



Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



EFEITO DA VARIAÇÃO DE DESIGN EM GEOMETRIAS TPMS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA

EFFECT OF DESIGN VARIATION ON TPMS GEOMETRIES MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING

EFFECTO DE LA VARIACIÓN DEL DISEÑO EN GEOMETRÍAS TPMS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA

Davi Salvini Chixaro ^{1*}, Fabiano Oscar Drozda ², Ricardo Júnior de Oliveira Silva ³, & Sérgio Fernando Lajarin ⁴

^{1 2 3 4} Universidade Federal do Paraná, Campus Politécnico – Curitiba/PR

^{1*} davisalvini@gmail.com ² fabiano.drozda@gmail.com ³ ricardojrosilva@gmail.com ⁴ espanhol@ufpr.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 27.06.2024

Aprovado: 30.08.2024

Disponibilizado: 12.09.2024

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva; Processamento Digital de Luz; Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas; TPMS; DLP.

KEYWORDS: Additive Manufacturing; Digital Light Processing; Triply Periodic Minimal Surfaces; TPMS; DLP.

PALABRAS CLAVE: Fabricación Aditiva; Procesamiento de Luz Digital; Superfícies Mínimas Triplemente Periódicas; TPMS; DLP.

*Autor Correspondente: Chixaro, D. S.

RESUMO

A Manufatura Aditiva tornou-se um processo eficaz na fabricação de produtos altamente customizáveis e de grande complexidade. Tecnologia DLP é utilizada desde áreas como medicina e odontologia até a produção de calçados e equipamentos de segurança, devido sua alta resolução nos detalhes das peças produzidas. Estruturas Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) são estudadas desde o século XIX 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 às 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 propôs uma avaliação das estruturas TPMS mais estudadas, sendo elas giroides, diamante e Schwarz P e seus parâmetros de design tamanho de célula e espessura de parede, para analisar seus comportamentos quando submetidas a ensaios de compressão. Os resultados obtidos mostraram que o 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.

ABSTRACT

Additive Manufacturing has become a useful process for producing highly customizable and complex products. DLP technology is employed across fields such as medicine,

dentistry, footwear, and safety equipment due to its high resolution in detailing produced parts. Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) structures have been studied since the 19th century as curved proposals devoid of sharp corners, thereby hindering crack propagation under mechanical stress. Due to their complexity, their manufacture was previously impossible before the advent of additive manufacturing technologies. Analyzing studies on TPMS structures reveals a lack of defined design parameters and their influence on compression mechanical tests, as well as comparisons between structures. This study aimed to evaluate the most studied TPMS structures gyroid, diamond, and Schwarz P and their design parameters such as cell size and wall thickness, to analyze their behaviors under compression tests. Results indicated that cell size did not show statistical significance, whereas geometry and wall thickness exhibited a strong relationship with calculated elasticity modulus values.

RESUMEN

La Fabricación Aditiva se ha convertido en un proceso útil para la fabricación de productos altamente personalizables y de gran complejidad. La tecnología DLP se utiliza desde áreas como medicina y odontología hasta la producción de calzado y equipos de seguridad, debido a su alta resolución en los detalles de las piezas producidas. Las estructuras Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) se han estudiado desde el siglo 19 como propuestas de curvas donde no hay presencia de esquinas vivas, lo que dificulta la propagación de grietas cuando están sometidas a esfuerzos mecánicos. Debido a su alta complejidad, su fabricación era imposible hasta la aparición de tecnologías de fabricación aditiva. Al analizar estudios sobre las estructuras TPMS, se observa la falta de definición de los parámetros de diseño y su influencia en pruebas mecánicas de compresión, así como en comparaciones entre estructuras. Este estudio propuso evaluar las estructuras TPMS más estudiadas: gyroid, diamante y Schwarz P, y sus parámetros de diseño, como el tamaño de celda y el grosor de pared, para analizar sus comportamientos cuando se someten a pruebas de compresión. Los resultados obtenidos mostraron que el tamaño de celda unitaria no presentó significancia estadística, mientras que la geometría y el grosor de la pared mostraron una fuerte relación con los valores calculados de módulo de elasticidad.

INTRODUÇÃO

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 sobrepostos um a um até a formação da pirâmide. A ideia de Manufatura Aditiva (MA) não se limita às tecnologias de impressão 3D, mas sim em utilizar um método de produção que se baseia em adição de material. 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, aplicações na área médica, automotiva etc. Atualmente está presente em diversas áreas desde simples criações de artesanatos até aplicações de alta complexidade de engenharia e medicina.

Devido à 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) mencionam 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 variado dentre diversas opções. 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), estruturas TPMS possuem excelentes características, como: grande área superficial em relação ao volume; porosidade elevada; 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) mencionam a grande variabilidade das estruturas TPMS e suas aplicações, como também a dependência de seus parâmetros de *design* 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 apresentam diversos estudos onde avaliam a variação de geometrias TPMS e quais as diferenças nas propriedades mecânicas.

Diversos estudos como Haney e Siller (2023), Sava et al. (2023), Shen et al. (2021), Shi et al. (2023) e Yu et al. (2019) avaliaram a influência de estruturas TPMS manufaturadas aditivamente em diversas tecnologias e materiais, as geometrias mais utilizadas foram: giroide, diamante e Schwarz P. Além disso, todos utilizaram os mesmos parâmetros de *design*, como espessura de parede e tamanho de célula unitária. Porém, nenhum desses artigos avaliou a aplicação de tais estruturas em materiais flexíveis, o que foi o foco do presente estudo.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo geral 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 Liquid Crystal Display (LCD).

METODOLOGIA

MATERIAS E EQUIPAMENTOS

Para o presente estudo foi utilizado uma impressora 3D de tecnologia LCD da marca Anycubic modelo Photon Mono e resina da marca 3DLAB, produzida e vendida no Brasil, produto com nome de Resina Flexível apresentando as seguintes características técnicas (Tabela 1).

Tabela 1. Características técnicas da resina fornecidas pelo fabricante e sua composição química não é fornecida devido o segredo industrial da empresa

Características	Valores
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).

Devido ao formato das geometrias TPMS e características, como paredes finas e células unitárias pequenas, optou-se pela tecnologia de foto-polimerização em cuba devido a sua precisão e qualidade no acabamento. Já a resina flexível foi escolhida por apresentar um comportamento elástico, acreditando que não fossem ocorrer fraturas por fragilidade do material durante os ensaios de compressão.

Para análise da massa dos corpos de prova, foi utilizada uma balança de marca Ohaus modelo DV215CD classe I com precisão de 0,001 g. A máquina de ensaio de compressão utilizada foi uma Emic DL10000 equipada com célula de carga modelo CC150 500 N/50 kgf.

O *software* utilizado para a modelagem 3D foi o nTopology devido à possibilidade de trabalhar exclusivamente a geometria interna em manufatura aditiva. Para fazer o planejamento de processo de impressão, o *software* utilizado foi o Chitubox basic v1.9.5. Por fim, para a análise de dados estatísticos proveniente do método de Taguchi, foram utilizados o MiniTab e o Excel para geração dos gráficos.

DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento foi dividido em quatro etapas:

1. Modelagem do corpo de prova, 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.

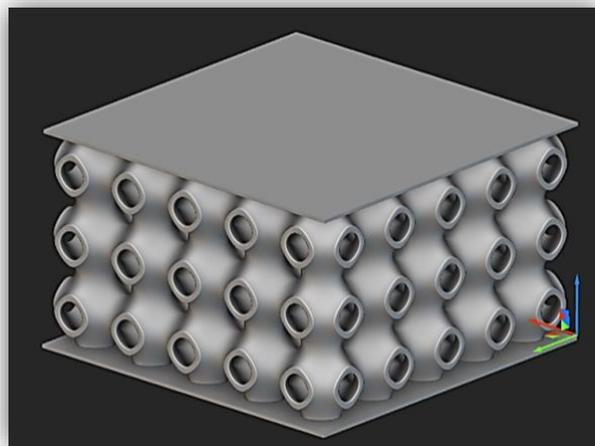
MODELAGEM DO CORPO DE PROVA, NORMA E MÉTODO DE TAGUCHI

A definição das geometrias e variação de parâmetros se baseou em uma revisão da literatura feita nas bases de dados Science Direct e Web of Science, utilizando a seguinte *string* de busca ("DLP" OR "vat photopolymerization" OR "LCD") AND "TPMS". Onde as geometrias mais

utilizadas foram giroide, diamante e Schwarz P. Os corpos de prova foram manufacturados com base no modelo descrito na norma ASTM D3574 para os ensaios de compressão, onde é definido um corpo de prova padrão com dimensões de 50 x 50 x 25 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.

Nesse 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 **Error! Not a valid bookmark self-reference.** é apresentado um corpo de prova que foi modelado.

Figura 1. Corpo de prova com geometria Schwarz P modelado de acordo com norma ASTM D3574 utilizando o software nTopology



Fonte: Autores (2023)

Definidas as dimensões e características dos corpos de prova por meio da revisão da literatura e normas, foi aplicado o *design* de experimentos Taguchi. Primeiramente foram definidos os fatores e níveis a serem trabalhados (Quadro 1).

Quadro 1. Fatores e níveis escolhidos para modelagem dos corpos de prova

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: Autores (2023).

Definido os fatores e níveis, prosseguiu-se para a construção da matriz ortogonal de Taguchi, dentro do *software* Minitab. O número de experimentos ficou limitado a 9 ou 27, devido à construção da matriz. 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 (Tabela 2).

Tabela 1. Apresenta a matriz ortogonal gerada, sendo que para cada combinação é necessário manufaturar um total de 3 corpos de prova

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

Fonte: Autores (2023).

CARACTERIZAÇÃO DA PEÇA COM BASE NOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

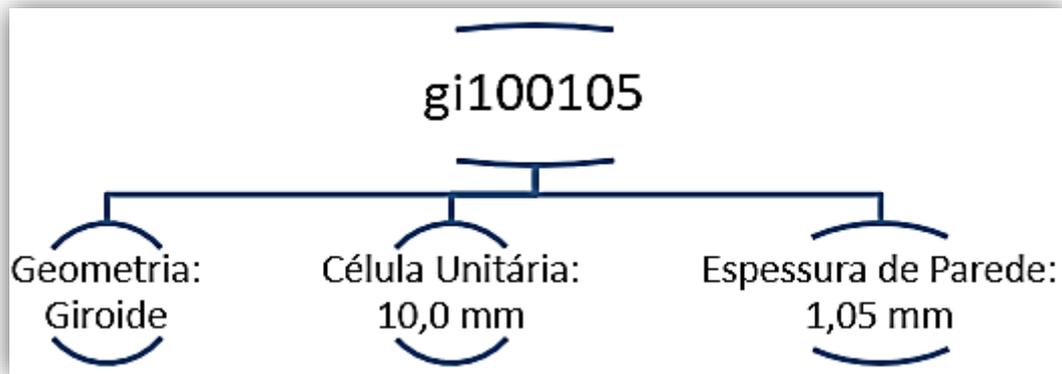
Após modelado as nove combinações de corpos de prova foi exportado o arquivo .STL para a próxima etapa de planejamento do processo de impressão. Já dentro do *software* Chitubox foram definidas algumas etapas do planejamento, entre elas: parâmetros do processo e utilização de suportes. Alguns parâmetros importantes foram fornecidos pelo fabricante da resina 3D Lab, como: número de camadas base, tempo de exposição da camada base e das demais camadas (Figura 2).

Figura 2. Configuração de impressão do *software* Chitubox estabelecidos pelo próprio *software* que não foram ajustados

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: Autores (2023).

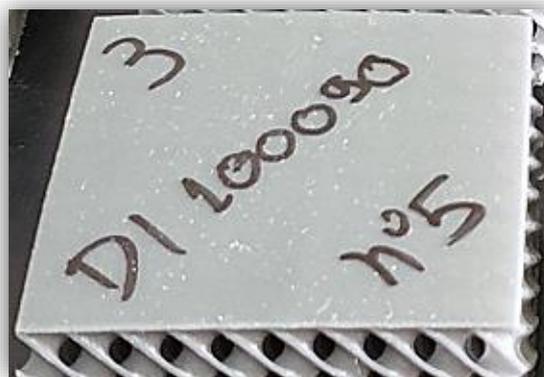
Uma nomenclatura padrão para cada corpo de prova foi criada, seguindo a ordem de: geometria; tamanho de célula unitária e espessura de parede (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

Figura 3. Legenda descritiva dos corpos de prova

Fonte: Autores (2023).

Após a impressão, foi feita limpeza por imersão em álcool isopropílico 95% por 5 minutos e cura em câmara UV por 20 minutos, ao final todas as peças foram deixadas expostas em uma mesa para finalizar a evaporação total do 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.

Para definição das réplicas, que seriam três ao total para cada corpo de prova, definiu-se a adição do número 1 a 4 diretamente acima da legenda no corpo de prova. 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 às variações de combinações (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

Figura 4. Corpo de prova legendados em ordem de ensaio

Fonte: Autores (2023).

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA PEÇA UTILIZANDO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Devido às 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, a pré-compressão 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-compressão para não correr o risco de apresentar rompimento interno da estrutura e afetar o decorrer do experimento. Também foi modificada 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, foi escolhida devido às 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.

Sendo assim, o ensaio proposto utilizou corpos de prova, com três réplicas, com dimensões descritas pela norma ASTM D3574, célula de carga de 500 N, velocidade de compressão de 2,5 mm/min, com critérios de parada de ensaio para 450 N ou compressão de 20 mm do corpo de prova. Concluído o ensaio o equipamento disponibiliza os valores de força aplicada (em Newtons) e deslocamento (em milímetros).

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 2.

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. 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). A tensão específica leva em conta a quantidade de material presente em cada corpo de prova e os valores de tensão retirados dos ensaios de compressão.

ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados foram armazenados pelo *software* que conduziu o experimento e, posteriormente, exportado os gráficos e valores gerados. Toda a parte de análise de dados foi feita utilizando *software* Excel e Minitab. O *software* Excel foi utilizado para organização dos dados, criação de tabelas e gráficos, análise dos dados oriundos do ensaio de compressão e das medições de peso e dimensões feitas nos corpos de prova.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Impressão e caracterização

Todos os corpos de prova foram impressos e passaram por uma análise de qualidade de impressão (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

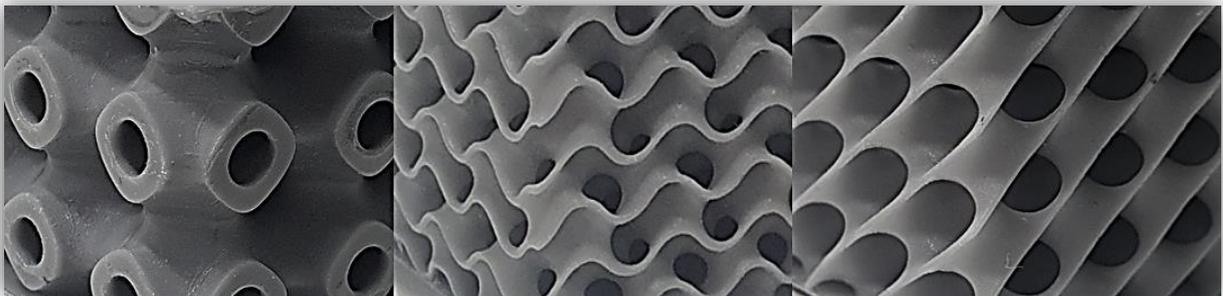
Figura 5. Corpos de prova impressos e legendados para inspeção visual antes dos ensaios



Fonte: Autores (2023).

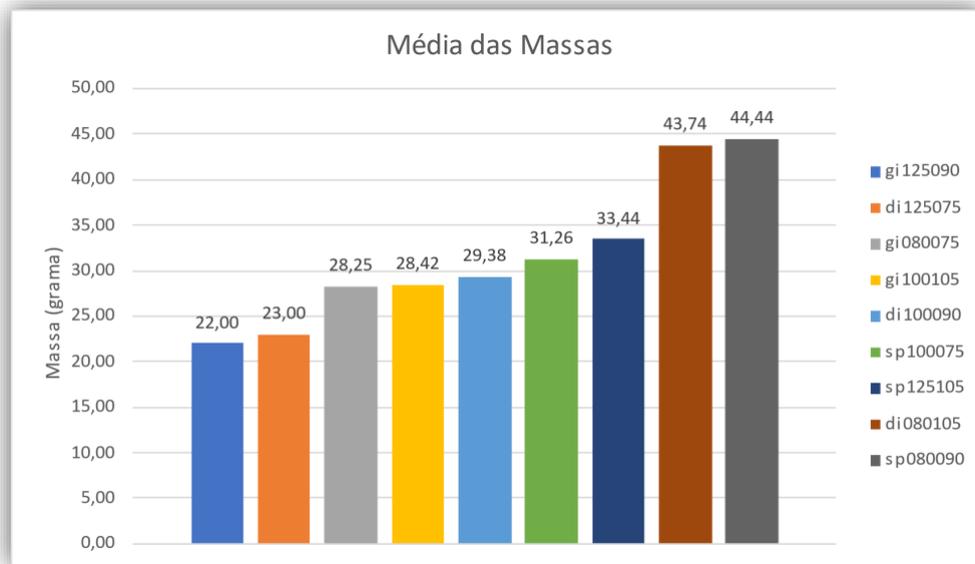
Do total de 27 corpos de prova, apenas três apresentaram problemas e precisaram ser reimpressos. Apesar de durante a impressão, limpeza e cura apresentaram normalidade no processo, cerca de 5 minutos após a cura eles começaram a apresentar rompimentos na parte superior. Nesse caso, a ação tomada foi a reimpressão dos corpos de prova que apresentaram rompimento. Após as reimpressões, foi realizada inspeção visual, todos apresentando

Figura 6. Detalhe do acabamento e integridade das estruturas dos corpos de prova



Fonte: Autores (2023).

Em seguida, as massas dos 27 corpos de prova foram aferidas utilizando uma balança de precisão, em seguida, feita a média das 3 réplicas (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

Figura 7. Gráfico das médias das massas dos corpos de provas

Fonte: Autores (2023).

Analisando os dados de massa é possível notar a variação na massa total de cada corpo de prova, sendo sp080090 com o dobro de massa de gi125090. Observou-se que corpos de prova com geometria Schwarz P tendem a possuir maiores valores de massa que diamante, que por sua vez são mais pesados que giroide. Já a geometria diamante 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 utilizado um fator que normalizasse 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 (Tabela 3).

Tabela 3. Média das densidades dos corpos de prova calculadas em kg/m³

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

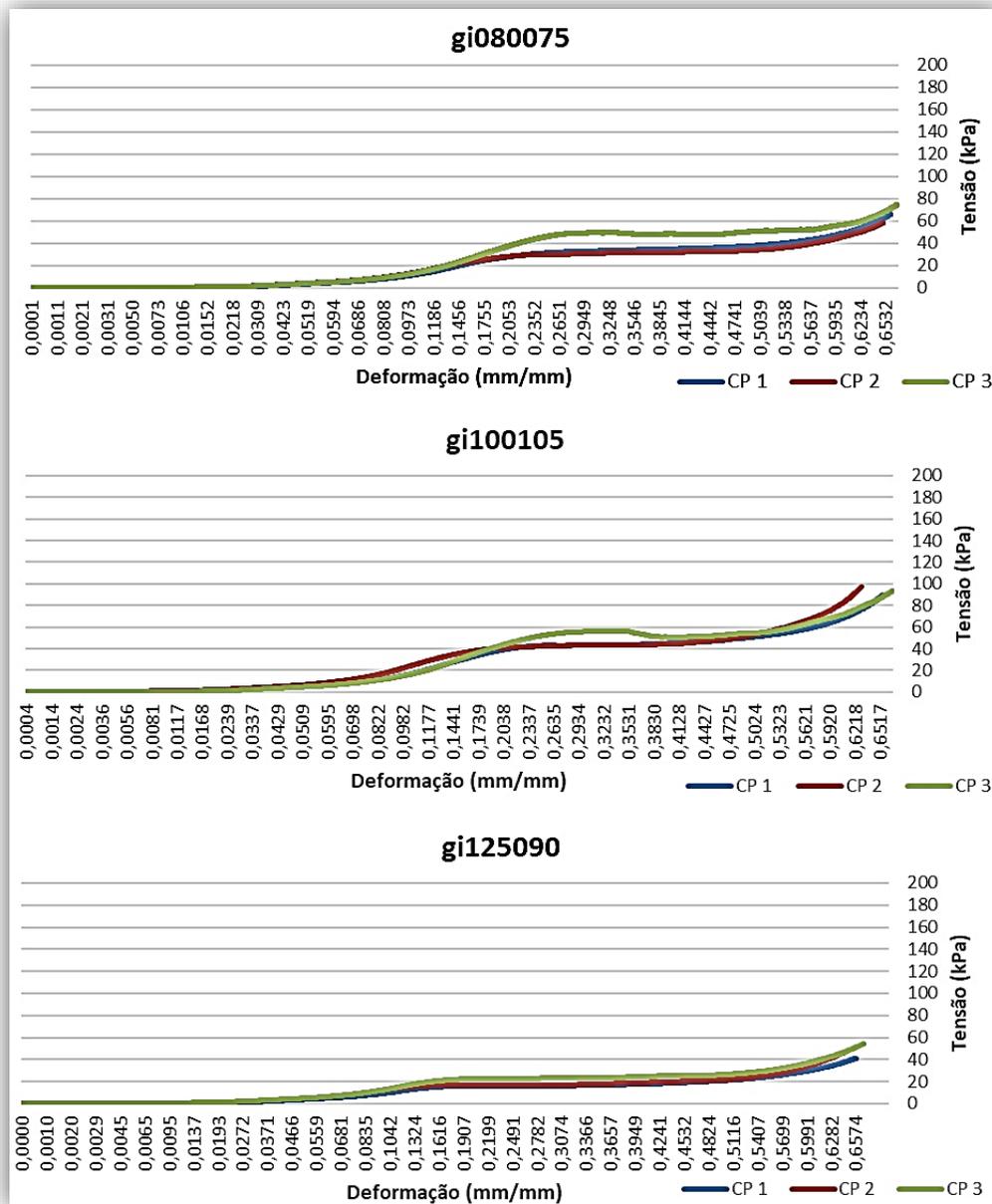
Fonte: Autores (2023).

Ensaio de compressão

Os dados e as curvas de compressão de cada corpo de prova (CP 1, CP 2, CP 3) foram gerados pelo sistema de ensaio. Dada a ausência de normas específicas para ensaios envolvendo estruturas TPMS com materiais flexíveis, este estudo utilizou como referência comparativa as curvas de compressão de espumas poliméricas de células abertas, devido à semelhança de suas aplicações. Essas curvas geralmente apresentam as seguintes regiões: inclinação (região

elástica), escoamento, platô (região plástica), inclinação final (região de densificação) e descarregamento (Hwang et al., 2020) (Figura 8).

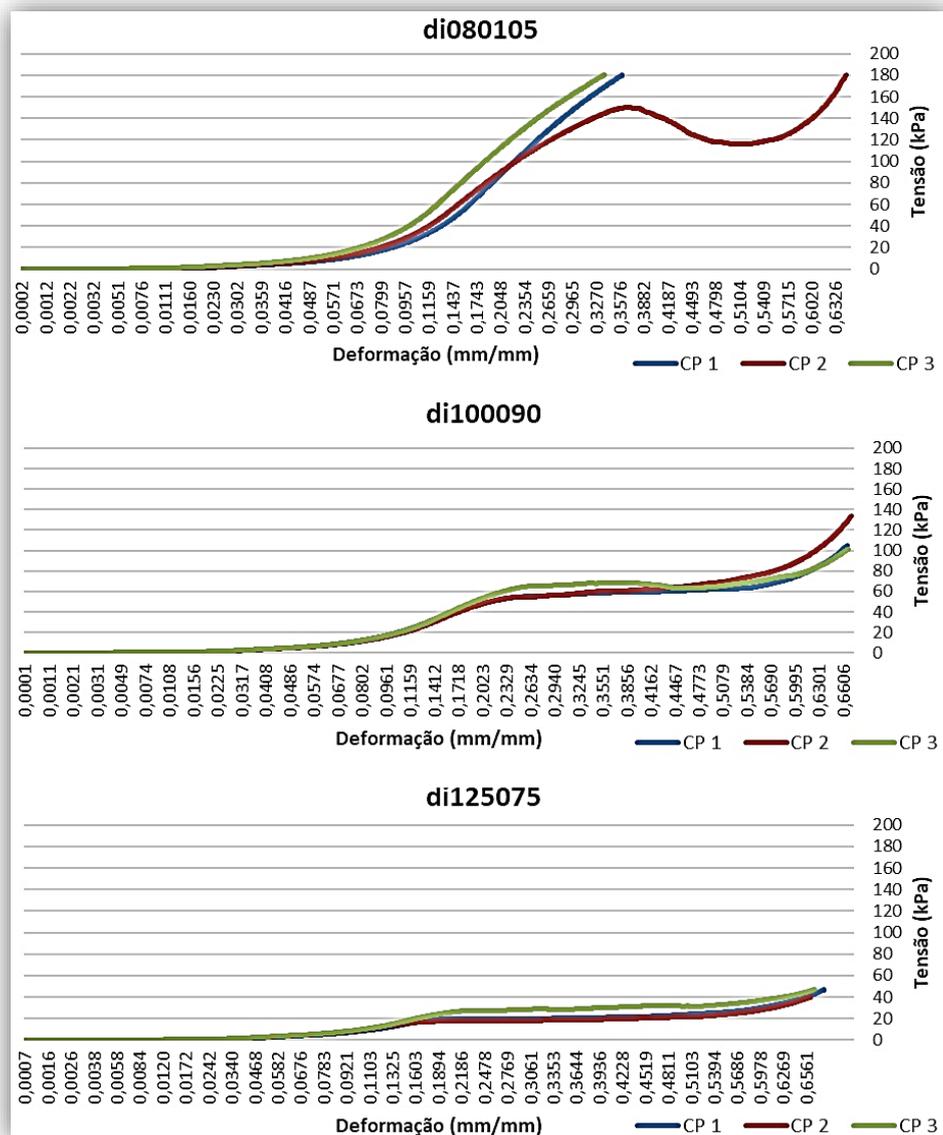
Figura 8. Curvas tensão versus deformação dos corpos de prova com geometria giroide



Fonte: Autores (2023).

As curvas de todas as estruturas apresentaram um comportamento semelhante, com uma inclinação inicial após aproximadamente 0,10 mm/mm, seguida por um platô entre 0,16 e 0,50 mm/mm, e finalizando com uma inclinação até o critério de parada. Todas as curvas atingiram o limite máximo de tensão em 0,66 mm/mm de deformação (20 mm de deformação, conforme o critério de parada da máquina), variando entre 40 e 100 kPa. É importante destacar que, após a compressão de 20 mm, todos os corpos de prova retornaram ao tamanho original, sem apresentar fissuras ou falhas visíveis na estrutura (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

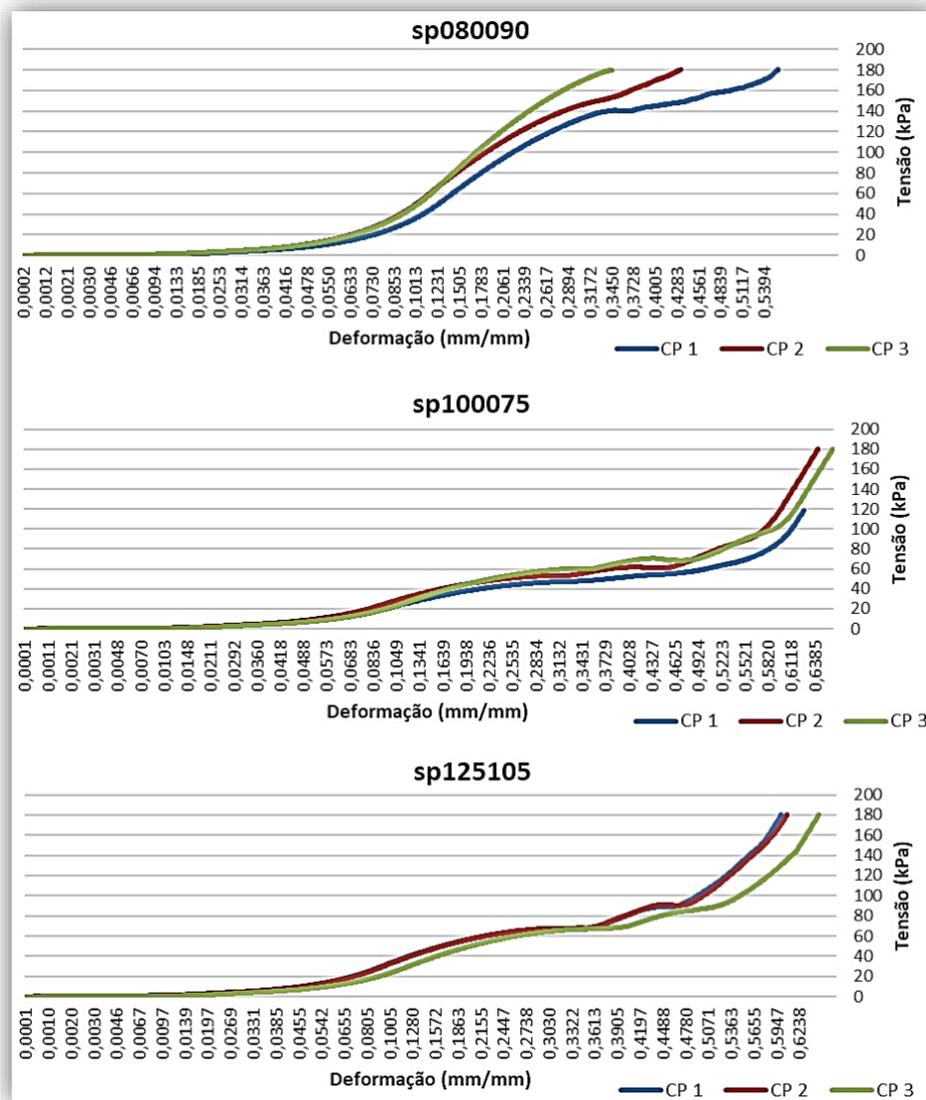
Figura 9. Curva tensão versus deformação dos corpos de prova com geometria diamante



Fonte: Autores (2023).

Os corpos de prova di100090 e di125075 exibiram comportamentos semelhantes, mas com valores de tensão máxima distintos, 120 kPa e 50 kPa, respectivamente. Ambos apresentaram inclinação na curva em torno de 0,10 mm/mm, um platô entre 0,20 mm/mm e 0,54 mm/mm, seguido por uma nova inclinação a partir de 0,54 mm/mm até a interrupção do ensaio. Por outro lado, a estrutura di080105 atingiu tensões máximas significativamente mais altas em comparação às outras, resultando na interrupção do ensaio devido ao limite da célula de carga. Essa estrutura mostrou uma inclinação abrupta de 0,07 mm/mm até 0,33 mm/mm, ponto em que o ensaio foi interrompido (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

Figura 10. Curva tensão *versus* deformação dos corpos de prova com geometria Schwarz P



Fonte: Autores (2024)

Os gráficos sp100075 e sp125105 mostram semelhanças nas estruturas, ambas atingindo o limite máximo de 180 kPa em torno de 0,61 mm/mm de deformação, que corresponde ao limite da célula de carga. A única diferença sutil é a inclinação da curva próxima a 0,3 mm/mm de deformação, onde sp125105 ultrapassa 50 kPa, enquanto sp100075 permanece em torno de 50 kPa. A curva sp080090, por sua vez, apresenta uma inclinação a partir de 0,06 mm/mm de deformação, mantendo-se até o limite da célula de carga, em 180 kPa, atingido em 0,34 mm/mm, 0,43 mm/mm e 0,55 mm/mm de deformação para CP3, CP2 e CP1, respectivamente.

Análise dos ensaios de compressão

A análise das curvas de todas as estruturas revela que, a partir de aproximadamente 20% (0,2 mm/mm) de deformação, as células unitárias começaram a se deformar, entrando em uma região que, segundo os gráficos tensão *versus* deformação, corresponde a uma fase de escoamento para a maioria das estruturas, até a densificação completa em torno de 50% de deformação (0,5 mm/mm). Essa deformação aparenta ser elástica, pois não foram observados

trincas, rasgos ou falhas aparentes, apenas um rearranjo da geometria das células unitárias. As curvas indicam a presença de uma região elástica, seguida por um platô (plástica) e uma região de densificação em quase todas as estruturas, conforme o padrão proposto por (Hwang et al., 2020).

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.

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, quando não se tem um gráfico tensão *versus* deformação com escoamento evidente (Tabela 4).

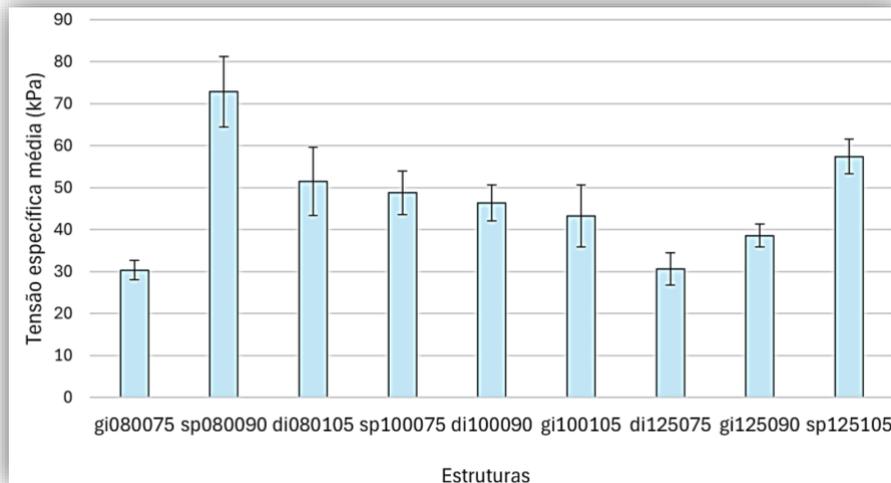
Tabela 4. Módulo de elasticidade médio de cada corpo de prova

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

Fonte: Autores (2024)

De acordo com os valores médios de módulo de elasticidade obtidos nota-se que geometrias Schwarz P possuem maiores módulos de elasticidade. Ao analisar a variação total de módulo de elasticidade de cada geometria, calculou-se a amplitude entre o maior e menor módulo de elasticidade, Schwarz P, apresentando variação de 230 kPa, a diamante obteve variação de 205 KPa, já giroide obteve variação de 50 kPa. Sendo que, após coleta nos ensaios, foram calculadas tensões específicas e a **Error! Not a valid bookmark self-reference.** apresenta resultados obtidos com a média (em azul) e desvio padrão (representado pelas linhas pretas verticais) de cada estrutura.

Figura 11. Tensão específica média e desvio padrão para cada corpo de prova



Fonte: Autores (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 (Tabela 5).

Tabela 1. 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				

Fonte1: Autores (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, os parâmetros que 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).

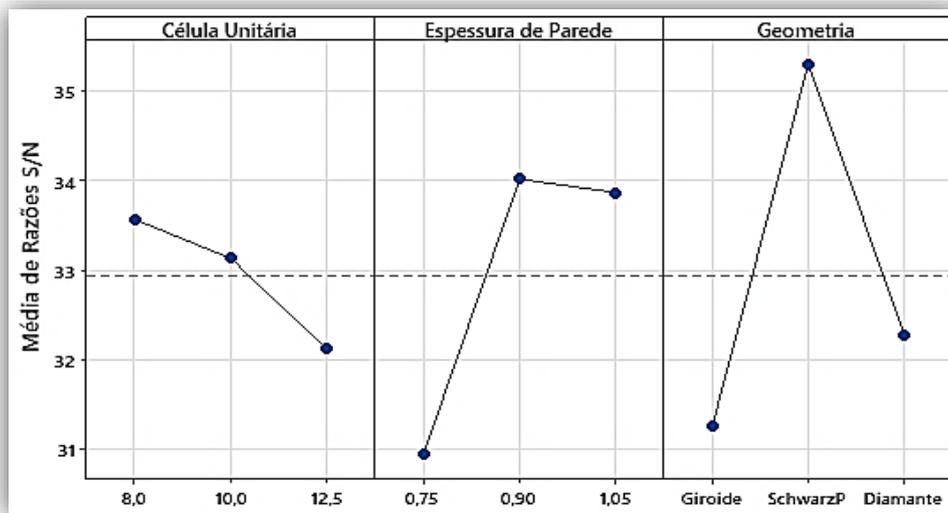
Tabela 2. Respostas para razões sinal ruído

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

Fonte2: Autores (2024)

A Error! Not a valid bookmark self-reference. 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.

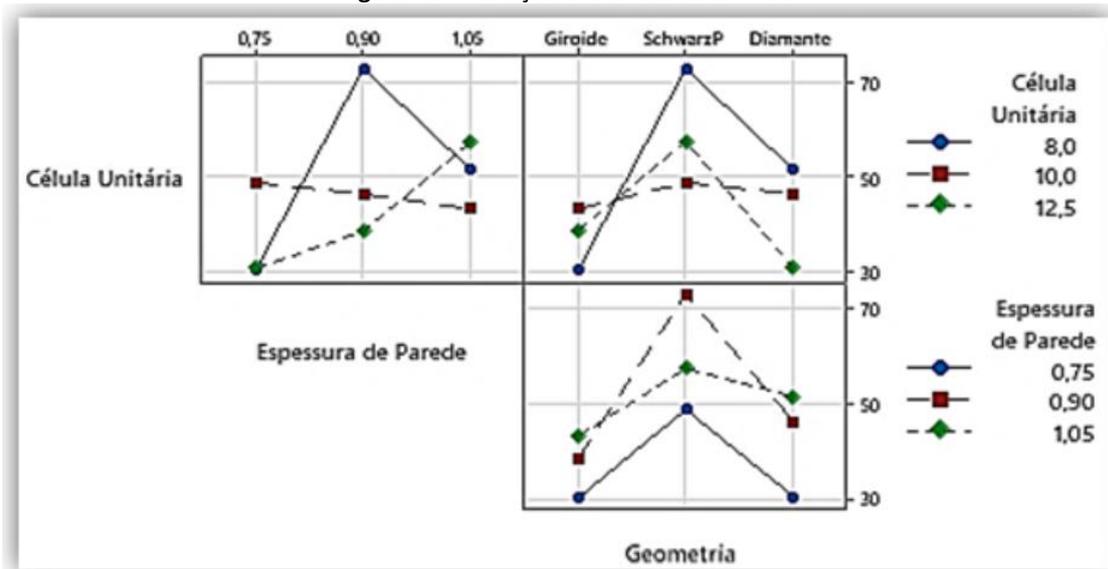
Figura 12. Efeitos na média para razões sinal ruído



Fonte3: Autores (2024)

Quanto à interação entre os fatores e níveis, a **Error! Not a valid bookmark self-reference.** ilustra o comparativo entre os fatores: Célula Unitária, Espessura de Parede e Geometria.

Figura 13. Interação entre fatores e níveis



Fonte4: Autores (2024)

Primeira análise, célula unitária *versus* espessura de parede (quadrante superior esquerdo): Observa-se que para células unitárias com 10 mm (linha quadrado), quanto maior a espessura de parede menores serão 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 (quadrante superior direito): 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 (quadrante inferior direito): 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.

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 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 à 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.

O presente trabalho se limitou a uma tecnologia de manufatura aditiva, foto-polimerização em cuba e um tipo de material, a resina flexível. Como também a poucas variações no *design* dos corpos de prova. É conhecido a existência de diferentes geometrias TPMS, como também podem apresentar variações de seus parâmetros, tornando-se, assim, um objeto extremamente extenso de estudo quando se quer comparar suas variações.

Pesquisas futuras podem concentrar-se na investigação de uma única geometria TPMS, variando exaustivamente os parâmetros da célula unitária e da espessura da parede, além de explorar seu comportamento utilizando diferentes matérias-primas. Para a aplicação desse tipo de estrutura, estudos de desenvolvimento de produto podem utilizar desta pesquisa para aplicar tais geometrias e parâmetros em protótipos que envolvam esforços mecânicos por compressão, como capacetes, tênis, entre outros.

REFERÊNCIAS

Altıparmak, S. C., Yardley, V. A., Shi, Z., & Lin, J. (2022). Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 607-636. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.032>

Feng, J., Fu, J., Yao, X., & He, Y. (2022). Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>

Haney, C. W., & Siller, H. R. (2023). Anthro-fidelic behavior of elastic-plastic lattice structures. *Polymer Testing*, 120, 107970. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107970>

Hwang, B.-K., Kim, S.-K., Kim, J.-H., Kim, J.-D., & Lee, J.-M. (2020). Dynamic compressive behavior of rigid polyurethane foam with various densities under different temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 180, 105657. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105657>

Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., & Hague, R. J. M. (2018). Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer

additive manufacturing. *Polymer*, 152, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.11.049>

Pereira, T., Jesus, A. V. de Valverde, G., Roland, R., & Oliveira Rodrigues, L. K. de. (2021). 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*, 8(1), 95–103. <https://doi.org/10.20873/uftv8-9605>

Rahimidehghan, F., & Altenhof, W. (2023). Compressive behavior and deformation mechanisms of rigid polymeric foams: A review. *Composites Part B: Engineering*, 253, 110513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110513>

Rodríguez-Panes, A., Claver, J., & Camacho, A. (2018). The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials*, 11(8), 1333. <https://doi.org/10.3390/ma11081333>

SAVA, R., APOSTOL, D. A., & CONSTANTINESCU, D. M. (2023). 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*, 24(1), 61–70. <https://doi.org/10.59277/PRA-SER.A.24.1.08>

Shen, M., Qin, W., Xing, B., Zhao, W., Gao, S., Sun, Y., Jiao, T., & Zhao, Z. (2021). Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(2), 1481–1489. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.06>

Shi, K., Yang, W., Mei, H., Yan, Y., Xu, L., Cheng, L., & Zhang, L. (2023). 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*, 43(14), 5882–5893. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.06>

Volpato, N. (2017). *Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D* (1o ed). Blucher.

Yu, S., Sun, J., & Bai, J. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>