

## **ANÁLISE COMPRESSIVA DO PREENCHIMENTO GIROIDE EM PEÇAS FABRICADAS POR FDM**

### **COMPRESSIVE ANALYSIS OF GYROID INFILL IN PARTS MANUFACTURED BY FDM**

**Lucas Hörner Decker,  
Julio Cesar Frantz**

**Resumo:** *A manufatura aditiva (AM) ou popularmente conhecida como impressão 3D tem, cada vez mais, substituído os métodos tradicionais de fabricação, de forma a permitir o acesso a novas alternativas, ideias ou conceitos que aparentemente exigiam complexidade em sua fabricação. Um tipo de estrutura que tem permitido avanços na área de impressão 3D é a aplicação do giroide como forma de preenchimento. O giroide identifica-se nesse meio por apresentar uma estrutura complexa de difícil fabricação, a qual foi justamente ignorada em sua descoberta na década de 70, mas com os avanços tecnológicos possibilita-se o estudo, análise e aplicação do mesmo. Com isso diversas áreas entre a medicina e a engenharia investigam, indicam e evidenciam as vantagens e qualidades propiciadas pelo giroide como, por exemplo, permeabilidade e comportamento satisfatório em relação à peso x resistência. Este trabalho têm como objetivo analisar e aplicar o giroide utilizando o processo de Fused Deposition Modeling (FDM) avaliando sua resistência compressiva em comparação aos preenchimentos linear e triangular. O desenvolvimento dos corpos de prova deu-se através do software Ultimaker Cura seguido da fabricação na impressora 3D Creativity Ender 3 sendo submetidos aos critérios de pico de carregamento, efeito anisotrópico e tempo de impressão. O presente estudo revelou que o giroide apresenta aspecto homogêneo em ambas as direções as quais sofreu carregamento destacando-o sobre os outros tipos de preenchimento, no entanto o preenchimento triangular realçou o menor tempo de impressão em conjunto a maior resistência compressiva na direção da impressão.*

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

**Palavras-chave:** Giroide. Manufatura Aditiva. Impressão 3D. FDM.

**Abstract:** Additive manufacturing or popularly known as 3D printing has increasingly replaced traditional manufacturing methods, in order to allow access to new alternatives, ideas or concepts that apparently required complexity in their manufacture. One type of structure that has allowed advances in the area of 3D printing is the application of the gyroid as a form of infill. The gyroid is identified in this environment because it presents a complex structure that is difficult to manufacture, which was precisely ignored in its discovery in the 70s, but with technological advances it is possible to study, analyze and apply it. With this, several areas between medicine and engineering investigate, indicate and show the advantages and qualities provided by the gyroid, such as, for example, permeability and satisfactory behavior in relation to weight x resistance. This work aims to analyze and apply the gyroid using the Fused Deposition Modeling (FDM) process, evaluating its compressive strength in comparison to the linear and triangular infills. The development of the specimens took place through the Ultimaker Cura software, followed by fabrication in the Creativity Ender 3 3D printer, being submitted to the criteria of load peak, anisotropic effect and printing time. The present study revealed that the gyroid has a homogeneous aspect in both directions which has been loaded, highlighting it over the other types of infills, however the triangular infill highlighted the shorter printing time together with the greater compressive strength in the printing direction.

**Keywords:** Gyroid. Additive Manufacturing. 3D Printing. FDM.

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia dos tecidos caracteriza-se por ser um campo multidisciplinar entre a biologia e a engenharia, tendo como objetivo recuperar, manter ou melhorar os tecidos celulares ou até órgãos. Envolvendo células, biomateriais e fatores bioativos, os quais

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

em conjunto devem conseguir reproduzir os movimentos físicos e químicos do corpo, ajudando na regeneração de um tecido danificado. O biomaterial normalmente aplica-se na forma de “*scaffolds*”, onde o mesmo deve ser capaz de adaptar-se ao ambiente de aplicação, bem como garantir as propriedades mecânicas, dentre as restrições do ambiente celular a porosidade torna-se um fator importante, pois o tamanho dos poros e a interconectividade determinam a comunicação entre as células, difusão de nutrientes, gases e resíduos (GERMAIN et al., 2018).

Estruturas criadas com Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas (TPMS) apresentam-se como procedências interessantes para a engenharia dos tecidos, visto demonstrarem características biomórficas, como alta porosidade, rede altamente interconectada e superfície lisa (YANG et al., 2019).

Melchels et al. (2010) analisou as propriedades de proliferação celular de “*scaffolds*” com diferentes arquiteturas de poros e constatou que o TPMS giroide mostrou 10 vezes mais permeabilidade que os outros modelos de TPMS, sendo facilmente umedecidos e instruídos por uma suspensão de células.

TPMS distingue-se como superfícies contínuas que não se interseccionam, que possuem a curvatura média igual a zero, sua área superficial é minimizada localmente de modo que se entrelaçam no espaço 3D, delimitando o volume em um número finito de “labirintos”. As estruturas de TPMS evidenciam vantagens em sua eficiência estrutural sobre as estruturas convencionais, despertando relevância ao setor de projetos, envolvendo aplicações de estruturas de alta rigidez, absorvedores de impacto de energia, catalisadores químicos e implantes ósseos médicos (LEARY et al., 2019). Existem diversos tipos de estruturas na família das TPMS, pode-se visualizar alguns exemplos na Fig. 1.

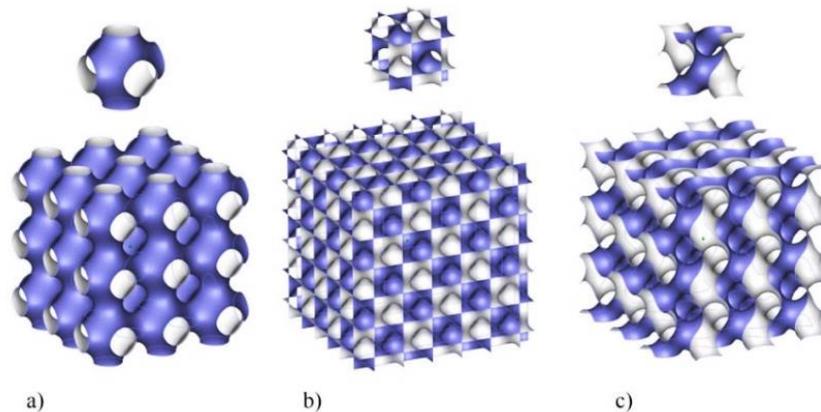
Análise Compressiva Do Preenchimento  
 Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm


Figura 1. Estruturas TPMS, (a) Schwarz Primitive, (b) Schwarz Diamond e (c) Schoen Gyroid (adaptado de AL-KETAN e AL-RUB, 2019)

A superfície giroide trata-se de um dos modelos mais comuns de TPMS, o cientista da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) Alan Schoen foi o responsável por sua descoberta em 1970, visando projetos com novos materiais leves de alta resistência (LI et al., 2019). Ao conectar uma rede de giroide forma-se uma estrutura que atende vantagens como: (1) Possuir alto entrelaçamento, ou seja, conectividade estrutural. (2) Devido a sua forma, não há geração de suporte durante a fabricação por AM. (3) Exibe alta resistência em baixa densidade. Em comparação com os outros modelos comuns de TPMS (como Schwarz Diamond e Primitive), a estrutura giroide dispõe de uma área mais ampla de conexão (LI et al., 2019).

Neste trabalho, o objetivo geral é investigar o comportamento compressivo do giroide e compará-lo com outros dois tipos de preenchimentos, o linear e triangular. Para isso, dividiu-se nos seguintes objetivos específicos: realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o giroide e suas aplicações; desenvolver o *design* do corpo de prova e o método de fabricação; comparar os preenchimentos.

O desenvolvimento deste estudo está ligado a linha de pesquisa de Análise de Projeto Mecânico do Curso de Engenharia Mecânica da UNIFE. A organização deste trabalho estabeleceu-se da seguinte forma: Na revisão bibliográfica, apresenta-se uma contextualização sobre o giroide, manufatura aditiva e o ensaio de compressão. Em seguida, define-se os parâmetros e critérios de avaliação do estudo, a fabricação dos corpos de prova, ensaios e análise dos resultados. Nas conclusões são destacadas as principais vantagens bem como sugestões de trabalhos futuros.

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A AM consegue replicar uma variedade de processos que fabricam componentes diretamente do modelo CAD (Desenho Assistido por Computador), utilizando basicamente uma sequência de camadas unidas e integradas. Conseqüentemente não possui as mesmas restrições que a fabricação convencional, logo permitindo a geração de formas complexas, oferecendo a possibilidade de redução de massa com aumento na funcionalidade do componente (MASKERY et al., 2017).

Stan e Milodin (2020) estudaram o comportamento mecânico de um braço robótico submetido a esforços de flexão de forma híbrida, integrando em uma parte do braço a estrutura de giroide impressa pelo processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS). Em seu trabalho verificaram que uma estrutura baseada apenas em giroide não é recomendada para aplicações as quais necessitam de atividades repetitivas, visto o aumento de elasticidade que resulta na perda de rigidez do sistema quando comparado a um corpo sólido com as mesmas proporções. Entretanto, Stan e Milodin (2020) concluíram que uma estrutura giroide torna-se interessante para ser implementada em sistemas robóticos controlados remotamente e que realizem tarefas com cargas relativamente baixas (4-5 kg), sendo que sua principal vantagem relaciona-se à redução de peso e momento de inércia, mantendo a resistência mecânica.

Ao implementar estruturas no formato de giroide em um componente de disjuntor a pesquisa de Hussmo e Schröder (2020) verificou que é possível manter a rigidez e a resistência em certos níveis em conjunto com a otimização da massa de forma a melhorar o desempenho do componente. A partir destes estudos os mesmos autores concluem que o giroide torna-se aplicável a uma ampla gama de produtos. Além disso, eles apontaram que o giroide pode ser fabricado com AM em uma variedade de materiais.

Pelanconi e Ortona (2019) desenvolveram um modelo inovador de viga incorporando em seu núcleo uma estrutura giroide em conjunto com hastes plásticas reforçadas com fibra de carbono nas extremidades. Os estudos demonstram que a

Análise Compressiva Do Preenchimento  
 Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

vantagem do sistema se encontra em posicionar as hastes de reforço exatamente ao longo das linhas de tensões solicitadas pela aplicação. Entretanto, notou-se inviabilidade para vigas com grande comprimento devido à dificuldade de inserção das hastes plásticas.

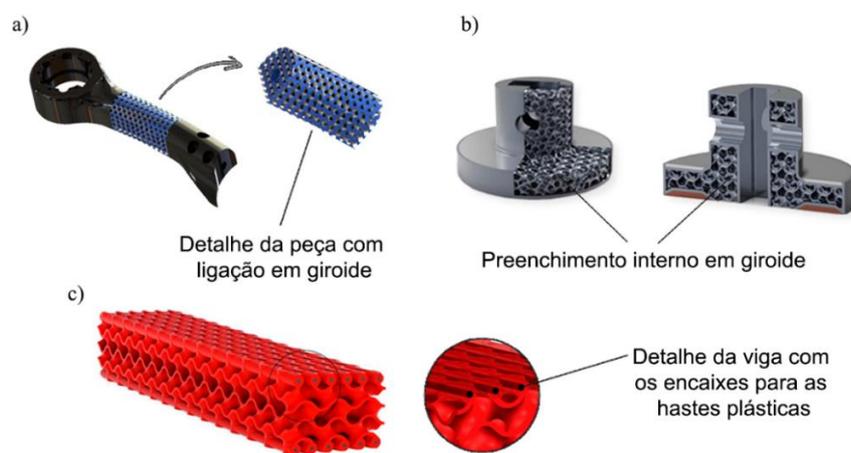


Figura 2. Exemplo de aplicações com giroide, onde (a) representa o braço robótico de STAN e MILODIN, (b) o componente de disjuntor (HUSSMO e SCHRÖDER) e (c) o modelo de viga proposto por PELANCONI e ORTONA (adaptado de STAN e MILONDIN, HUSSMO e SCHRÖDER, PELANCONI e ORTONA, 2019)

A impressão 3D está sendo aplicada em diversos campos, como a medicina, segmentos de artes visuais, educação e o próprio meio industrial. A facilidade de produzir peças customizadas e com custo relativamente baixo de recursos ressalta cada vez mais a tecnologia, além de ser um processo sustentável (GUERRA, 2019). Segundo Wang et al. (2018) uma das formas interessantes de controlar o custo é reduzir a taxa de preenchimento interno dos objetos impressos (Fig. 2), buscando manter a resistência.

Existem diversas técnicas de fabricação dentro da AM, cada uma com seus pontos positivos e negativos, tendo a possibilidade de usar diferentes materiais. A deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* – FDM) é uma das mais populares técnicas, visto seu baixo custo de aquisição e simples operação comparando-se aos outros métodos. A tecnologia FDM consiste basicamente na deposição de um composto termoplástico, o qual é fundido e extrusado em um cabeçote de impressão que em conjunto com a movimentação dos eixos X, Y e Z da máquina forma camadas e sucessivamente a peça projetada (CAMPOS, 2019). Contudo, os métodos de

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

impressão 3D normalmente seguem os mesmos passos: (1) criação do modelo 3D em um *software* CAD, (2) conversão do modelo para o formato STL (Linguagem padrão do triângulo), (3) transformar o STL em G-code, nesta etapa define-se as informações geométricas como espessura, densidade e formato das camadas de preenchimento do modelo, as quais ajustam-se de acordo com as necessidades de projeto (BUERGER, 2019).

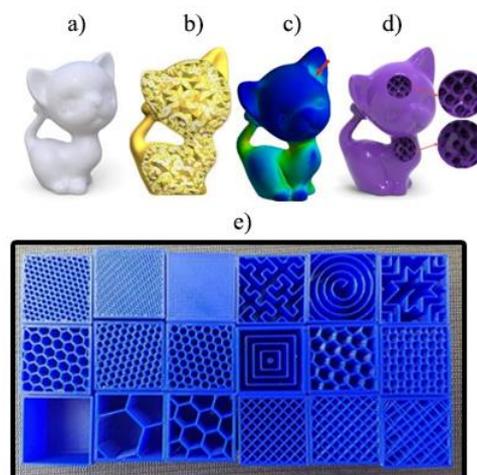


Figura 3. Ilustração do desenvolvimento de um componente, sendo a etapa (a) corresponde a criação do modelo 3D, (b) geração da malha tetraedra, (c) análise de elementos finitos, (d) definição das informações geométricas e (e) alguns tipos de preenchimentos existentes (adaptado de WANG et al., 2020 e GOLDSCHMIDT, 2021)

Como os outros métodos de fabricação, a impressão 3D também apresenta necessidade de seleção da matéria prima. O material definido para este trabalho é o Poliláctico Láctico (PLA), considerado o principal filamento empregado nas impressoras 3D. Algumas características que influenciam na seleção deste material são, por não requerer o aquecimento da mesa durante a impressão e ser sintetizado a partir do ácido láctico, o qual é obtido de fontes renováveis proveniente do amido de milho, cana-de-açúcar e amido de batata.

O PLA é um material atóxico, ou seja, inofensivo ao organismo humano e devido esta propriedade é utilizado na medicina em suturas e implantes cirúrgicos, inclusive pode ser aplicado em louças descartáveis, produtos de higiene, embalagens de alimentos, entre outros (BESKO et al., 2017).

## 2.1. TPMS / GIROIDE

As superfícies mínimas de acordo com Hussmo e Schröder (2020) são descritas como uma superfície com área mínima que a curvatura média é igual a zero, onde a curvatura média de uma superfície corresponde à medida em qualquer ponto da superfície. Um dos exemplos mais utilizados para representar as superfícies mínimas são os filmes de sabão, visto que ao mergulhar uma estrutura de arame em uma solução com sabão permite-se observar os filmes se estenderem entre os limites da estrutura de arame formando uma superfície com área mínima. As Superfícies Mínimas Triplamente Periódicas (TPMS) possuem estrutura cristalina, a qual se repete em três dimensões, ou seja, periódicas triplamente (HUSSMO e SCHRÖDER, 2020).

O giroide foi descoberto em 1970 pelo cientista da NASA Alan Schoen com requisitos para se enquadrar em uma TPMS, tendo características como não se auto interseccionar e não possuir quaisquer linhas retas (DOWNING et al., 2021). O giroide obteve o reconhecimento como uma estrutura biológica e cristalográfica, como a estrutura de cristal fotônico em escamas de asas de borboletas (Fig. 4) e membranas mitocôndrias em cones retiniais de musaranhos. A Figura 4 ilustra uma visão de uma borboleta (A) com o detalhe das suas asas em (B) e uma imagem ampliada com os detalhes da estrutura da asa (C) semelhante a estrutura giroide ilustrada em (D). Entretanto, devido a época de descoberta do giroide e com seu formato complexo, logo difícil de produzir pelos métodos tradicionais de fabricação o mesmo não recebeu atenção, mas com surgimento e a facilidade fornecida pela AM a aplicação de giroide está em crescente demanda no segmento da engenharia avançada de materiais (DOWNING et al., 2021). O giroide pode ser aproximado pela Eq. (1), de forma a permitir a implementação e desenvolvimento em *softwares* numéricos no qual extrai-se as coordenadas dos pontos geométricos e ajusta-se conforme necessidade, entretanto neste trabalho a implementação realiza-se diretamente pelo fatiador (*Ultimaker Cura*).

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

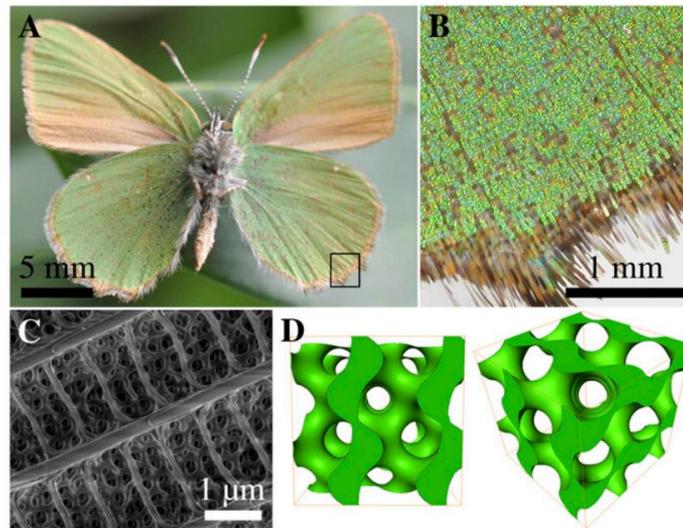


Figura 4. (A) borboleta e microestrutura nas asas (B) e (C) com indícios de giroide (D) (WINTER et al., 2015)

$$\sin\left(2\pi \frac{x}{a}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{a}\right) + \sin\left(2\pi \frac{y}{a}\right) \cos\left(2\pi \frac{z}{a}\right) + \sin\left(2\pi \frac{z}{a}\right) \cos\left(2\pi \frac{x}{a}\right) - t = 0 \text{ Eq. (1)}$$

Onde:

$a$  – tamanho da célula unitária

$t$  – é um parâmetro para a espessura em função da densidade relativa que varia entre -1,5 (fração de volume 0%) e 1,5 (fração de volume 100%)

## 2.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão proporcionam a análise de um corpo de prova quantificando as propriedades mecânicas como resistência e rigidez, introduzindo estes parâmetros com os geométricos e relacionando-os pode-se projetar redes de estruturas giroide para uma abrangente gama de aplicações. Além disso, a investigação experimental auxilia a detectar os benefícios e defeitos de fabricação, ou seja, o impacto dessas características no desempenho mecânico estrutural. Basicamente, o ensaio de compressão segue as etapas: (1) insere-se um corpo de prova na máquina que é exposto a uma força crescente em uma velocidade determinada, (2) conforme a amostra é comprimida os sensores medem o deslocamento do material (mm) e o nível de tensão (MPa) é encontrado, (3) gerando com estes dados o diagrama de tensão x deformação, onde as principais

características buscadas são deformação, tensão de escoamento, resistência a tração e o módulo de elasticidade (MACONACHIE et al., 2020 ; HUSSMO e SCHRÖDER, 2020).

Abaixo estão listadas as equações que são utilizadas para encontrar a tensão (Eq. 2), deformação (Eq. 3) e módulo de elasticidade (Eq. 4).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$\sigma$  – Tensão (MPa)

F – Força (N)

A – Área (mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  – Deformação (%)

$\Delta l$  – Variação do comprimento do corpo (mm)

$l_0$  – Comprimento inicial do corpo (mm)

E – Módulo de elasticidade (MPa)

Parab e Zaveri (2020) estudaram a influência do tipo de preenchimento no comportamento compressivo de peças em PLA fabricadas por FDM. O estudo aplicou-se em corpos de prova cúbicos (dimensões 35 x 35 x 35 mm) e revelou que o preenchimento triangular é extremamente resistente na direção de impressão e suporta cargas mais altas em relação aos outros preenchimentos (linear e giroide). Além disso, eles apontaram que o preenchimento giroide recomenda-se aplicar em situações as quais desconhece-se a direção do carregamento ou peças sujeitas ao carregamento transversal.

Ao comparar estruturas giroides fabricadas por diferentes tecnologias (FDM e *Polyjet*) Silva (2019) concluiu que a própria estrutura possui maior influência no comportamento compressivo do que o material e ressaltou que estruturas giroides fabricadas por métodos com menos influência anisotrópica geram peças com comportamento semelhante sob compressão, independente da direção do carregamento.

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

No presente trabalho identificou-se a ausência de normas técnicas destinadas exclusivamente para ensaios compressão em peças plásticas impressas 3D, sendo atribuído as orientações de repetibilidade conforme a norma ASTM D695-15 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do estudo e análise organizou-se o procedimento em seis etapas (Fig. 5), inicialmente empregou-se o giroide em corpos de prova comparando-o com outros tipos de preenchimento e posteriormente investigou-se uma aplicação em função dos resultados.



Figura 5. Fluxograma do procedimento (OS AUTORES)

Desenvolveu-se o modelo 3D no *software Solid Edge 2020 Student Edition*, sendo um cubo das seguintes dimensões 20 x 20 x 20 mm, o qual importou-se no fatiador *Ultimaker Cura*.

Neste programa realizou-se a seleção dos parâmetros de impressão como tipo de preenchimento, percentual de preenchimento, velocidade de impressão, entre outros, finalizando com a geração do G-code (linguagem de programação que faz uso do sistema Comando Numérico Computadorizado – CNC), logo limitando-se as configurações propostas pela impressora 3D.

Para realização da impressão 3D dos corpos de prova utilizou-se o equipamento *Creatily Ender 3* de tecnologia FDM com o filamento de PLA EasyFill da marca 3D Fila e espessura nominal de 1,75 mm.

Na Tabela 1 estão expressos os parâmetros fixos, ou seja, que não sofreram alteração durante o processo de impressão.

Tabela 1. Parâmetros fixos de impressão (OS AUTORES)

<b>Dimensões dos corpos de prova</b>	20 x 20 x 20 mm
--------------------------------------	-----------------

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

<b>Diâmetro do bico extrusor</b>	0,4 mm
<b>Temperatura do bico extrusor</b>	220 °C
<b>Altura da camada</b>	0,2 mm
<b>Espessura da parede</b>	0,8 mm (2 perímetros)
<b>Espessura da camada superior/inferior</b>	0,8 mm (4 camadas)
<b>Velocidade</b>	60 mm/s
<b>Temperatura da mesa</b>	50 °C

Para realização dos corpos de prova selecionou-se os seguintes tipos de preenchimento: linear, triangular e o giroide. O preenchimento linear encontra-se normalmente como a primeira opção pré-selecionada na maioria dos programas, desde os que acompanham a própria impressora até os mais dedicados, conseqüentemente estima-se que apresente um alto nível de utilização, sendo interessante para efetuar a comparação com o giroide. Em relação ao preenchimento triangular um estudo realizado por Aloyaydi et al. (2020) demonstrou que o mesmo obteve destaque perante a força máxima de pico suportada ao comparar-se a outros tipos de preenchimento, tendo em vista tal característica torna-se proeminente a análise comparativa.

É importante destacar na fabricação dos corpos de prova o estudo de Lovo e Fortulan (2016), pois revelaram que peças impressas 3D por FDM com PLA apresentam caráter anisotrópico (Fig. 6), logo evidencia-se a necessidade de observar este aspecto nos ensaios, com isso realizou-se a impressão no sentido 45°/45° (com exceção do giroide que é uma isosuperfície), sendo executado o ensaio de compressão no sentido de impressão e no sentido perpendicular a mesma, propiciando mostrar os efeitos anisotrópicos presentes.

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

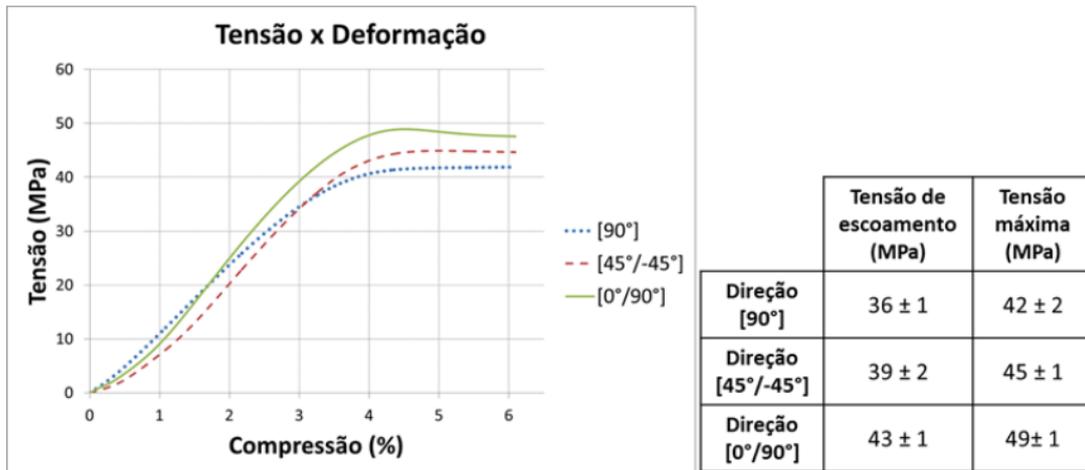


Figura 6. Ensaio de compressão com diferentes direções de impressão (LOVO E FORTULAN, 2016)

Enquadra-se na Tabela 2 os parâmetros variáveis, os quais dividiu-se em nove grupos e foram impressos dois lotes de cada. No primeiro lote executou-se o ensaio de compressão no sentido de impressão e o segundo na direção perpendicular, tendo uma repetibilidade de cinco ensaios por lote, ou seja, foram testadas no total 10 (dez) peças por grupo. O procedimento segue as orientações de repetibilidade conforme a norma ASTM D695-15 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*).

Tabela 2. Parâmetros variáveis (OS AUTORES)

Nome do grupo de ensaios	L20	L50	L80	T20	T50	T80	G20	G50	G80
Tipo de preenchimento	Linear			Triangular			Giroide		
Percentual de preenchimento	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%

Realizou-se os ensaios na máquina Pantec Versat 300 kN da fabricante Panantec que permite a carga máxima de 300 kN e indica o deslocamento com precisão de 1 µm. Utilizou-se nos ensaios a velocidade de avanço em 5 mm/min com a carga máxima do equipamento e definiu-se mensurar até 5% da deformação, ou seja, 1 mm de deslocamento. Avaliou-se o pico de carregamento até a deformação proposta e em 0,2%, onde realizou-se a média aritmética dos resultados de carregamento e deslocamento para cada lote, os quais são apresentados em gráficos de acordo com sentido de impressão.

Através dos ensaios de compressão realizou-se a coleta de dados dos resultados médios de pico de carregamento ( $F$ ) e deslocamento ( $\Delta l$ ). Posteriormente analisou-se os dados por meio de uma planilha no Excel aplicando-se a Eq. 2 e Eq.3 para encontrar a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ), tendo em vista a área do corpo de prova ( $A$ ) e o comprimento inicial ( $l_0$ ).

Na Figura 7 demonstrou-se o procedimento de teste efetuado: (a) modelamento CAD, (b) seleção dos parâmetros no fatiador, (c) impressão dos corpos de prova e (d) ensaio de compressão no sentido de impressão (detalhe - seta para cima) e no sentido perpendicular (detalhe - seta para direita).

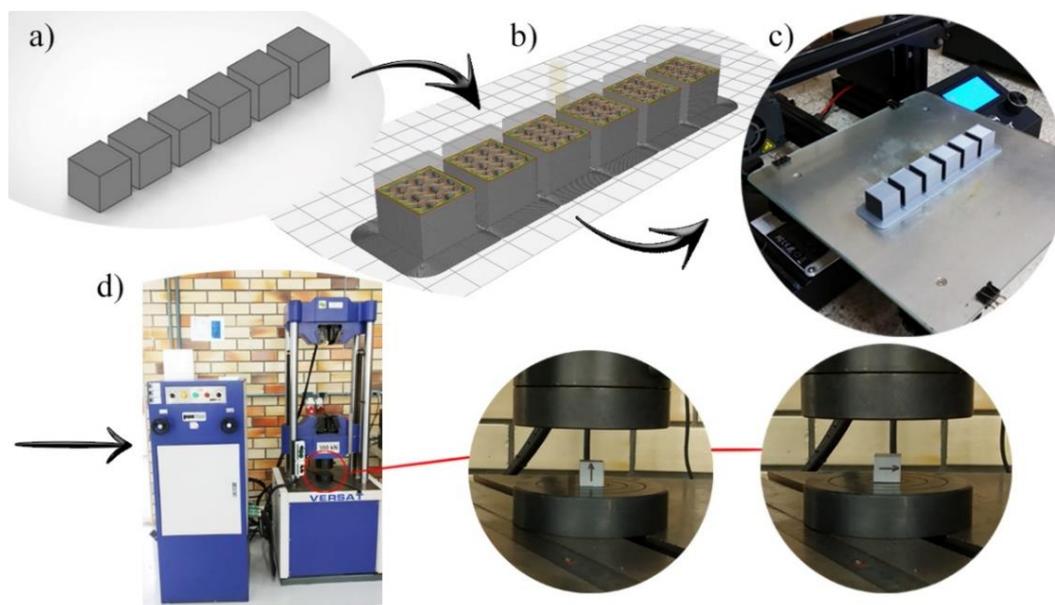


Figura 7. Procedimento de teste (OS AUTORES)

Outro fator que observou-se foram as massas dos corpos de prova com a balança digital Tomate MH-502, onde calculou-se a média aritmética dos valores encontrados e em conjunto analisou-se o tempo de impressão por peça em função dos grupos definidos. Subsequentemente aos ensaios de compressão direcionou-se os valores obtidos ao *software Excel* para análise e avaliação dos resultados sendo gerado gráficos visando mensurar o desempenho dos corpos de prova e facilitar a interpretação dos dados.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

Nesta seção apresenta-se a análise dos dados coletados durante o processo experimental conforme definido em materiais e métodos. A Figura 8 (a) ilustra os corpos de prova com preenchimento giroide sem as paredes, apenas com objetivo de visualização, (b) mostra os corpos de prova giroide deformados 20% na direção da impressão e (c) no sentido perpendicular todos na sequência 20/50/80% de preenchimento.

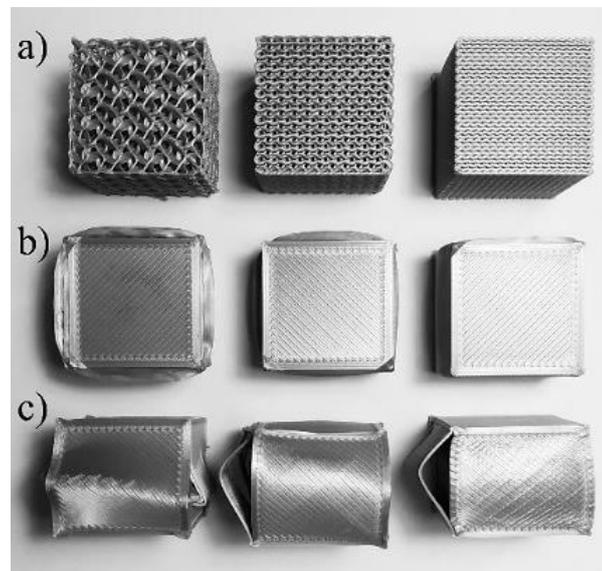


Figura 8. Corpos de prova (OS AUTORES)

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os valores médios de pico de carregamento e tensão atingidos na direção da impressão, logo visualiza-se o destaque para o preenchimento triangular (T20, T50 e T80) em todos percentuais o mesmo realçou a maior resistência compressiva, tal como indicado no estudo de Parab e Zaveri (2020) e Aloyaydi et al. (2020). Em relação ao linear (L20) e o giroide (G20), o T20 expressou um pico de carregamento aproximadamente 8% superior, enquanto em 50% (T50) de preenchimento essa diferença aumentou para 18% em relação ao L50 e 25% ao G50. Contudo, percebe-se que nos ensaios com 80% o giroide reduziu a diferença e permaneceu com desempenho apenas 6% inferior, nota-se também o comportamento similar entre o linear e o giroide até a deformação mensurada.

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

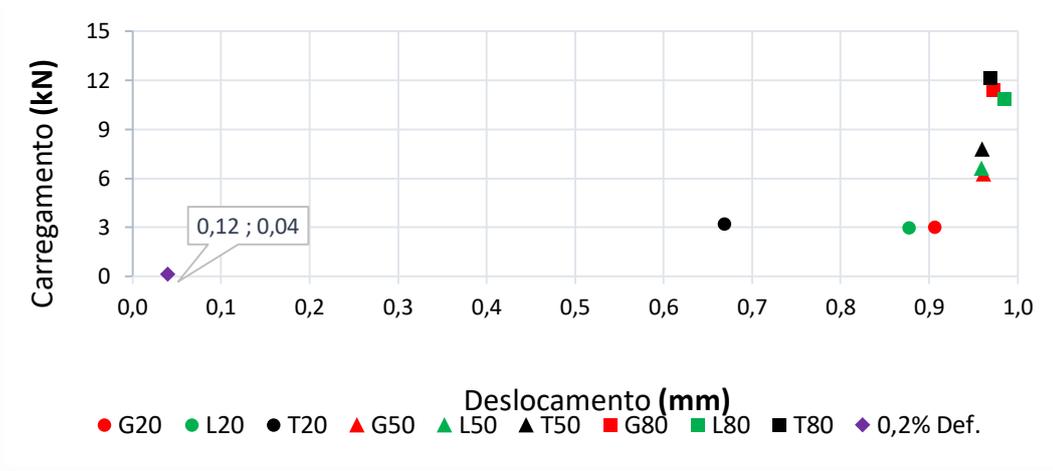


Figura 9. Comparação entre os grupos na direção da impressão (Pico de carregamento até 5% de deformação) (OS AUTORES)

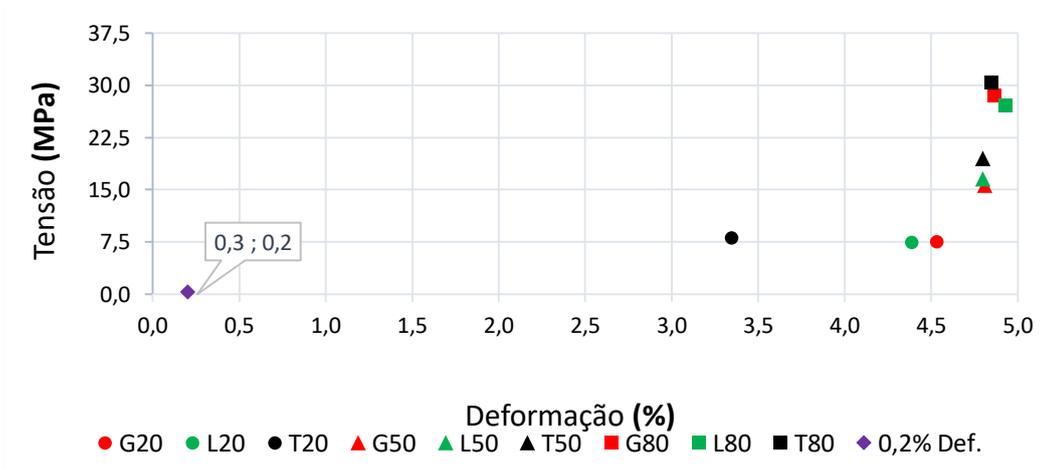


Figura 10. Comparação entre os grupos na direção da impressão (Pico de tensão até 5% da deformação) (OS AUTORES)

Observou-se entre os intervalos dos grupos que a região de 0,2% de deformação (losango na cor roxa, Fig. 9, 10, 11 e 12) exibiu valores próximos sendo possível indicar um valor médio para todos os tipos de preenchimentos analisados, atingindo 0,12 kN / 0,3 MPa (direção da impressão) e 0,11 kN / 0,27 MPa (90° da impressão).

Como indicado por Lovo e Fortulan (2016) os resultados no sentido perpendicular (Fig. 11 e 12) evidenciaram os efeitos anisotrópicos, onde o giroide distinguiu-se dos demais preenchimentos exibindo um comportamento homogêneo em ambas as direções. Todavia, percebe-se que na mudança de direção os outros preenchimentos sofreram uma queda considerável no desempenho.

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

Na etapa inicial com 20% a queda de desempenho foi minimizada sendo próximo de 5% no linear e 13% no triangular, porém nos outros grupos de ensaios apresentaram reduções expressivas atingindo valores com mais de 25% de redução.

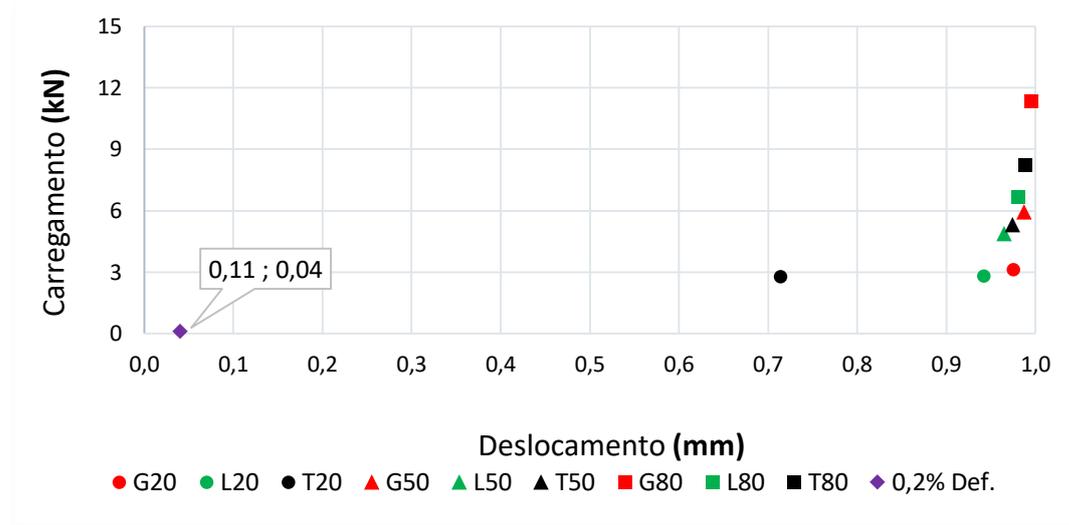


Figura 11. Comparação entre os grupos na direção perpendicular a impressão (Pico de carregamento até 5% deformação) (OS AUTORES)

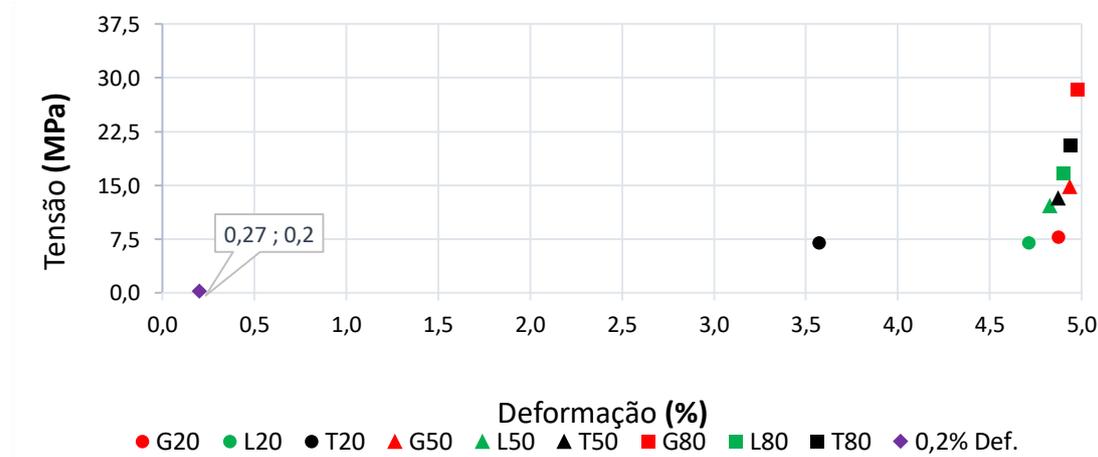


Figura 12. Comparação entre os grupos na direção perpendicular a impressão (Pico de tensão até 5% deformação) (OS AUTORES)

A Figura 13 demonstra a comparação direta em ambas as direções destacando os valores de pico de carregamento em contrapartida ao tipo e percentual de preenchimento, percebe-se claramente a proximidade de comportamento nas linhas do giroide (linhas em vermelho), as quais assemelham-se ao estudo de Silva (2019)

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

que evidencia a influência das estruturas giroides no desempenho compressivo independente da direção do carregamento. Em referência a massas aferidas, encontrou-se os valores médios por grupo sendo 3,9 gramas para 20% de preenchimento, 5,7 gramas (50%) e 7,8 gramas (80%).

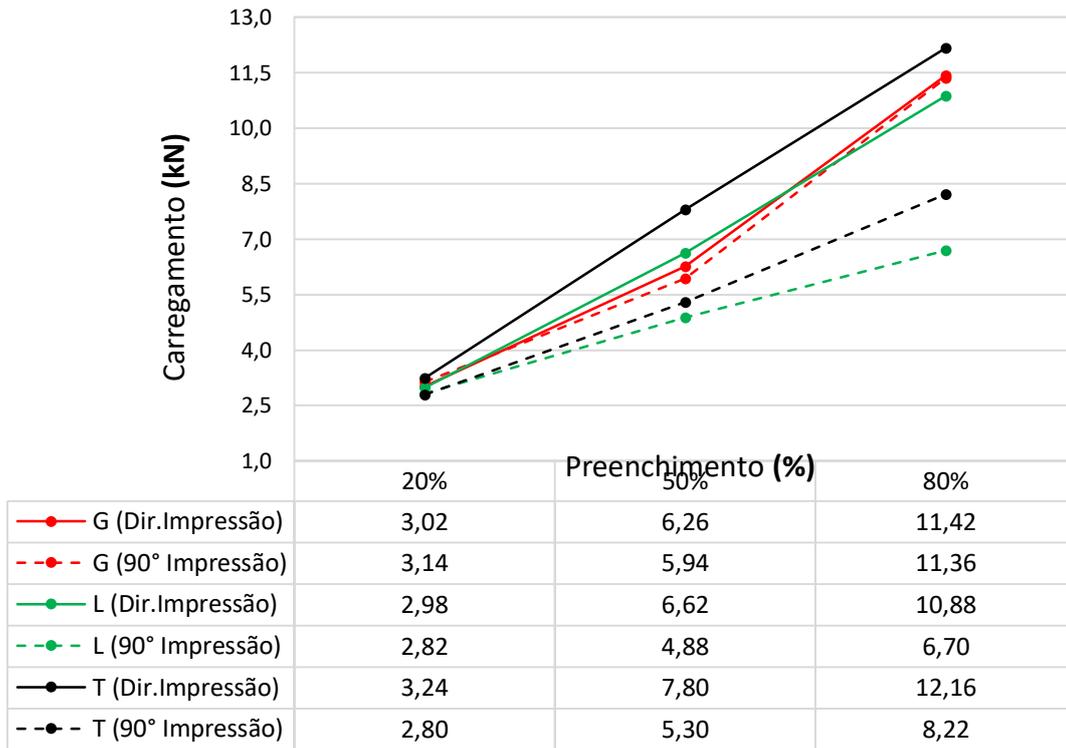


Figura 13. Comparação direta entre os grupos em ambas as direções (OS AUTORES)

A utilização de novas alternativas, métodos e conceitos tornam as empresas mais competitivas no seu mercado de atuação, do mesmo modo que aprimorar processos, produtos, reduzir custos e aumentar a qualidade. Logo, o tempo de impressão torna-se um critério interessante para analisar, pois detêm uma influência significativa no custo de impressão 3D, desse modo comparou-se o tipo de preenchimento em relação ao seu tempo de impressão (Fig. 14).

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

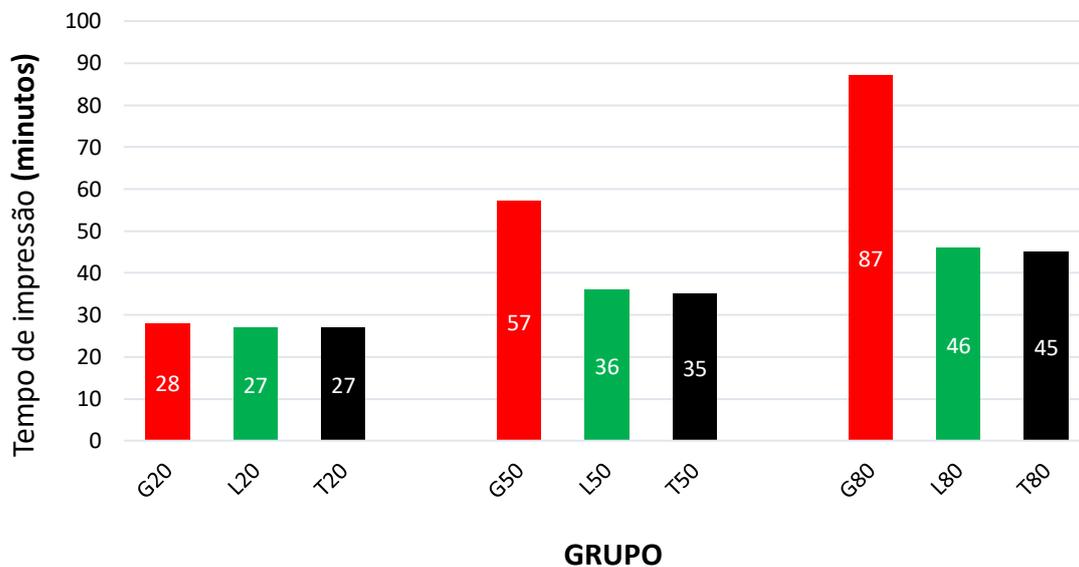


Figura 14. Comparativo entre os grupos e o tempo de impressão (OS AUTORES)

Identifica-se na Figura 14 os tempos de impressões por grupo para cada peça (Cubo 20 x 20 x 20 mm) em que o giroide atinge o maior tempo de impressão em todos os casos, no entanto em 20% de preenchimento a diferença é irrelevante, expressando somente cerca de 4%. Contudo, atentando-se aos preenchimentos subsequentes a distinção dos valores ultrapassa mais de 50%.

De acordo com o comportamento demonstrado nos corpos de prova comprovou-se que a resistência compressiva na direção da impressão é superior a perpendicular com exceção do giroide, o qual em ambas as direções expressou desempenho similar, com isso identifica-se e ressalta-se sua recomendação para aplicações onde as peças ou componentes sofram esforço em diferentes direções, por exemplo, engrenagens (que possuem uma força na direção centrípeta e outra tangencial) e aplicações em que não é viável a impressão no sentido da direção do carregamento, por exemplo, uma viga W (visto a quantidade excessiva de suportes gerados para execução da impressão 3D).

A Figura 15 ilustra os suportes criados para fabricação em azul claro, a letra (a) e (c) retratam a posição adequada em vista os carregamentos solicitados pelas peças, logo evidenciam a inviabilidade do processo por questões de tempo de impressão e remoção dos suportes pós-impressão. Dessa forma, a situação (b) e (d), mostram-se

vantajosas para a aplicação do giroide inclusive considerando a questão do tempo mencionado na Fig. 14.

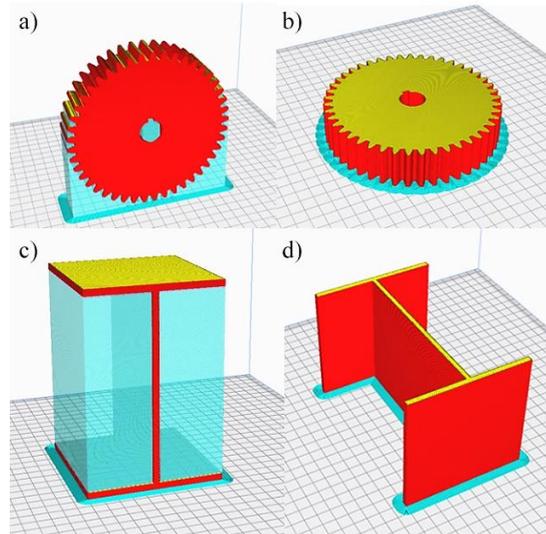


Figura 15. Exemplo de aplicações (OS AUTORES)

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou analisar, comparar e aplicar o giroide avaliando seu comportamento compressivo até 5% da deformação em relação aos critérios: pico de carregamento, efeito anisotrópico e tempo de impressão, logo permitem-se tirar as seguintes conclusões:

- O preenchimento triangular destacou-se perante o pico de carregamento no sentido da impressão somado ao menor tempo, mas teve seu desempenho reduzido na direção perpendicular a impressão em comparação ao giroide, constata-se que é importante aplicá-lo em situações estáticas nas quais a direção do carregamento é conhecida, por exemplo, uma coluna;
- Não foi evidenciada no estudo vantagem no uso do preenchimento linear, apesar de possuir o tempo de impressão equivalente ao triangular sua resistência apresentou-se inferior na maioria dos ensaios, somente em 20% de preenchimento no sentido perpendicular que o linear obteve um desempenho 0,7% superior ao triangular;
- O giroide evidenciou comportamento similar em ambas as direções com carregamento satisfatório comparando-se aos outros tipos de preenchimentos, de fato, recomenda-se para aplicações com carregamentos em diferentes

## Análise Compressiva Do Preenchimento Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

direções. Contudo, o giroide detêm uma adversidade em relação ao seu extenso tempo de impressão que é notável acima dos 20% de preenchimento.

Portanto, este estudo revelou a relevância do preenchimento giroide e também a importância na correta seleção do tipo de preenchimento, conhecimento muito relevante para engenheiros e projetistas da área de Engenharia Mecânica. Para complementar e aprofundar o estudo sobre o giroide pode-se sugerir a realização de trabalhos futuros comparando com outros materiais como o ABS e também em outros processos dentro da AM como a Fusão Seletiva a Laser (SLM), buscando a inserção de materiais metálicos e análise sobre o seu comportamento.

### 6. AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com ajuda de várias pessoas, dentre as quais agradeço:

Ao professor orientador, por todos os auxílios, solicitações e disposições necessárias para elaboração do trabalho;

Aos técnicos de laboratório do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF) dentro do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE), por terem auxiliado e a instituição pela disponibilização da infraestrutura para realização do estudo;

Aos doutores e mestres do curso de Engenharia Mecânica que contribuíram com seus ensinamentos para execução deste trabalho;

Aos meus pais, amigos e colegas de turma que incentivaram ou sugeriram melhorias durante este período;

Enfim, agradeço a mim por todas as horas de dedicação, vontade e perseverança visando desenvolvimento profissional e pessoal.

### 7. REFERÊNCIAS

AL-KETAN, Oraib; AL-RUB, Rashid K. Abu. Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices. **Advanced Engineering Materials**, [S.L.], v. 21, n. 10, p. 1900524, 20 ago. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201900524>.

ALOYAYDI, Bandar; SIVASANKARAN, Subbarayan; MUSTAFA, Ammar. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 87, p. 106557, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106557>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D695-15**: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken, 2015. 8p.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, v. 01, p. 9-18, 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharas/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 18 abr. 21.

BUERGER, Glauco. **IMPRESSÃO 3D COM ADIÇÃO DE GRAFITE DURANTE PROCESSO**. 2019. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, UNIFE, Brusque, 2019.

CAMPOS, Alexander Beuting. **FABRICAÇÃO ADITIVA MULTICOLOR UTILIZANDO SISTEMA DE CORES CMY**. 2019. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, UNIFE, Brusque, 2019.

DOWNING, David; JONES, Alistair; BRANDT, Milan; LEARY, Martin. Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution. **Materials & Design**, [S.L.], v. 197, p. 109096, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109096>.

GERMAIN, Loïc; FUENTES, Carlos A.; VAN VUURE, Aart W.; RIEUX, Anne Des; DUPONT-GILLAIN, Christine. 3D-printed biodegradable gyroid scaffolds for tissue engineering applications. **Materials & Design**, [S.L.], v. 151, p. 113-122, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.037>.

GOLDSCHMIDT, Benjamin. **The Best Cura Infill Pattern (for Your Needs)**. 2021. Disponível em: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>. Acesso em: 24 abr. 21.

GUERRA, Raphael Afonso. **Impressão 3D de conectores baseados em modelos matemáticos para aplicação em mobiliário**. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design Industrial e de Produto, FEUP, Porto, 2019. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/123558/2/363346.pdf>. Acesso em: 18 abr. 21.

HUSSMO, Jonatan; SCHRÖDER, Roman. **Experiments, analysis and an application of 3D-printed gyroid structures**. 2020. 70 f. Bachelor thesis in Mechanical Engineering, Örebro University, Örebro, 2020. Disponível em:

Análise Compressiva Do Preenchimento  
Giroide Em Peças Fabricadas Por Fdm

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1470388/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 18 abr. 21.

LEARY, Martin; YANG, Eric; LOZANOVSKI, Bill; DOWNING, David; MAZUR, Maciej; SARKER, Avik; KHORASANI, Amirmahyar; JONES, Alistair; MACONACHIE, Tobias; BATEMAN, Stuart. Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: a numerical study. **Materials & Design**, [S.L.], v. 184, p. 108165, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108165>.

LI, Dawei; LIAO, Wenhe; DAI, Ning; XIE, Yi Min. Comparison of Mechanical Properties and Energy Absorption of Sheet-Based and Strut-Based Gyroid Cellular Structures with Graded Densities. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 13, p. 2183, 7 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12132183>.

LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. **ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E ANISOTROPIA EM PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA TIPO FDM**. Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1. Ed. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MACONACHIE, Tobias; TINO, Rance; LOZANOVSKI, Bill; WATSON, Marcus; JONES, Alistair; PANDELIDI, Chrysoula; ALGHAMDI, Ahmad; ALMALKI, Abduladheem; DOWNING, David; BRANDT, Milan. The compressive behaviour of ABS gyroid lattice structures manufactured by fused deposition modelling. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 107, n. 11-12, p. 4449-4467, abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05239-4>.

MASKERY, I.; ABOULKHAIR, N.T.; AREMU, A.O.; TUCK, C.J.; ASHCROFT, I.A.. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 16, p. 24-29, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>.

MELCHELS, Ferry P.W.; BARRADAS, Ana M.C.; VAN BLITTERSWIJK, Clemens A.; BOER, Jan de; FEIJEN, Jan; GRIJPMA, Dirk W.. Effects of the architecture of tissue engineering scaffolds on cell seeding and culturing. **Acta Biomaterialia**, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 4208-4217, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2010.06.012>.

PARAB, Sanket; ZAVERI, Nilay. Investigating the Influence of Infill Pattern on the Compressive Strength of Fused Deposition Modelled PLA Parts. **Proceedings Of International Conference On Intelligent Manufacturing And Automation**, [S.L.], p. 239-247, 2020. Springer Singapore. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4485-9\\_25](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4485-9_25).

PELANCONI, Marco; ORTONA, Alberto. Nature-Inspired, Ultra-Lightweight Structures with Gyroid Cores Produced by Additive Manufacturing and Reinforced by

Unidirectional Carbon Fiber Ribs. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 24, p. 4134, 10 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12244134>.

SILVA, Catarina. **3D printing of gyroid structures for superior structural behaviour**. 2019. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Feup, Porto, 2019.

STAN, Alexandru; MILODIN, Nichita Larisa. ROBOTIC ARM STRUCTURAL FRAME ENHANCEMENT BY GYROID LATTICE CUBE INTEGRATION. **International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics**, [S.L.], v. 2, n. 8, nov. 2020. INCDMTM. <http://dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue8.33>.

WANG, Jidong; ZHAO, Ruibin; PANG, Mingyong. Modeling Single-Gyroid Structures in Surface Mesh Models for 3D Printing. **International Conference On Cyberworlds (CW)**, [S.L.], p. 1-8, out. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cw.2018.00015>.

WINTER, Benjamin; BUTZ, Benjamin; DIEKER, Christel; SCHRÖDER-TURK, Gerd E.; MECKE, Klaus; SPIECKER, Erdmann. Coexistence of both gyroid chiralities in individual butterfly wing scales of *Callophrys rubi*. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 112, n. 42, p. 12911-12916, 5 out. 2015. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1511354112>.

YANG, Lei; YAN, Chunze; CAO, Wenchao; LIU, Zhufeng; SONG, Bo; WEN, Shifeng; ZHANG, Cong; SHI, Yusheng; YANG, Shoufeng. Compression–compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 181, p. 49-66, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.042>.