUN, J.; BAI, J. Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. **Materials & Design**, v. 182, p. 108021, 2019.

ZHANG, J.; XIAO, P. 3D printing of photopolymers. **Polymer Chemistry**, v. 9, n. 13, p. 1530–1540, 2018.

ZHANG, K.; MENG, Q.; QU, Z.; HE, R. A review of defects in vat photopolymerization additive-manufactured ceramics: Characterization, control, and challenges. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 44, n. 3, p. 1361–1384, 2024.

ZOCCA, A.; WILBIG, J.; WASKE, A.; et al. Challenges in the Technology Development for Additive Manufacturing in Space. **Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers**, v. 1, n. 1, p. 100018, 2022. Elsevier.