



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

VINÍCIUS GONÇALVES DIAS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
ARQUITETADOS REFORÇADOS POR ESTRUTURAS CELULARES DE
MANUFATURA ADITIVA: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO À FLEXÃO**

JUAZEIRO DO NORTE

2026

VINÍCIUS GONÇALVES DIAS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
ARQUITETADOS REFORÇADOS POR ESTRUTURAS CELULARES DE
MANUFATURA ADITIVA: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO À FLEXÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Cariri – UFCA, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Bruno Almeida
Bezerra;

JUAZEIRO DO NORTE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

D541d Dias, Vinícius Gonçalves.

Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos arquitetados reforçados por estruturas celulares de manufatura aditiva: influência da geometria no comportamento mecânico à flexão/ Vinícius Gonçalves Dias. – 2026.

57 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Bruno Almeida Bezerra.

1. Compósitos poliméricos. 2. Manufatura aditiva. 3. Estruturas arquitetadas. 4. Honeycomb.
5. Giroide. 6. Propriedades mecânicas. I. Bezerra, Wendell Bruno Almeida (Orient.).
II. Universidade Federal do Cariri. III. Título.

CDD 620.118

VINÍCIUS GONÇALVES DIAS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
ARQUITETADOS REFORÇADOS POR ESTRUTURAS CELULARES DE
MANUFATURA ADITIVA: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO À FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Cariri – UFCA, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 13/08/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wendell Bruno Almeida Bezerra – UFCA
Orientador

Prof. Dr. André Wesley Barbosa Rodrigues – UFCA
Avaliador

Ms. Daniel Bernardes Silva – UFCA
Avaliador

JUAZEIRO DO NORTE, __ DE ____ DE 2026

“Diante do infinito, somos apenas um pálido ponto azul.”

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por encontra-lo nos momentos de maior alegria e de maior tristeza. Tornando todos os momentos oportunos para aprendizado, pessoal e profissional.

À minha base que é minha família, minha mãe Cícera, meu pai Djalma, minhas irmãs Viviane e Vanessa e em especial a minha avó Josefa que sempre se fez clara na quantidade de amor depositada sobre seus netos. Eles são o motivo da minha persistência em nos maiores momentos de dificuldade, e onde encontro força para levantar a cabeça e enfrentar o mundo todos os dias.

Ao professor Wendell por ter aceitado o desafio de ser meu orientador e ajudar a construir um trabalho em tão pouco tempo, mas que foi de suma importância na minha vida. Além de ser uma referência acadêmica uma inspiração para quem eu me desejo tornar um dia.

Ao professor Diego que foi meu primeiro contato dentro do mundo da pesquisa acadêmica e ajudou a direcionar o destino da minha vida academia. Com o contato inicial da pesquisa senti que de fato estava definindo a posição que gostaria de passar anos da minha vida.

Aos grandes amigos e companheiros de turma Geazi, Yan, Karina, Mateus, que estiveram presente ao longo da minha jornada acadêmica em diversos momentos. Sem eles esses anos teriam sido simplesmente sem graça. Antes de entrar na graduação, me encontrava totalmente perdido e sem percepção nenhuma de que as coisas iriam melhorar. E logo então eu os me vi cercado de pessoas que gostaria de estar presente até o final da minha vida. Geazi, por sempre se importar em como os amigos estão no momento e trazer alegria em todos os momentos, um amigo que sempre se fez presente nas conquistas dos outros e faz questão de reconhecer que aquilo é merecido. Yan, por todos os conselhos que pude ouvir em varias conversas nesses anos, quando me encontrava perdido ou distante da realidade. Karina, por sempre trazer sua sinceridade em nossas conversas e também por me lembrar que é preciso aproveitar os poucos momentos de descanso entre trabalho e faculdade. Mateus, pelos breves momentos de risada e por me apoiar em todas as minhas decisões, orientando da melhor forma mas sempre lembrando das possíveis consequências.

Aos meus amigos ao longo da jornada acadêmica, Emanuel, Bruno, Alan, Gustavo, Marcelo, Carlos, Igor, João Bosco, Lillian, Fellype, Isac, Juliana, e muitos outros não foram mencionados que os encontrei e estiveram presentes na minha jornada acadêmica e compartilharam vários momentos de alegria e risada que diminuía a carga do cansaço do dia a dia e contribuíram para me tornar quem sou hoje. Em especial a Natasha, a quem sempre me falava com ênfase sobre todas as questões da vida, passando por conselhos, puxão de orelha

quando era devido, gargalhadas e também por ser uma mulher incrível que me ajudou tanto com inspiração acadêmica quanto a minha vida pessoal.

A todo o corpo docente de professores e de técnicos que me ajudaram na minha vida acadêmica a percorrer o título de Engenheiro, e por me ajudarem a nunca desistir.

À Universidade Federal do Cariri (UFCA) e ao Centro de Ciência e Tecnologia, por fornecerem o ambiente necessário para a minha formação acadêmica.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho voltado ao desenvolvimento de tecnologia de materiais aplicada a compósitos.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização	10
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivo geral.....	13
1.4 Objetivos específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Compósitos.....	14
2.2 Resinas epóxi	17
2.3 Manufatura aditiva	18
2.4 Estruturas <i>lattice</i> e geometrias TPMS.....	21
2.5 Comportamento mecânico em flexão	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Procedimento experimental.....	29
3.2 Materiais utilizados	30
3.2.1 Silicone (Redelease).....	30
3.2.2 Resina epóxi Redelease 2004 e endurecedor Redelease 3154.....	31
3.2.3 Filamento ABS 3DFila.....	32
3.2.4 Desmoldante.....	33
3.2.5 Máquina de impressão Creality K1C	33
3.2.6 Máquina universal de ensaios Oswaldo Filizola.....	34
3.3 Modelagem CAD dos reforços	35
3.3.1 <i>Honeycomb</i>	36
3.3.2 Giroide	36
3.4 Fabricação dos compósitos	37
3.5 Ensaio mecânico de flexão.....	39
3.5.1 Configuração do ensaio.....	39
3.5.2 Parâmetros avaliados.....	40
3.5.3 Equações utilizadas	41
3.6 Tratamento estatístico	42
3.6.1 Análise estatística descritiva	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Análise das curvas força × deslocamento	43
4.2 Tensão máxima e módulo de elasticidade em flexão	48
4.3 Avaliação estatística	51
5. CONCLUSÃO	53
6. REFERÊNCIAS.....	55

RESUMO

A busca por materiais estruturais com elevada eficiência mecânica e redução de massa tem impulsionado o desenvolvimento de compósitos poliméricos com arquiteturas internas controladas. Nesse contexto, a manufatura aditiva possibilita a fabricação de estruturas internas com elevada liberdade geométrica, permitindo investigar a arquitetura como uma variável de projeto capaz de modificar a resposta mecânica do material. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar compósitos poliméricos constituídos por matriz de resina epóxi e estruturas internas arquitetadas produzidas por manufatura aditiva, avaliando a influência da geometria e da orientação sobre o comportamento mecânico. Foram investigadas estruturas do tipo *honeycomb* e giroide, produzidas em ABS e incorporadas à matriz polimérica em diferentes configurações. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de ensaios de flexão em três pontos, conforme a ASTM D790, considerando a carga máxima suportada e o módulo de elasticidade em flexão. Os resultados foram comparados entre a resina sem reforço e os diferentes sistemas contendo estruturas arquitetadas, buscando identificar a influência da geometria e da orientação sobre a capacidade de transferência de carga. Também foi realizada análise estatística dos resultados, considerando medidas de dispersão e análise de variância, de modo a verificar a significância das diferenças observadas entre os grupos experimentais. A análise dos resultados evidenciou que a introdução das estruturas arquitetadas não produziu necessariamente aumento da resistência máxima em relação à matriz de resina, demonstrando que a presença do reforço deve ser analisada considerando sua interação com a matriz e sua configuração geométrica. Entre as estruturas avaliadas, a arquitetura giroide apresentou comportamento mecânico distinto do *honeycomb*, evidenciando a influência da geometria na resposta do compósito. A orientação das estruturas também apresentou efeito relevante sobre o desempenho mecânico. Dessa forma, o estudo demonstra que a arquitetura interna constitui uma variável importante no desenvolvimento de compósitos poliméricos produzidos por manufatura aditiva, contribuindo para a compreensão da relação entre configuração geométrica, orientação e comportamento mecânico e fornecendo subsídios para futuras aplicações de materiais arquitetados em componentes estruturais.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos. Manufatura aditiva. Estruturas arquitetadas. *Honeycomb*. Giroide. Propriedades mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O desenvolvimento de materiais para aplicações de engenharia tem sido acompanhado pela busca por soluções capazes de conciliar diferentes requisitos de desempenho, como resistência mecânica, rigidez, baixo peso e eficiência no uso de matéria-prima. Em muitos sistemas estruturais, o aumento da quantidade de material não representa objetivamente uma solução mais eficiente, uma vez que o desempenho pode estar relacionado à forma como o material é distribuído e à maneira como essa distribuição influencia a transferência dos esforços. Nesse contexto, o projeto da arquitetura interna de um componente passa a constituir uma importante estratégia para o desenvolvimento de materiais com propriedades ajustadas às solicitações às quais estarão submetidos (GIBSON; ASHBY, 1997).

Essa proposta está diretamente relacionada ao conceito de **estruturas geométricas**, nas quais a presença de vazios e elementos sólidos organizados segundo determinada geometria permite modificar a resposta mecânica do material. Gibson e Ashby (1997) demonstram que propriedades como rigidez e resistência dessas estruturas não dependem somente das propriedades do material constituinte, mas também de parâmetros estruturais. Dessa forma, duas estruturas produzidas com o mesmo material podem apresentar comportamentos distintos quando organizadas segundo arquiteturas diferentes.

A possibilidade de controlar geometricamente a distribuição do material tornou-se particularmente relevante com o avanço das técnicas de manufatura aditiva. Diferentemente de processos convencionais de fabricação, a manufatura aditiva permite projetar e desenvolver componentes a partir de modelos digitais, possibilitando maior liberdade na concepção de estruturas internas. Essa característica permite deslocar parte da etapa de desenvolvimento de materiais para o próprio projeto geométrico do componente, criando sistemas nos quais a arquitetura pode ser utilizada como uma variável de projeto.

Nesse cenário, surgem as chamadas **estruturas arquitetadas**, que podem ser projetadas para controlar a distribuição de massa e os caminhos preferenciais de transferência de carga. Entre essas estruturas encontram-se as estruturas reticuladas (*lattice structures*) e as arquiteturas baseadas em superfícies mínimas periódicas tridimensionais (*Triply Periodic Minimal Surfaces* – TPMS). Essas configurações despertam interesse porque permitem explorar diferentes mecanismos de deformação e distribuição de tensões sem que seja necessário alterar necessariamente a composição química do material utilizado. Maskery et al. (2018), por exemplo, demonstraram que diferentes arquiteturas TPMS produzidas por manufatura aditiva

apresentam respostas mecânicas distintas, evidenciando a importância da geometria no comportamento de estruturas poliméricas.

A utilização dessas arquiteturas em associação com materiais poliméricos amplia ainda mais as possibilidades de projeto. Em um material compósito, a matriz e o reforço não atuam de maneira independente: o desempenho global depende da transferência de esforços entre as fases e da interação existente entre os constituintes. Dessa maneira, a arquitetura interna pode atuar como um elemento adicional de controle das propriedades do material, introduzindo uma dimensão geométrica ao projeto que se soma às características intrínsecas dos materiais empregados.

Essa possibilidade apresenta particular interesse para materiais poliméricos, uma vez que polímeros e compósitos poliméricos apresentam ampla utilização em aplicações nas quais a redução de massa e a adequação das propriedades mecânicas são relevantes. Entretanto, a introdução de uma estrutura interna também modifica a continuidade da matriz e cria interfaces e regiões de interação entre diferentes materiais. Consequentemente, a resposta mecânica de um compósito arquitetado pode resultar de uma combinação entre as propriedades dos constituintes, a geometria interna e os mecanismos de transferência de carga e de falha.

A interface entre os componentes constitui, portanto, um aspecto particularmente importante. Em materiais compósitos, a eficiência da transferência de esforços depende da interação entre matriz e reforço, de modo que alterações nessa região podem modificar significativamente a resposta do material sob carregamento (LEVY NETO; PARDINI, 2016). Em estruturas arquitetadas, essa questão ganha complexidade porque a interface não se encontra apenas em uma superfície plana ou convencional, mas acompanha uma geometria tridimensional que pode apresentar diferentes regiões de contato, mudanças de direção e diferentes caminhos para a transferência dos esforços.

A investigação dessa relação entre **arquitetura e comportamento mecânico** apresenta importância tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico. Do ponto de vista científico, compreender como a geometria interfere na resposta do material contribui para estabelecer relações entre parâmetros estruturais e propriedades macroscópicas. Do ponto de vista tecnológico, esse conhecimento pode permitir o desenvolvimento de componentes nos quais a distribuição de material seja definida de acordo com a função estrutural desejada, evitando abordagens baseadas exclusivamente no aumento da quantidade de matéria.

Na indústria aeroespacial, por exemplo, estruturas leves são de interesse devido à necessidade de reduzir massa sem comprometer requisitos estruturais. Na indústria automotiva, a utilização racional de materiais pode contribuir para o desenvolvimento de componentes mais

leves e eficientes. Da mesma forma, em sistemas destinados à proteção contra impactos, a possibilidade de controlar a deformação e a dissipação de energia por meio da arquitetura interna pode representar uma estratégia para o desenvolvimento de soluções com desempenho ajustável.

Apesar desse potencial, a utilização de estruturas arquitetadas exige uma compreensão adequada dos mecanismos responsáveis pelo seu comportamento. A existência de uma geometria interna otimizada do ponto de vista estrutural não garante, isoladamente, uma melhoria das propriedades do material. A resposta final depende da interação entre **material, arquitetura, orientação, interface e condições de carregamento**, tornando necessária uma abordagem experimental capaz de relacionar as características estruturais às propriedades mecânicas observadas.

Dessa forma, o estudo de materiais compósitos contendo estruturas internas arquitetadas produzidas por manufatura aditiva se insere em uma abordagem contemporânea de desenvolvimento de materiais, na qual a geometria deixa de ser apenas uma característica dimensional do componente e passa a atuar como uma variável de projeto das propriedades mecânicas. A compreensão dessa relação pode contribuir para o desenvolvimento de materiais com propriedades direcionadas à aplicação, bem como para o estabelecimento de critérios mais eficientes para a seleção e o projeto de arquiteturas internas.

É nesse contexto que se insere o presente trabalho, direcionado à investigação da influência de diferentes arquiteturas internas sobre o comportamento mecânico de compósitos poliméricos. A partir da comparação entre diferentes configurações geométricas e orientações, busca-se contribuir para a compreensão da relação entre **arquitetura interna, transferência de carga e desempenho mecânico**, fornecendo subsídios para o desenvolvimento futuro de materiais arquitetados produzidos por manufatura aditiva.

1.2 Justificativa

A relevância deste estudo está relacionada à necessidade de ampliar a compreensão sobre o papel desempenhado pela arquitetura interna no comportamento de materiais compósitos produzidos por manufatura aditiva. Embora a liberdade geométrica proporcionada por essa tecnologia permita projetar estruturas com diferentes configurações, a escolha de uma determinada arquitetura não pode ser baseada exclusivamente em critérios geométricos ou de facilidade de fabricação. É necessário compreender como essa escolha interfere na transferência de esforços, na rigidez, na resistência e nos mecanismos de falha.

A investigação de diferentes arquiteturas também permite explorar uma abordagem de

desenvolvimento de materiais na qual a otimização não ocorre somente pela seleção da composição, mas pela **combinação entre composição e projeto estrutural**. Essa perspectiva pode contribuir para a obtenção de soluções mais eficientes em aplicações que demandem controle da relação entre massa e desempenho mecânico.

Além disso, a comparação entre arquiteturas com características geométricas distintas pode fornecer informações relevantes para compreender os mecanismos responsáveis pelo comportamento desses materiais e estabelecer critérios para futuras aplicações. Assim, o estudo apresenta potencial para contribuir tanto para o conhecimento científico relacionado a materiais arquitetados quanto para o desenvolvimento de novas estratégias de projeto de componentes poliméricos produzidos por manufatura aditiva.

1.3 Objetivo geral

Avaliar a influência da arquitetura interna de estruturas produzidas por manufatura aditiva sobre o comportamento mecânico de compósitos poliméricos, estabelecendo relações entre a configuração geométrica, a orientação e o desempenho estrutural do material.

1.4 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- investigar a influência de diferentes arquiteturas internas sobre o comportamento mecânico dos compósitos;
- comparar o desempenho de diferentes configurações geométricas de estruturas arquitetadas;
- avaliar a influência da orientação das estruturas em relação à direção do carregamento;
- determinar e comparar propriedades mecânicas dos diferentes sistemas estudados;
- avaliar a variabilidade dos resultados experimentais por meio de análise estatística;
- Identificar configurações arquitetadas com potencial para aplicações estruturais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos

A definição de materiais compósitos varia conforme o autor que a formula ou a reproduz. Entretanto, apesar das diferenças de abordagem, todas as definições compartilham elementos fundamentais que convergem para um mesmo conceito. Nesse contexto, William D. Callister Jr., no livro *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*, apresenta a seguinte definição geral:

De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, de modo que é obtida melhor combinação de propriedades.
(Callister, 2016, p. 582)

Conforme essa definição, a principal característica dos materiais compósitos reside na combinação de diferentes fases, permitindo integrar as propriedades específicas de cada constituinte em um único material. Como resultado, obtêm-se propriedades mecânicas, físicas ou químicas superiores às que seriam alcançadas pelos materiais empregados isoladamente, de acordo com o princípio da ação combinada (CALLISTER, 2016).

Como estrutura geral, esses materiais são constituídos por uma fase contínua, denominada matriz, e uma fase dispersa, conhecida como reforço (figura 1), responsável por modificar o comportamento mecânico, térmico ou estrutural do sistema.

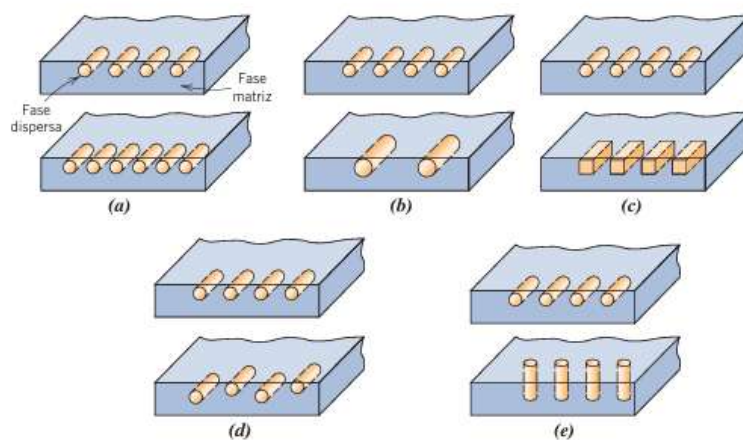


Figura 1. Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: a) concentração, b) tamanho, c) forma, d) distribuição e (e) orientação. **Fonte:** CALLISTER (2016).

A matriz desempenha sua função quanto a integridade estrutural do compósito, sendo responsável pela transferência e distribuição dos esforços mecânicos aplicados ao material, além de atuar na proteção do reforço contra agentes externos e danos mecânicos e manter a estabilidade geométrica do compósito (NETO E PARDINI, 2016). Na classe de compósitos poliméricos, entre os materiais mais utilizados como matriz, destacam-se as resinas termorrígidas, especialmente as resinas epóxi, devido à elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional, baixa retração durante a cura e elevada adesão interfacial. A matriz também influencia diretamente propriedades pertinentes ao produto final como rigidez, tenacidade e comportamento sob carregamentos cíclicos (CALLISTER, 2016).

O reforço é o componente do compósito responsável por suportar a maior parte dos esforços mecânicos, promovendo o aumento da resistência, da rigidez e, em muitos casos, da tenacidade do material. Em compósitos poliméricos, os reforços são tradicionalmente constituídos por fibras contínuas, fibras descontínuas ou partículas, sendo sua escolha determinada pelas propriedades mecânicas desejadas e pelas exigências da aplicação (CALLISTER, 2016; NETO E PARDINI, 2016). Além da natureza do material utilizado como reforço, sua geometria, distribuição e interação com a matriz exercem influência direta na transferência de cargas e, conseqüentemente, no desempenho mecânico do compósito (BARBERO, 2023).

Além das propriedades individuais da matriz e do reforço, a região interfacial entre ambos desempenha papel decisivo no desempenho estrutural do compósito. A interface é responsável pela transferência de carga entre as fases constituintes, sendo diretamente influenciada pela adesão mecânica e química estabelecida entre os materiais. Em compósitos reforçados com fibra, de acordo com Callister (2016), a intensidade dessa ligação interfacial entre a matriz e reforço determina o grau da transferência da carga aplicada. Uma interface inadequada pode favorecer mecanismos de falha prematura como delaminação (Figura 2), descolamento interfacial e propagação de trincas, comprometendo o comportamento mecânico global da estrutura.

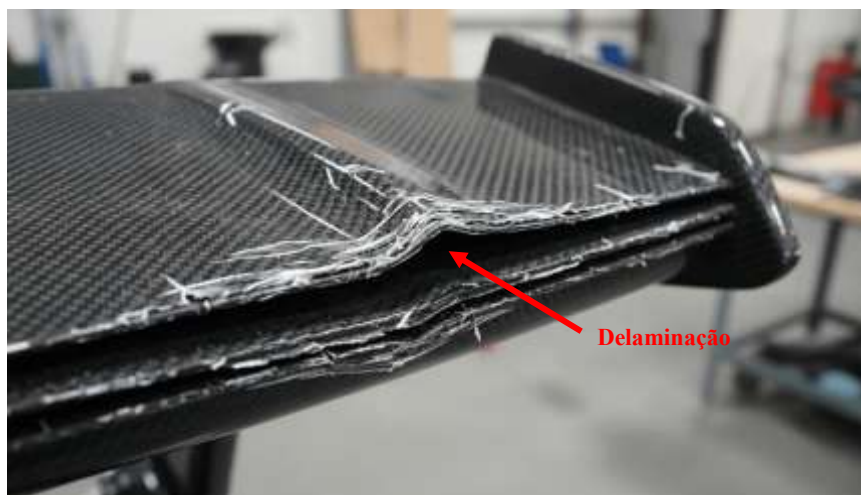


Figura 2. Sinais de delaminação em peças de fibra de carbono. **Fonte:** Adaptada de SUPREEM CARBON (2025).

Dessa forma, através da teoria da adesão, fatores como compatibilidade química, adesão mecânica por rugosidade, atração eletrostática tornam-se parâmetros relevantes no desenvolvimento de compósitos com maior eficiência estrutural, como é mostrado na Figura 3 abaixo:

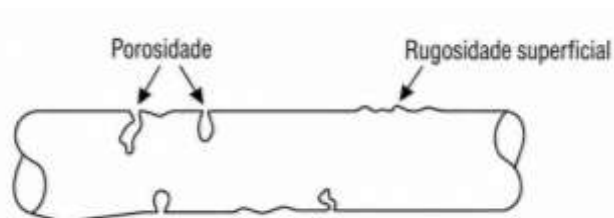


Figura 3. Representação esquemática da superfície de uma fibra de reforço. **Fonte:** NETO E PARDINI (2016).

As propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos dependem diretamente da interação entre o sistema matriz, reforço e interface, além da geometria e distribuição espacial do elemento de reforço. Entre as principais propriedades destacam-se resistência mecânica, módulo de elasticidade e tenacidade, onde revelam os valores fundamentais determinantes na escolha do compósito. Em aplicações estruturais submetidas à flexão, a arquitetura interna do compósito influencia de maneira significativa a distribuição de tensões e os mecanismos de falha, podendo resultar em comportamentos distintos mesmo para materiais produzidos com a mesma fração volumétrica de reforço, como demonstram os estudos de Alberto, Anflor e Santanna (2023).

Nos estudos mais recentes, a utilização de estruturas internas produzidas por impressão

3D vem ampliando as possibilidades de otimização mecânica de compósitos poliméricos, permitindo o desenvolvimento de materiais mais leves, resistentes e com desempenho estrutural ajustável conforme a aplicação desejada, como reportado por Lambiase, Pace e Andreucci (2025).

2.2 Resinas epóxi

As resinas epóxi constituem uma das classes de polímeros termorrígidos mais utilizadas na engenharia, principalmente devido suas elevadas propriedades mecânicas, excelente adesão a diferentes substratos, estabilidade dimensional e resistência química. Com essa combinação de características, esses materiais são muito empregados na fabricação de compósitos estruturais, revestimentos, adesivos e componentes utilizados em setores como aeroespacial, automotivo, transporte e de construção civil (NETO E PARDINI, 2016).

Como explicado por Neto e Pardini (2016), do ponto de vista estrutural, as resinas epóxi são formadas por moléculas que contêm grupos epóxi, também conhecidos como grupos oxirano, caracterizados por um anel de três membros composto por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono (Figura 4):

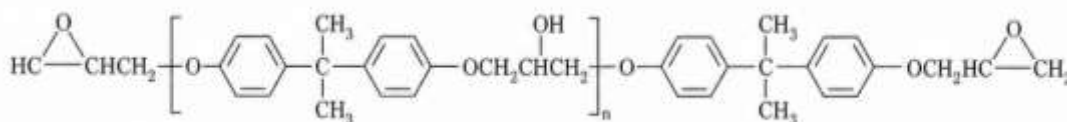


Figura 4. Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A. **Fonte:** NETO E PARDINI (2016)

Esses grupos funcionais apresentam elevada reatividade química, possibilitando a formação de ligações cruzadas quando submetidos à reação com agentes de cura apropriados. A estrutura molecular resultante após a cura apresenta uma rede tridimensional altamente reticulada, responsável pelas propriedades mecânicas e térmicas características desses materiais.

O processo de cura corresponde à transformação da resina líquida em uma estrutura sólida por meio de reações químicas entre a resina base e um endurecedor. Durante essa etapa ocorre a formação progressiva de ligações covalentes entre as cadeias poliméricas, gerando um aumento da massa molecular e da densidade de reticulação do sistema. A extensão da cura influencia diretamente as propriedades finais do material, uma vez que parâmetros como temperatura, tempo de reação, proporção entre resina e endurecedor e condições ambientais afetam a formação da rede polimérica e, consequentemente, o desempenho mecânico do

compósito (MARGEM et al., 2022; ALBERTO, ANFLOR E SANTANNA, 2023). Quando adequadamente processados, sistemas epóxi apresentam elevada estabilidade dimensional, boa resistência mecânica, excelente adesão aos elementos de reforço e baixa retração volumétrica durante a solidificação, características que justificam sua ampla utilização como matriz em compósitos estruturais (ALBERTO, ANFLOR E SANTANNA, 2023; DEL PINO et al., 2025).

As propriedades mecânicas ótimas da resina epóxi estão intimamente relacionadas ao elevado grau de reticulação obtido após a cura. Em geral, esses materiais apresentam elevados valores de módulo de elasticidade entre 2,5 a 6 GPa, resistência à tração variando entre 40 a 90 MPa, resistência à compressão com valores entre 100 a 220 MPa e resistência à flexão quando comparados a diversos outros polímeros (NETO E PARDINI, 2016). Além disso, possuem boa resistência ao desgaste, baixa fluência sob carregamentos prolongados e excelente estabilidade dimensional. Entretanto, devido à elevada rigidez da estrutura reticulada, as resinas epóxi tendem a apresentar comportamento relativamente frágil quando submetidas a impactos ou elevadas concentrações de tensão, o que frequentemente motiva sua associação a materiais de reforço para melhoria do desempenho estrutural.

Em sistemas compósitos, a matriz epóxi desempenha função fundamental na transferência de esforços mecânicos para o reforço, garantindo a integridade estrutural do conjunto. A eficiência dessa transferência depende da adesão estabelecida entre as fases constituintes, sendo as resinas epóxi particularmente reconhecidas por sua capacidade de formar interfaces estáveis com uma ampla variedade de materiais, o que confere característica principal na transmissão dos esforços e no desempenho mecânico do compósito. Esse comportamento é exemplificado por Alberto, Anflor e Santanna (2023), onde foram produzidos compósitos estruturais do tipo sanduíche com sistema de resina epóxi com carbono, buscando um aumento do comportamento mecânico equiparável a materiais produzidos por manufatura aditiva metálica.

2.3 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (abreviada como AM do inglês) compreende um conjunto de processos de fabricação, caracterizados pela construção de componentes tridimensionais por meio da adição sucessiva de material em camadas (VOLPATO, 2016). Diferentemente dos métodos convencionais de manufatura subtrativa, nos quais a geometria final é obtida pela remoção de material (semelhante aos processos de usinagem em metais), a manufatura aditiva possibilita a produção de peças com elevada complexidade geométrica, menor desperdício de matéria-prima e maior liberdade de projeto. Nas últimas décadas, a manufatura aditiva tem

apresentado um crescimento expressivo em aplicações industriais e científicas, impulsionado pela crescente demanda por componentes personalizados, pela redução do tempo de desenvolvimento de produtos e pela possibilidade de fabricação de geometrias complexas que seriam de difícil ou impossível obtenção por processos convencionais de manufatura (ISO; ASTM INTERNATIONAL, 2021; OLIVEIRA et al., 2023). Além disso, a capacidade de produzir estruturas celulares e arquiteturas tridimensionais com elevado controle geométrico ampliou sua aplicação no desenvolvimento de componentes leves e de alto desempenho mecânico, especialmente em áreas como engenharia de materiais, aeroespacial, biomédica e automotiva (ZHENG et al., 2014; YU, SUN E BAI, 2019; GOHAR et al., 2023).

Com o avanço de diversas tecnologias baseadas em manufatura aditiva, houve a necessidade de classificá-las para melhor identificação das tecnologias. Na norma ISO/ASTM 52900:2021 o processo de AM foi classificado em sete categorias e, entre as diversas tecnologias desenvolvidas, a Modelagem por Deposição Fundida (Fused Deposition Modeling – FDM) está entre as mais difundidas devido ao seu baixo custo operacional e facilidade de utilização o que permite diversas utilizações tanto no mercado quanto em pesquisas. Nesse processo (figura 5), um filamento termoplástico é alimentado continuamente para um bico aquecido, onde é fundido e depositado camada por camada sobre uma plataforma de fabricação. A deposição segue trajetórias previamente definidas por um software de fatiamento, permitindo a construção gradual da geometria tridimensional desejada.

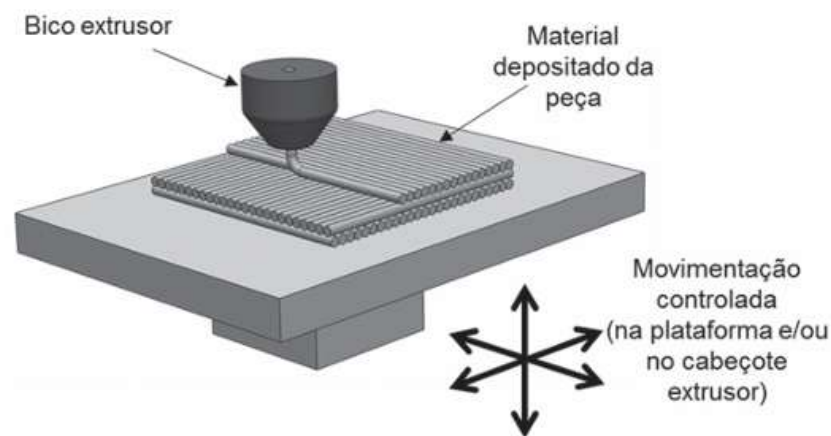


Figura 5. Princípio da tecnologia de Manufatura aditiva por extrusão de material. **Fonte:** VOLPATO (2016).

O processo FDM é bastante versátil na produção de componentes estruturais, protótipos funcionais e arquiteturas internas complexas, incluindo estruturas e geometrias periódicas utilizadas em aplicações de engenharia.

A possibilidade de controlar a distribuição interna de material por meio da estratégia de preenchimento, assim como de parâmetros como orientação de deposição, densidade de preenchimento e espessura das paredes, permite a obtenção de componentes com diferentes combinações de massa, rigidez e resistência mecânica. Dessa forma, o processo de FDM se torna atrativo para o desenvolvimento de estruturas otimizadas, nas quais a arquitetura interna exerce papel fundamental no desempenho mecânico do componente (FORTULAN et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2023; SUKUMAAR et al., 2025).

O desempenho final das peças produzidas por FDM é fortemente influenciado pelos parâmetros de impressão adotados durante o processo de fabricação, como estudado por Oliveira et al (2023). Entre os principais parâmetros se destacam a temperatura de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão, a largura do cordão depositado, o número de perímetros, a orientação de fabricação e a densidade de preenchimento. Essas variáveis afetam diretamente a adesão entre camadas, a qualidade superficial, a precisão dimensional, o que afeta diretamente as propriedades mecânicas do componente final. Devido a essa influência, a adequada seleção e controle dos parâmetros de processamento são necessários para garantir a reprodutibilidade dos processos e desempenho estrutural satisfatório.

Uma característica inerente aos componentes produzidos por FDM é a anisotropia mecânica. Esse comportamento acontece devido a natureza camada por camada do processo, na qual a união entre filamentos adjacentes e entre camadas consecutivas ocorre por difusão térmica e adesão parcial do material fundido. Como mostrado no estudo de Lovo e Fortulan (2016), na qual foram estudados os efeitos da anisotropia em corpos fabricados por FDM, os resultados experimentais indicaram que a orientação de deposição $[0^\circ/90^\circ]$ (Figura 6) proporcionou aos corpos de prova maior resistência mecânica e maior rigidez em comparação às demais configurações analisadas. Por outro lado, a orientação $[0^\circ]$ resultou nos menores valores dessas propriedades. Sendo assim, as propriedades mecânicas variam em função da direção de aplicação da carga, sendo comum observar maior resistência e rigidez ao longo das direções paralelas aos filamentos depositados e menor desempenho nas regiões sujeitas a esforços perpendiculares às interfaces entre camadas.

A anisotropia também influencia os mecanismos de falha observados em peças impressas, podendo favorecer a delaminação entre camadas, a propagação preferencial de trincas e a concentração de tensões em determinadas regiões da estrutura.

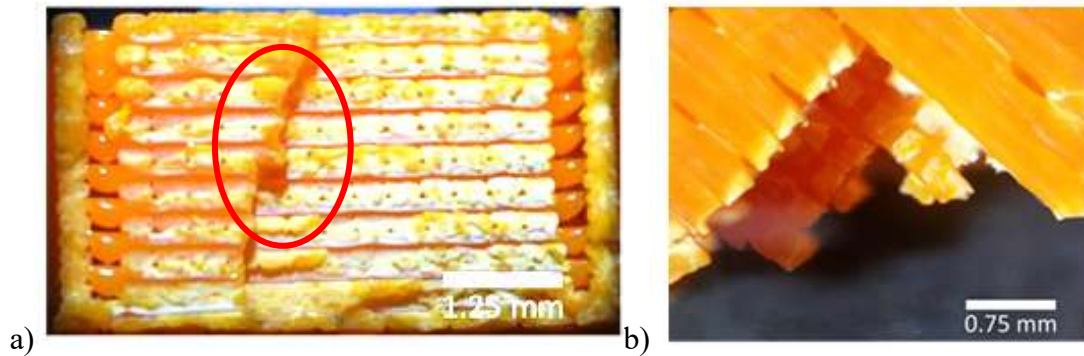


Figura 6. Falhas registradas por mecanismos diferentes em corpos de ABS. a) Direção de carga $[0^\circ/90^\circ]$ e b) $[45^\circ/-45^\circ]$. **Fonte:** Adaptada de LOVO E FORTULAN (2016).

As aplicações da manufatura aditiva na engenharia têm aumentado rapidamente em diversas áreas. Na engenharia mecânica e de materiais, a tecnologia é empregada na fabricação de protótipos, dispositivos de teste, moldes, componentes funcionais e estruturas leves de alta eficiência mecânica. Nos setores aeroespacial e automotivo, destaca-se pela possibilidade de redução de massa estrutural sem comprometimento significativo da resistência mecânica (POPOVICH et al, 2016). Além disso, a manufatura aditiva tem sido amplamente utilizada no desenvolvimento de metamateriais mecânicos e estruturas periódicas baseadas em geometrias de otimização, como honeycomb e superfícies mínimas triperiódicas (TPMS), que possibilitam a análise das propriedades mecânicas por meio do controle da arquitetura interna (SAMUDIN et al, 2026).

2.4 Estruturas *lattice* e geometrias TPMS

O desenvolvimento da manufatura aditiva permitiu a fabricação de estruturas internas complexas que anteriormente eram difíceis ou até impossíveis de serem produzidas pelos métodos convencionais de fabricação. Das estruturas desenvolvidas, aquelas de arquiteturas *lattice* e as geometrias baseadas em superfícies mínimas tridimensionais (Triply Periodic Minimal Surfaces – TPMS), vêm sendo amplamente estudadas devido à sua capacidade de reduzir massa sem comprometer significativamente a resistência mecânica dos componentes (YU, SUN E BAI, 2019).

As estruturas *lattice* podem ser definidas como arranjos tridimensionais formados pela repetição de uma célula unitária ao longo do espaço. Essas células criam uma rede interna de vazios e material sólido que permite controlar propriedades da estrutura formada.

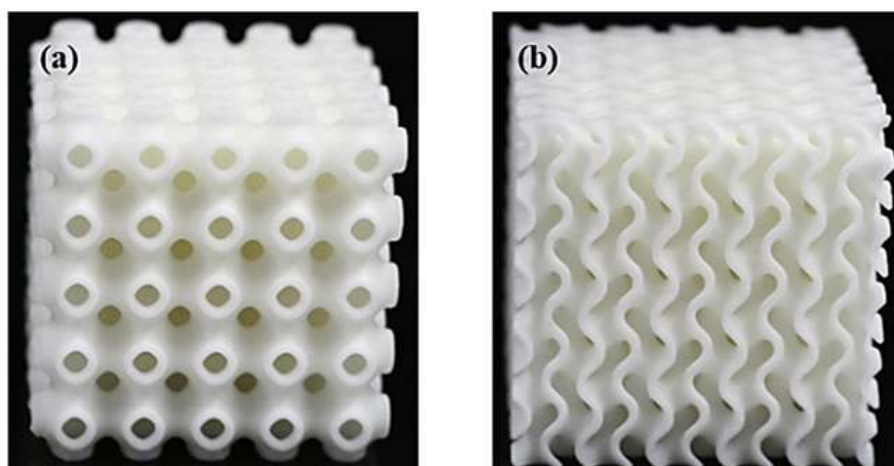


Figura 7. Impressões de geometrias de estruturas lattice e TPMS. a) Schwarz P e b) Giroide . **Fonte:** Adaptada de YU, SUN E BAI (2019).

A principal vantagem dessas estruturas está na possibilidade de obter componentes leves e com desempenho estrutural elevado, gerando interesse para aplicações de engenharia. Entre as geometrias *lattice* mais conhecidas encontra-se a estrutura *honeycomb*, caracterizada pela repetição de células hexagonais semelhantes aos favos de mel encontrados na natureza. Essa configuração é amplamente estudada em aplicações estruturais devido à sua eficiência mecânica, uma vez que proporciona boa resistência utilizando uma quantidade reduzida de material (YAN et al, 2020).

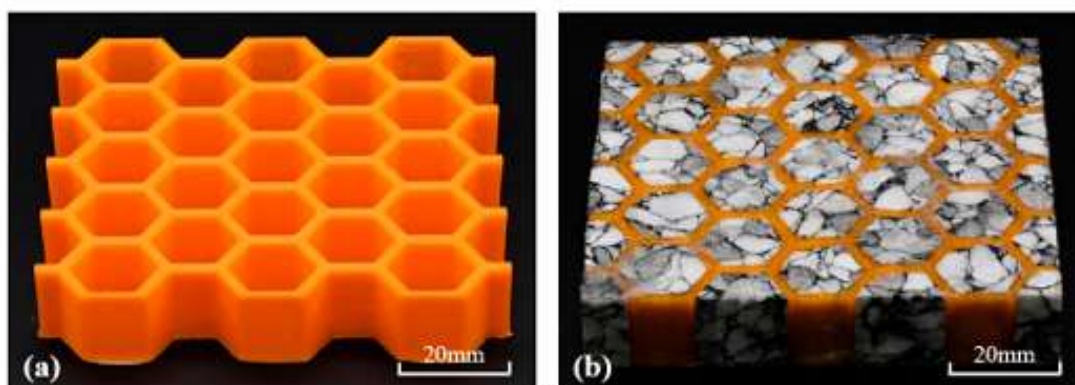


Figura 8. Imagens da estrutura *honeycomb* (favo de mel) a) vazio e b) preenchido com espuma absorvente.

Fonte: YAN, L. et al (2020)

Além disso, a distribuição hexagonal favorece a transferência de cargas ao longo da estrutura, contribuindo para o aumento da rigidez e da estabilidade mecânica. Nos últimos anos, geometrias mais complexas passaram a ser investigadas com o auxílio da manufatura aditiva. As geometrias TPMS são formadas por superfícies contínuas que se repetem periodicamente nas três direções espaciais, criando uma rede interna interconectada sem a presença de cantos

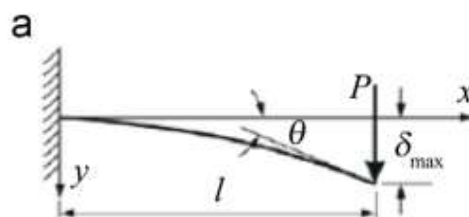
vivos ou mudanças bruscas de geometria.

Dentre as diferentes geometrias TPMS existentes, a estrutura giroide (Figura 7.b) tem recebido grande atenção devido às suas características estruturais. O giroide apresenta uma superfície contínua que permite uma distribuição mais uniforme dos esforços mecânicos ao longo da estrutura.

Diferentemente de algumas arquiteturas convencionais, nas quais as tensões tendem a se concentrar em regiões específicas, a geometria giroide favorece uma distribuição mais homogênea das cargas. No estudo conduzido por Yu, Sun e Bai (2019), onde foi comparado os esforços mecânicos das estruturas de Schwarz P (Figura 7.a) e Giroide produzidas por manufatura aditiva, a continuidade da superfície característica da geometria giroide reduziu a formação de regiões de elevada concentração de tensões, favorecendo uma distribuição mais uniforme dos esforços internos do que na estrutura Schwarz P.

Essas estruturas, assim como a *honeycomb* e giroide, podem ser classificadas como metamateriais mecânicos (ZHENG et al., 2014). De forma geral, metamateriais são materiais cujas propriedades dependem não apenas da composição química dos seus constituintes, mas também da geometria da estrutura interna (BERTOLDI et al., 2017). Dessa forma, é possível modificar significativamente o comportamento mecânico de um componente alterando apenas sua arquitetura interna, sem a necessidade de substituir o material utilizado em sua fabricação.

Uma das principais vantagens associadas ao uso de estruturas celulares está na elevada relação entre resistência mecânica e densidade, característica que as torna especialmente atrativas para aplicações em engenharia. Em diversos setores industriais, em especial na indústria aeroespacial, busca-se reduzir a massa dos componentes sem comprometer sua capacidade de suportar cargas (Figura 9), uma vez que a diminuição do peso contribui para o aumento da eficiência estrutural, redução do consumo de combustível e melhoria do desempenho operacional, aspectos fundamentais no projeto de aeronaves e sistemas aeroespaciais (ZHENG et al., 2014; ZHU, LI E CHILDS, 2018).



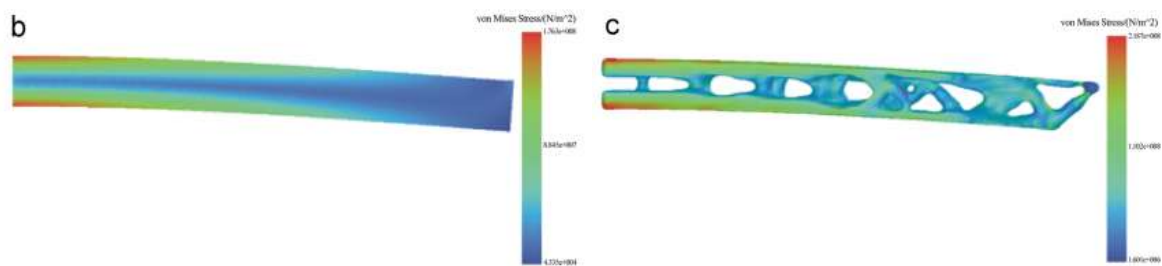


Figura 9. Estudo de caso 1 de otimização de viga cantilever pelo autor: a) condições de carregamento e contorno, b) campo de tensões de von Mises em modelo inicial e c) campo de tensão de von Mises na topologia modelo otimizado. **Fonte:** (ZHU, LI E CHILDS, 2018)

Nesse contexto, estruturas celulares permitem remover parte do material sólido e substituí-lo por vazios distribuídos de forma controlada, reduzindo a densidade total da peça. Entretanto, a forma como esses vazios são organizados influencia diretamente o desempenho mecânico da estrutura. (YU et al., 2019)

Estruturas com distribuição mais eficiente de material podem apresentar elevada resistência específica, definida como a relação entre resistência mecânica e massa. Assim, duas estruturas fabricadas com o mesmo material e contendo a mesma quantidade de massa podem apresentar comportamentos mecânicos distintos em função da arquitetura adotada (ZHENG et al., 2014; YU, SUN E BAI, 2019).

2.5 Comportamento mecânico em flexão

No estudo das propriedades estruturais dos materiais, a avaliação do comportamento mecânico sobre flexão é fundamental, uma vez que diversos componentes de engenharia estão sujeitos a carregamentos que produzem simultaneamente esforços de tração, compressão e cisalhamento como vigas, placas e outros (NETO E PARDINI, 2016). Em materiais compósitos, a análise da resistência à flexão fornece informações relevantes sobre a capacidade do material de suportar cargas transversais, além de permitir avaliar a eficiência da interação entre matriz e reforço na transferência de esforços mecânicos.

De maneira geral, a flexão ocorre quando uma força é aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal de um componente, provocando seu encurvamento. Como consequência, diferentes regiões da seção transversal passam a experimentar estados distintos de tensão (figura 10). Durante esse processo, a superfície localizada acima da linha neutra tende a sofrer esforços de compressão, enquanto a região abaixo dessa linha é submetida a esforços de tração. Entre essas duas zonas encontra-se a linha neutra (representada pelo eixo longitudinal x na figura 10), região onde a tensão longitudinal é teoricamente nula.

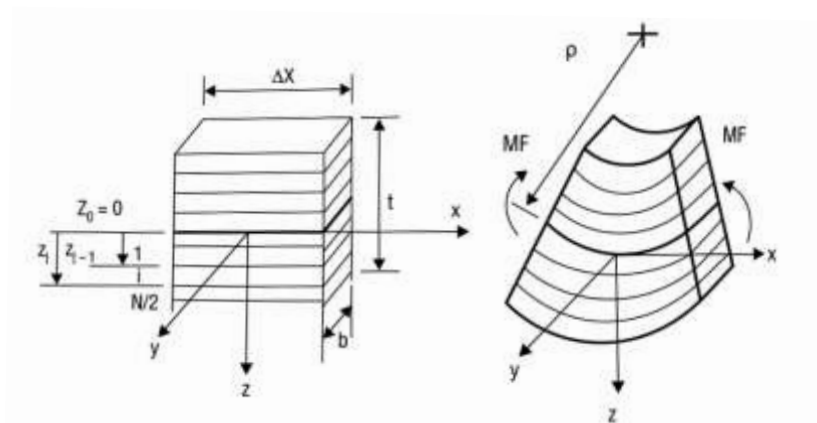


Figura 10. Trecho de uma viga laminada antes e depois da flexão. **Fonte:** NETO E PARDINI (2016)

A teoria clássica da flexão, baseada nas hipóteses de Euler-Bernoulli, estabelece que as seções transversais de uma viga permanecem planas após a deformação e que a distribuição das deformações ao longo da espessura ocorre de maneira linear (REDDY, J. N., 2006). Embora essa abordagem tenha sido inicialmente desenvolvida para materiais homogêneos e isotrópicos, ela constitui uma importante aproximação para a compreensão inicial do comportamento mecânico de materiais submetidos a carregamentos de flexão.

Entretanto, quando aplicada a materiais compósitos, essa teoria apresenta limitações, uma vez que esses materiais possuem características distintas dos materiais convencionais. A presença de diferentes fases, como matriz e elemento de reforço, promove uma distribuição não uniforme das tensões e deformações ao longo da seção transversal.

Quando uma peça é solicitada por um momento fletor, surgem tensões normais distribuídas ao longo da espessura da seção transversal. Essas tensões atingem seus maiores valores nas superfícies externas do corpo de prova, diminuindo gradualmente em direção à linha neutra. Porém, diferentemente de materiais homogêneos, a posição da linha neutra e a magnitude das tensões em compósitos podem ser influenciadas pela diferença de rigidez entre matriz e reforço.

A tensão de flexão é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar o comportamento mecânico de materiais submetidos a carregamentos que induzem esforços de tração e compressão simultaneamente ao longo da seção transversal, como visto no estudo de Layeb et al (2026) e Wang et al (2026). Em materiais compósitos, essa propriedade apresenta grande relevância, pois a resposta mecânica depende não apenas das propriedades individuais da matriz e do reforço, mas também da interação entre as fases constituintes, da geometria interna do reforço e do mecanismo de transferência de carga entre os materiais.

De acordo com a **ASTM D790**, o ensaio de flexão em três pontos é uma metodologia

amplamente empregada para a determinação das propriedades de flexão de materiais poliméricos, compósitos e plásticos reforçados. Nesse método, o corpo de prova é apoiado em duas extremidades e submetido a uma carga concentrada em seu ponto médio, permitindo a determinação da resistência à flexão, do módulo de elasticidade em flexão e da deformação correspondente. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado devido à sua simplicidade experimental, boa reprodutibilidade e capacidade de representar o comportamento mecânico dos materiais quando submetidos a esforços de flexão.

Para o ensaio de flexão em três pontos, a tensão máxima de flexão é calculada pela Equação (I), conforme estabelecido pela ASTM D790:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (I)$$

onde σ_f corresponde à tensão de flexão (MPa), P representa a carga aplicada (N), L é a distância entre os apoios externos (mm), b representa a largura do corpo de prova (mm) e d corresponde à espessura do corpo de prova (mm).

Além da tensão máxima de flexão, o comportamento elástico do material pode ser avaliado por meio do módulo de elasticidade em flexão. Para a configuração de quatro pontos, o módulo é calculado considerando a inclinação da região linear da curva carga-deslocamento, conforme apresentado pela equação (II):

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (II)$$

onde E_f representa o módulo de elasticidade em flexão (MPa), m corresponde à inclinação da curva carga versus deslocamento obtida na região elástica (N/mm), L representa a distância entre os apoios externos (mm), b a largura do corpo de prova (mm) e d a espessura do corpo de prova (mm).

Contudo, para materiais compósitos com arquitetura interna, como os desenvolvidos neste trabalho, os valores obtidos no ensaio representam uma resposta mecânica global do sistema. Dessa forma, a tensão de flexão e o módulo de elasticidade determinados experimentalmente correspondem ao comportamento equivalente do conjunto matriz-reforço, sendo influenciados pela geometria do reforço, pela distribuição do material interno e pela eficiência da transferência de esforços entre a resina e a estrutura polimérica impressa.

Além das propriedades obtidas diretamente pelas equações de flexão, a análise das curvas tensão versus deformação permite avaliar os mecanismos de deformação e falha do compósito, possibilitando identificar diferenças no comportamento mecânico entre as configurações analisadas (YAN et al, 2020; GOHAR et al, 2023).

Além da distribuição de tensões, a análise da deformação é fundamental para compreender a resposta mecânica do material durante o ensaio. A deformação corresponde à variação relativa das dimensões de um corpo quando submetido à aplicação de uma carga, sendo uma grandeza diretamente relacionada ao comportamento elástico e plástico dos materiais. Em ensaios de flexão, considerando inicialmente um comportamento homogêneo, as maiores deformações ocorrem nas regiões mais afastadas da linha neutra, correspondendo às superfícies submetidas aos maiores esforços de tração e compressão. A relação estabelecida entre tensão e deformação permite avaliar a rigidez do material por meio da determinação do módulo de elasticidade em flexão (CALLISTER, 2016).

O comportamento observado durante o carregamento pode variar significativamente de acordo com a composição, a fração de reforço e a arquitetura interna do material. Em compósitos poliméricos, a incorporação de uma segunda fase altera os mecanismos de transferência de carga, modificando a distribuição de tensões e deformações no interior do componente. Dessa forma, características como propriedades da matriz, rigidez do reforço, qualidade da interface matriz-reforço e geometria do elemento de reforço influenciam diretamente a resistência à flexão e os mecanismos responsáveis pela falha do material (NETO E PARDINI, 2016; BARBERO, 2023).

Em compósitos reforçados por estruturas arquitetadas, a organização espacial do reforço exerce papel fundamental no desempenho mecânico. Arquiteturas com distribuição eficiente de material podem promover uma transferência de carga mais uniforme, reduzindo concentrações localizadas de tensão e aumentando a eficiência estrutural do componente (GIBSON E ASHBY, 1997; ZHENG et al., 2014). Estudos envolvendo estruturas projetadas demonstram que a continuidade geométrica dessas arquiteturas pode favorecer uma distribuição mais homogênea dos esforços mecânicos, influenciando o modo de deformação e propagação de falhas durante o carregamento (YU, SUN E BAI, 2019).

Na análise dos mecanismos de falha para caracterização mecânica de materiais submetidos à flexão, principalmente em polímeros sem reforço, a ruptura geralmente ocorre na região submetida à tração, onde as tensões normais atingem seus maiores valores, podendo resultar na iniciação e propagação de trincas após o início da falha (CALLISTER, 2016). Em materiais poliméricos frágeis, esse processo tende a ocorrer de maneira mais localizada, uma

vez que há menor capacidade de redistribuição dos esforços após o surgimento de uma descontinuidade.

Nos materiais compósitos, os mecanismos de falha tornam-se mais complexos devido à interação entre os diferentes constituintes. Entre os principais modos de falha estão a fratura da matriz polimérica, a perda de aderência na interface matriz-reforço, a delaminação, o colapso localizado do elemento estrutural de reforço e a propagação de trincas associadas às concentrações de tensão (NETO E PARDINI, 2016; BARBERO, 2023).

Para estruturas produzidas por manufatura aditiva, onde a arquitetura interna exerce influência no comportamento mecânico em flexão, geometrias distintas podem resultar em diferentes distribuições de tensão, rigidez estrutural e modos de falha, mesmo quando fabricadas com a mesma quantidade de material, sendo necessário levar em conta no desenvolvimento de projetos que haja essa variação. No estudo de Yu, Sun e Bai (2019), o controle do peso final foi determinante para isolar os efeitos da estrutura interna, fazendo com que o desvio máximo do peso entre as quatro estruturas fosse de 2,89%, o que está dentro dos parâmetros razoáveis do experimento.

Por isso, a resposta mecânica final do compósito depende não apenas das propriedades individuais da matriz e do reforço, mas também da interação entre esses elementos e da eficiência da arquitetura empregada na transferência de carga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Procedimento experimental

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da geometria interna de reforços produzidos por manufatura aditiva no comportamento mecânico sob flexão de compósitos poliméricos com matriz epóxi. Para isso, foi adotado um delineamento experimental comparativo, no qual os corpos de prova foram divididos em cinco grupos experimentais distintos.

O primeiro grupo, denominado grupo controle, foi constituído exclusivamente por corpos de prova fabricados apenas com resina epóxi, sem a presença de reforço interno, com o objetivo de estabelecer um parâmetro de referência para comparação das propriedades mecânicas. O segundo grupo foi composto por compósitos contendo reforço interno produzido em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com geometria *honeycomb*, enquanto o terceiro grupo foi formado por compósitos contendo reforço interno em ABS com geometria giroide. O quarto grupo possui a mesma geometria do *honeycomb*, porém, está rotacionado 90°, visando avaliar se a direção da geometria influencia no comportamento mecânico. De modo similar, o grupo cinco consiste na rotação em 90° na mesma direção, mas agora com a estrutura giroide.

Cada grupo experimental foi constituído por cinco corpos de prova, totalizando 25 amostras analisadas. A quantidade de amostras por condição experimental foi definida de forma a garantir repetibilidade dos resultados e permitir análise estatística básica dos dados obtidos.

Com o intuito de isolar exclusivamente a influência da geometria interna sobre o comportamento mecânico dos compósitos, foram mantidas constantes as demais variáveis experimentais, incluindo:

- dimensões externas dos corpos de prova;
- material da matriz polimérica;
- material do reforço;
- fração volumétrica do reforço;
- parâmetros de impressão 3D;
- condições de cura da resina;
- condições do ensaio mecânico.

As geometrias *honeycomb* e giroide foram selecionadas devido à ampla aplicação em estruturas leves e ao potencial de otimização mecânica associado à distribuição interna de tensões. Enquanto a geometria *honeycomb* apresenta elevada rigidez estrutural associada à

configuração hexagonal periódica, a geometria giroide caracteriza-se pela continuidade geométrica e pela distribuição mais homogênea das tensões mecânicas.

Os corpos de prova produzidos foram submetidos a ensaios mecânicos de flexão em três pontos, conforme os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM D790, visando determinar propriedades como resistência de ruptura flexural e comportamento de falha.

A partir da comparação entre os grupos experimentais e das análises estatísticas realizadas, buscou-se estabelecer a relação entre a arquitetura geométrica interna dos reforços e o desempenho mecânico dos compósitos submetidos à carga de flexão.

3.2 Materiais utilizados

Para a realização do presente estudo, foram utilizados materiais poliméricos, equipamentos de manufatura aditiva, dispositivos de moldagem e equipamentos de caracterização mecânica, os quais possibilitaram a fabricação dos corpos de prova e a avaliação do comportamento mecânico dos compósitos desenvolvidos.

3.2.1 Silicone (Redelease)



Figura 11. Resina de Silicone da redelease. **Fonte:** Autor (2026)

O silicone foi utilizado na fabricação dos moldes empregados na produção dos corpos de prova compósitos. Sua utilização permitiu a obtenção de moldes flexíveis, com boa fidelidade geométrica e facilidade de desmoldagem após o processo de cura da resina epóxi.

A escolha do silicone como material de moldagem deve-se à sua estabilidade geométrica

e facilidade de produção da quantidade dos corpos de prova, sendo o mesmo molde utilizado para produzir todos os corpos de prova, além da capacidade de manter adequadamente as dimensões e superfícies desejadas para os corpos de prova.

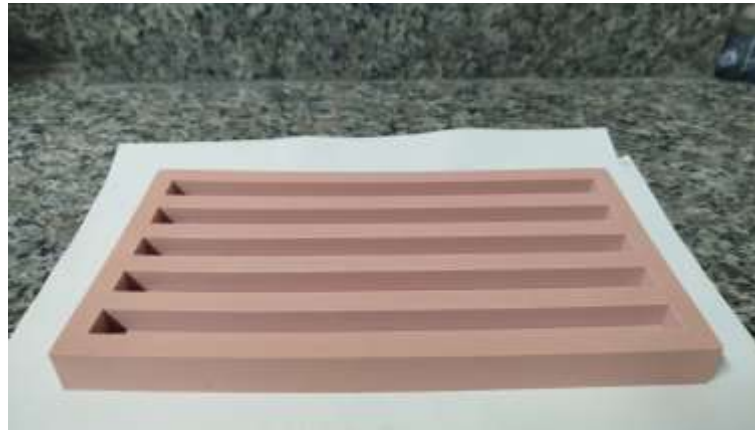


Figura 12. Molde de silicone produzido para fabricação dos corpos de prova. **Fonte:** Autor (2026)

Os moldes produzidos foram utilizados durante o encapsulamento das estruturas impressas em ABS, garantindo padronização dimensional e uniformidade entre as amostras fabricadas.

3.2.2 Resina epóxi Redelease 2004 e endurecedor Redelease 3154



Figura 13. Resina de epóxi e endurecedor da redelease. **Fonte:** Autor (2026)

Como matriz polimérica dos compósitos, foi utilizada a resina epóxi Redelease 2004 em conjunto com o endurecedor 3154. O sistema epóxi foi selecionado devido às suas elevadas propriedades mecânicas, boa adesão interfacial, estabilidade dimensional e ampla aplicação na

fabricação de materiais compósitos estruturais.

A mistura entre resina e endurecedor foi realizada conforme a proporção recomendada pelo fabricante (na proporção 100:50 respectivamente), buscando garantir adequada reação de cura e homogeneidade do material final. Após a mistura, o sistema foi submetido ao processo de vazamento nos moldes contendo os reforços impressos em 3D, promovendo o encapsulamento completo das estruturas internas.

A utilização da resina epóxi como matriz teve como finalidade fornecer rigidez estrutural ao compósito, além de permitir a transferência de esforços mecânicos entre a matriz e o reforço interno produzido em ABS.

3.2.3 Filamento ABS 3DFila



Figura 14. Filamento de ABS da 3DFila. **Fonte:** 3DFila (s.d.)

Os reforços internos dos compósitos foram produzidos utilizando filamento de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) da marca 3DFila, com diâmetro nominal de 1,75 mm. O material foi selecionado devido à sua facilidade de processamento por manufatura aditiva, boa estabilidade dimensional e adequada resistência mecânica para aplicações estruturais de baixa e média solicitação.

O ABS foi utilizado na fabricação das geometrias internas *honeycomb* e giroide por meio da tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM). As estruturas impressas atuaram como reforço interno dos compósitos, sendo posteriormente encapsuladas pela matriz epóxi.

Além do processamento e estabilidade dimensional, o ABS está presente na utilização em pesquisas envolvendo manufatura aditiva e estruturas *lattice*, permitindo maior comparabilidade com trabalhos encontrados na literatura científica.

3.2.4 Desmoldante



Figura 15. Spray Desmoldante Redlub. **Fonte:** Autor (2026)

Para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova após a cura da resina epóxi, foi utilizado o Spray Desmoldante Redelub, da Redelease, com embalagem de 250 g. O produto é um desmoldante à base de óleos sintéticos e aditivos, desenvolvido para proporcionar propriedades de lubrificação e facilitar a separação entre a peça e a superfície do molde.

Durante a fabricação dos corpos de prova, o Redelub foi aplicado sobre a superfície interna do molde antes da inserção da resina epóxi, formando uma camada fina e uniforme. A aplicação teve como finalidade reduzir a aderência entre a resina curada e o molde, facilitando a retirada dos corpos de prova e contribuindo para a preservação do molde durante a repetição do processo de fabricação.

3.2.5 Máquina de impressão 3D Creality K1C



Figura 16. Máquina de impressão 3D Creality K1C. **Fonte:** Creality (s.d.)

A fabricação das estruturas internas foi realizada utilizando a impressora 3D Crealty K1C, baseada na tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling).

A impressora possui elevada precisão dimensional, estabilidade de impressão e capacidade de fabricação de geometrias complexas com bom acabamento superficial, características muito importantes para a obtenção de estruturas periódicas com repetibilidade geométrica e bons resultados devido aos ajustes de impressão mais refinados.

Durante o processo de fabricação, foram controlados parâmetros de impressão (Tabela 1) como temperatura de extrusão, altura de camada, velocidade de impressão e orientação de fabricação, visando garantir padronização entre os corpos de prova produzidos.

Temperatura de extrusão (°C)	Altura da camada (mm)	Velocidade de impressão (mm/s)			Orientação de fabricação
		Primeira camada	Perímetro externo	Perímetro interno	
225 – 260	0,2	60	200	250	0°

Tabela 1. Parâmetros de impressão na fabricação do reforço. **Fonte:** Autor (2026)

3.2.6 Máquina universal de ensaios Oswaldo Filizola



Figura 17. Máquina universal de ensaios Oswaldo Filizola. **Fonte:** Oswaldo filizola (s.d.)

Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios da marca Oswaldo Filizola. O equipamento foi utilizado para a aplicação controlada de carga nos corpos de prova, permitindo a obtenção das propriedades mecânicas associadas ao

comportamento em flexão dos compósitos desenvolvidos.

Os ensaios foram conduzidos em configuração de flexão em três pontos, seguindo os parâmetros de tipo de corpo de prova, relação espessura/vão, formulas de cálculo para os resultados, todos estabelecidos pela norma ASTM D790. Durante os testes, foram registrados valores de carga e deslocamento, possibilitando a determinação de propriedades como resistência à ruptura flexural e comportamento de falha.

A utilização da máquina universal permitiu ainda comparar o desempenho mecânico entre os diferentes grupos experimentais, avaliando a influência das geometrias internas no comportamento estrutural dos compósitos.

3.3 Modelagem CAD dos reforços

No desenvolvimento das geometrias internas, o objetivo foi investigar a influência da arquitetura estrutural do reforço no comportamento mecânico dos corpos de prova produzidos por manufatura aditiva. Para isso, foram selecionadas duas geometrias amplamente empregadas em estruturas celulares: a *honeycomb* e a giroide. Ambas apresentam características distintas quanto à distribuição de massa, conectividade estrutural e capacidade de absorção de energia, permitindo uma análise comparativa de seus desempenhos.

A modelagem das geometrias foi realizada no software Fusion 360, no qual cada estrutura foi desenvolvida individualmente de acordo com os parâmetros geométricos estabelecidos para o estudo.

Após a modelagem, os arquivos foram exportados para o software de fatiamento da Creality, onde foi realizada a verificação da massa estimada de cada modelo e também ajustes finais da estrutura. Durante esse processo, esses ajustes dimensionais foram efetuados com o objetivo de obter massas equivalentes entre as geometrias, minimizando a influência de diferenças na fração volumétrica sobre os resultados dos ensaios mecânicos.



Figura 18. Modelagem dos corpos de prova no software de fatiamento da creality. **Fonte:** Autor (2026)

Dessa forma, buscou-se garantir que as diferenças observadas estivessem relacionadas predominantemente à arquitetura interna das estruturas.

3.3.1 *Honeycomb*

A geometria *honeycomb* (Figura 19) foi escolhida por sua elevada relação entre resistência mecânica e massa específica, sendo amplamente utilizada em aplicações estruturais que exigem redução de peso sem comprometer significativamente a rigidez do componente. Essa configuração é composta por células hexagonais repetidas periodicamente, proporcionando uma distribuição relativamente uniforme dos esforços mecânicos ao longo da estrutura.



Figura 19. Reforço do corpo de prova impresso em geometria *honeycomb*. **Fonte:** Autor (2026)

Os parâmetros geométricos, como as dimensões das células e a espessura de suas paredes, foram definidos considerando tanto as limitações do processo de impressão 3D quanto a necessidade de compatibilização da massa com a geometria giroide.

3.3.2 Giroide

A geometria giroide (figura 20) foi selecionada devido às suas propriedades estruturais características, sendo caracterizada como uma superfície mínima triperiódica contínua, sem interseções entre suas paredes. Diferentemente das estruturas convencionais baseadas em células discretas, o giroide apresenta uma rede tridimensional contínua, favorecendo uma distribuição mais homogênea das tensões internas e reduzindo concentrações localizadas de esforços.



Figura 20. Reforço do corpo de prova impresso em geometria giroide. **Fonte:** Autor (2026)

Após a modelagem, foram realizados ajustes nos parâmetros geométricos até que a massa estimada no software de fatiamento da Creality se aproximasse da massa obtida para a geometria *honeycomb*, garantindo condições equivalentes para a comparação experimental.

3.4 Fabricação dos compósitos

Os compósitos foram produzidos a partir da combinação da resina epóxi e estruturas de reforço previamente fabricadas de acordo com etapas subsequentes e planejadas.

Inicialmente, foi separado uma quantidade de resina epóxi com o endurecedor, obedecendo a proporção prevista pelo fabricante e a quantidade suficiente para os 5 corpos de prova de cada grupo.



Figura 21. Resina epóxi utilizada para fabricação de um grupo de corpos de prova. **Fonte:** Autor (2026)

Separado as quantidades corretas, o endurecedor é vazado em um b quer contendo a resina de maneira a diminuir a geração de bolhas que podem comprometer o comportamento mecânico. Após a mistura, o tempo em gel leva 20 minutos, podendo manipular a resina nesse período.

Com o sistema resina + endurecedor misturado, foi vazado no molde uma pequena quantidade para preencher um volume suficiente que cobrisse a base das cavidades do molde, de forma que os reforços não ficassem presos ao fundo do molde. Após isso os reforços impressos em ABS foram posicionados no interior dos moldes, garantindo seu correto alinhamento e centralização durante o processo de moldagem.



Figura 22. Reforços de geometria hexagonal impressos. **Fonte:** Autor (2026)

Em seguida foi preenchido os espaços restantes das cavidades com a resina para cobrir totalmente. Após o preenchimento dos moldes, os corpos de prova permaneceram em repouso durante o período inicial de cura no molde de silicone, minimizando deslocamentos da estrutura de reforço e garantindo a estabilização do sistema polimérico. Em seguida, foram desmoldados e mantidos em processo de cura até o tempo recomendado pelo fabricante da resina (cerca de 7 dias), assegurando o desenvolvimento completo das propriedades mecânicas do material.

Finalizado o processo de cura, os compósitos foram submetidos à inspeção visual para verificação da presença de defeitos, como bolhas, porosidades, regiões com impregnação incompleta e irregularidades superficiais. Algumas irregularidades foram encontradas como mostra a figura abaixo:



Figura 23. Falhas de processamento no corpo de prova. **Fonte:** Autor (2026)

Posteriormente, foi realizado o acabamento dos corpos de prova por meio da remoção de rebarbas, defeitos e pequenas imperfeições, garantindo a conformidade dimensional estabelecida pelas normas ASTM correspondentes aos ensaios mecânicos de flexão. Esse procedimento foi fundamental para assegurar a uniformidade das amostras e minimizar possíveis interferências nos resultados experimentais.

3.5 Ensaio mecânico de flexão

3.5.1 Configuração do ensaio

O comportamento mecânico à flexão dos compósitos foi avaliado por meio do ensaio de flexão em três pontos, realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D790. Nesse método, o corpo de prova foi apoiado sobre dois suportes espaçados por uma distância previamente definida, sendo submetido a uma carga concentrada aplicada em seu ponto médio por meio do atuador da máquina universal de ensaios.

De acordo com a norma, o espaçamento do vão deve obedecer uma proporção de 1:40 entre a espessura do corpo de prova e o vão respectivamente devido às características do ensaio ser submetido em corpos de prova de compósitos. Entretanto, devido às condições de ensaio e da máquina disponível para ensaio, o ensaio foi feito na proporção **1:8** para garantir a identificação dos valores de tensão máxima de flexão e da falha.



Figura 24. Corpo de prova submetido ao ensaio de flexão. **Fonte:** Autor (2026)

Durante o carregamento, foram registrados continuamente os valores de força e deslocamento, possibilitando a obtenção das curvas de carga $\times$ deslocamento e o cálculo das propriedades mecânicas estabelecidas pela norma.

Para garantir a comparabilidade entre os grupos experimentais, todos os corpos de prova foram ensaiados sob as mesmas condições experimentais, mantendo-se constantes o vão entre os apoios, a velocidade de deslocamento do atuador e as dimensões geométricas.

3.5.2 Parâmetros avaliados

Durante os ensaios de flexão foram obtidos os dados de carga e deslocamento necessários para a determinação das propriedades mecânicas. A partir desses resultados, foram avaliados os seguintes parâmetros:

- carga máxima suportada pelo corpo de prova;
- tensão máxima de flexão;
- módulo de elasticidade em flexão;
- deslocamento correspondente à carga máxima;
- comportamento da curva carga $\times$ deslocamento;
- modo de falha apresentado por cada arquitetura de reforço.

Os resultados obtidos permitiram comparar o desempenho mecânico dos diferentes compósitos produzidos, correlacionando a geometria da estrutura interna com sua capacidade resistente e sua rigidez durante o carregamento de flexão.

3.5.3 Equações utilizadas

A tensão máxima de flexão foi determinada conforme a ASTM D790, utilizando a Equação (I), dada pelos valores de carga máxima média a partir dos ensaios de flexão realizados, e os valores tabelados de acordo com as propriedades da viga, como pode ser visto na tabela 2 abaixo:

b (mm)	d (mm)	Z (mm/mm/min)	L (mm)
13	11,25	0,01	120

Tabela 2. Dados dos parâmetros de cálculo para os valores solicitados em norma. **Fonte:** Autor (2026)

O módulo de elasticidade em flexão (E_f) foi calculado por meio da inclinação da região linear da curva carga versus deslocamento, conforme a equação (II). O termo m , na equação se trata da inclinação da curva força x deslocamento no regime elástico. Com os resultados dos ensaios obtidos, o valor de m é calculado para cada corpo de prova, bem como o valor médio para cada grupo.

A velocidade de deslocamento do atuador foi determinada conforme o procedimento estabelecido pela ASTM D790, utilizando a Equação (III):

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (\text{III})$$

em que:

- R = velocidade de deslocamento do atuador (mm/min);
- Z = taxa de deformação da fibra externa (mm/mm/min);
- L = distância entre os apoios (mm);
- d = espessura do corpo de prova (mm).

Com os mesmos dados da tabela 1, foi possível calcular a velocidade do atuador, resultando num valor de $R = 2,13$ mm/min.

Nos protótipos desenvolvidos, com essa velocidade não foi possível determinar as propriedades corretamente, então a taxa de carregamento foi aumentada para 4,5 mm/min, a fim de obter resultados que mostrassem o ponto máximo de flexão.

Para a determinação do módulo de elasticidade em flexão, a norma recomenda a

utilização de uma taxa de deformação da fibra externa de **0,01 mm/mm/min**. Já para a determinação da resistência à flexão, pode ser utilizada uma taxa de **0,10 mm/mm/min**, conforme especificado pela ASTM D790.

3.6 Tratamento estatístico

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos foram submetidos a tratamento estatístico com o objetivo de avaliar a variabilidade dos corpos de prova e verificar a existência de diferenças significativas entre os grupos experimentais. Foram analisados cinco corpos de prova para cada uma das cinco condições experimentais, totalizando 25 amostras.

3.6.1 Análise estatística descritiva

Foi realizada a análise estatística descritiva dos resultados de cada grupo experimental. Foram determinados a **média aritmética**, o **desvio padrão** e o **coeficiente de variação**, sendo esses parâmetros utilizados para representar, respectivamente, a tendência central, a dispersão dos resultados e a variabilidade relativa dos corpos de prova. A média aritmética foi determinada pela Equação (IV):

$$\underline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{IV})$$

em que $\bar{x}$ representa a média dos resultados, x_i corresponde ao valor obtido para cada corpo de prova e n representa o número de corpos de prova analisados.

O desvio padrão foi utilizado para avaliar a dispersão dos resultados em relação à média, enquanto o coeficiente de variação foi calculado pela relação entre o desvio padrão e a média, conforme a Equação (V):

$$CV = \frac{s}{\underline{x}} \times 100 \quad (\text{V})$$

em que CV corresponde ao coeficiente de variação (%), s ao desvio padrão e $\bar{x}$ à média dos resultados.

Os resultados estatísticos foram posteriormente utilizados em conjunto com a análise das propriedades mecânicas para avaliar a influência da geometria e da orientação das estruturas arquitetadas sobre o comportamento dos compósitos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos corpos de prova e suas curvas força $\times$ deslocamento

Os corpos de prova ensaiados com os parâmetros estabelecidos obtiveram diferentes comportamentos, resultando em corpos de prova fraturando dados os parâmetros de ensaio (velocidade do atuador, vão dos apoios) e outros não, como pode ser visto na Figura 25 abaixo:

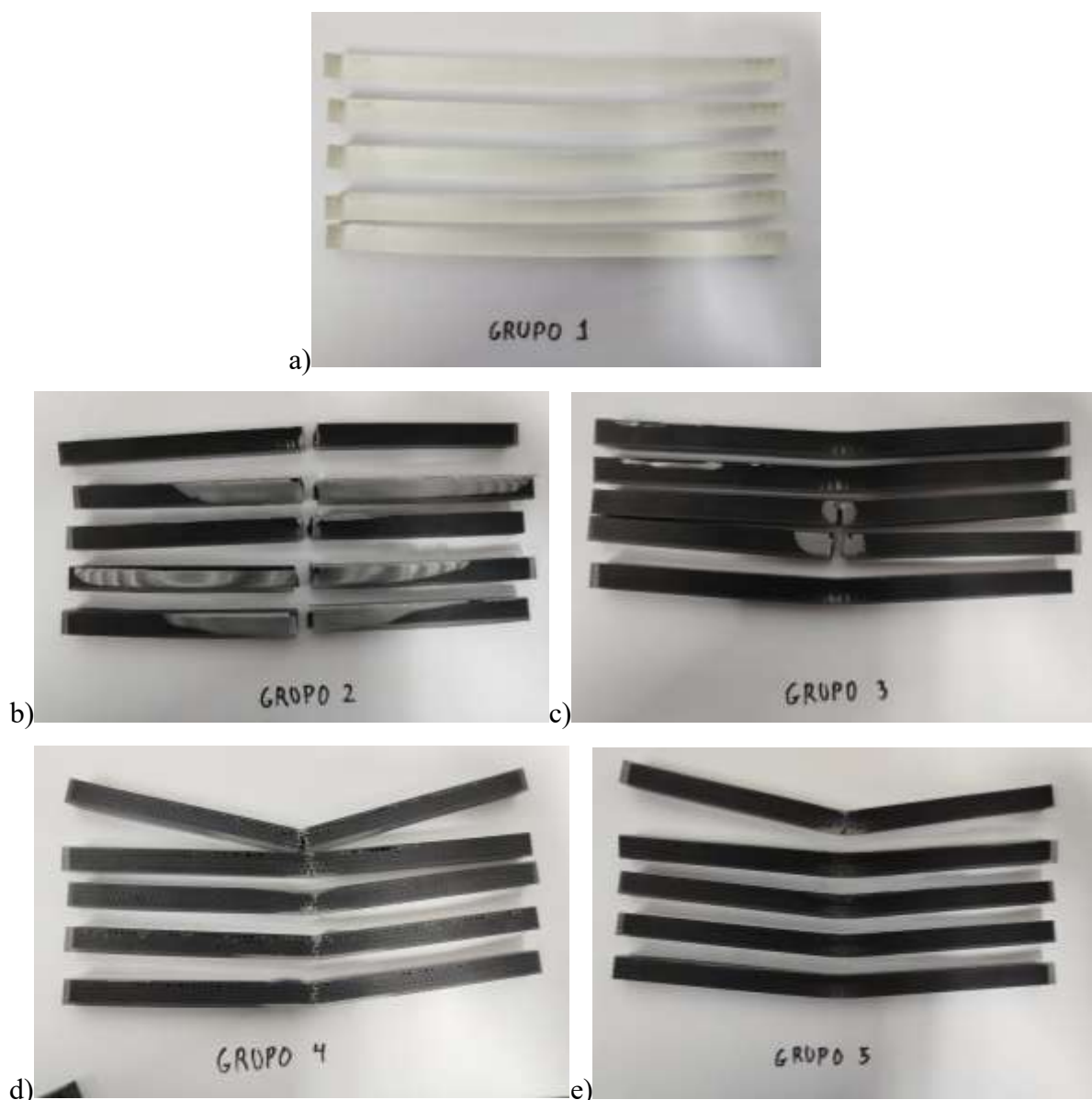


Figura 25. Corpos de prova rompidos pós ensaio de flexão. A) Resina pura, b) Resina + honeycomb, c) Resina + giroide, d) Resina + *honeycomb* 90° e e) Resina + giroide 90°. **Fonte:** Autor (2026)

As Figuras 26 e 27 apresentam as curvas força $\times$ deslocamento obtidas durante os ensaios de flexão em três pontos para os grupos constituídos pela resina epóxi sem reforço e pelos compósitos reforçados com estruturas *honeycomb* e giroide em diferentes orientações. De

maneira geral, todas as amostras apresentaram comportamento característico de materiais poliméricos submetidos ao carregamento de flexão, evidenciado por uma região inicial aproximadamente linear, correspondente ao regime elástico, seguida pelo aumento gradual da carga até a carga máxima e posterior redução da capacidade resistente em decorrência da propagação da fratura (ASTM D790).

O grupo constituído apenas pela resina epóxi (Figura 26) apresentou curvas bastante próximas entre si, indicando elevada repetibilidade dos ensaios e uniformidade do processo de fabricação.

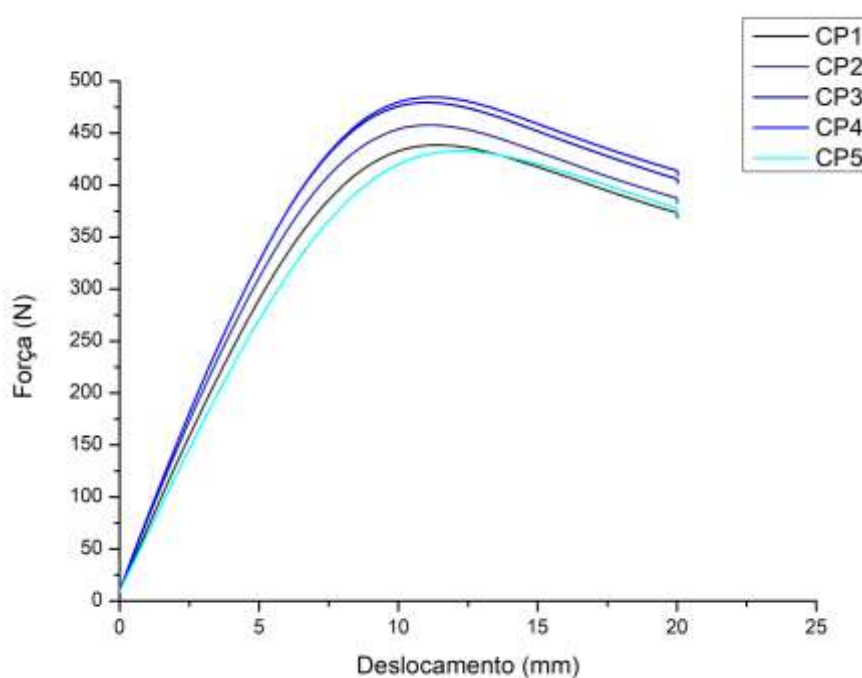


Figura 26. Ensaio de Flexão do Grupo 1 (Resina epóxi).

Além da baixa dispersão observada visualmente, esse grupo apresentou a maior carga máxima média (458,68 N), demonstrando que a matriz polimérica foi capaz de suportar maiores esforços antes da ocorrência da ruptura. O comportamento homogêneo observado nas curvas está de acordo com o baixo desvio padrão obtido para esse grupo (5,11%), evidenciando consistência entre os corpos de prova ensaiados.

Na figura 27 estão apresentados os outros ensaios com as diferentes variações de reforços.

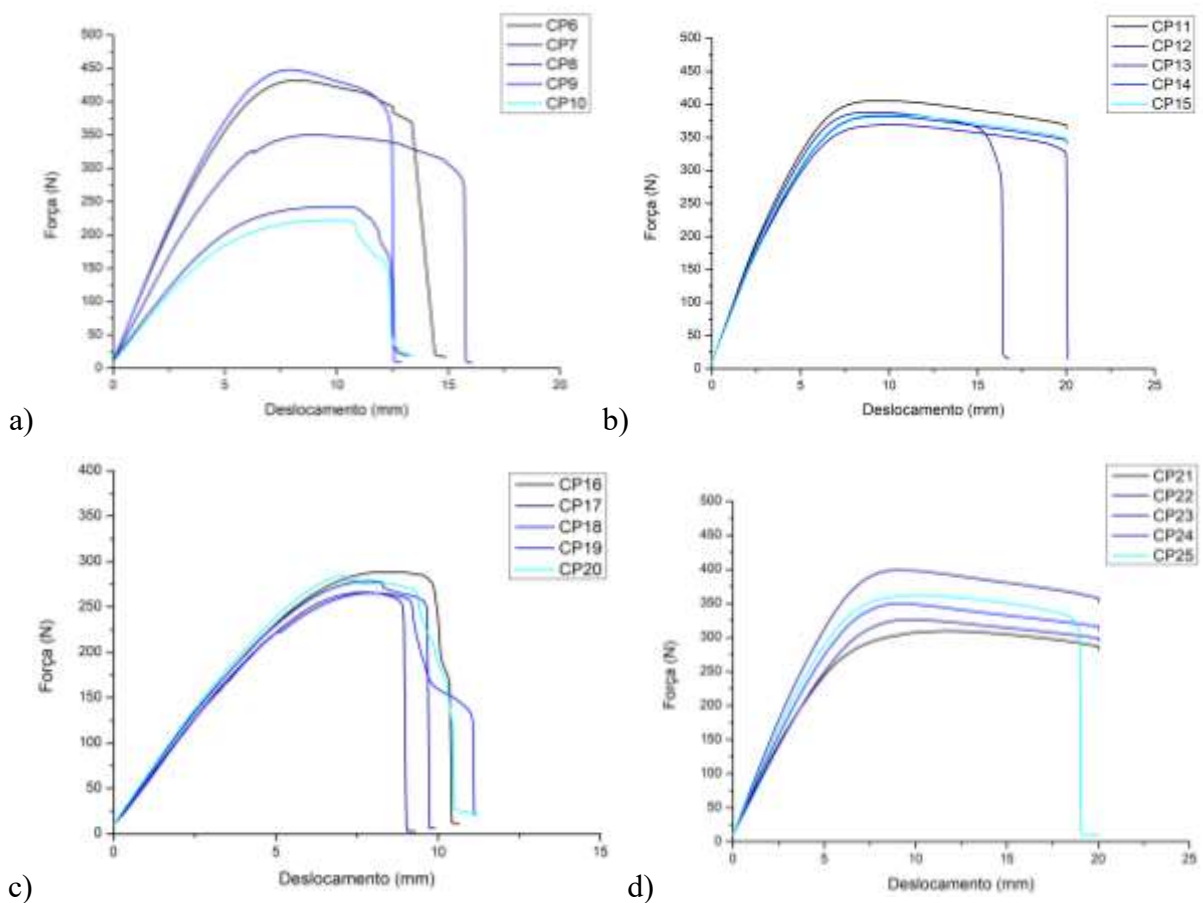


Figura 27. Ensaios de flexão para os corpos de provas de compósitos. a) Resina + *honeycomb*, b) Resina + Giroide, c) Resina + *honeycomb* 90° e d) Resina + Giroide 90°. **Fonte:** Autor (2026)

Para os compósitos reforçados com a estrutura *honeycomb* na orientação original (Figura 27.a), observa-se maior dispersão entre as curvas quando comparada aos demais grupos. Enquanto alguns corpos de prova apresentaram comportamento próximo ao da resina pura, outros atingiram cargas máximas significativamente inferiores. Essa variabilidade também pode ser observada no valor do coeficiente de variância, na qual o grupo apresentou o maior desvio entre os valores individuais de carga máxima com variância de 30,77%, refletindo um comportamento mecânico menos uniforme.

Esse resultado sugere que variações no processo de fabricação, como o posicionamento do reforço, a impregnação da resina ou a presença de vazios, exerceram influência significativa sobre o desempenho mecânico do compósito, como pode ser visto na figura 28.



Figura 28. Defeitos de processamento dos compósitos. **Fonte:** Autor (2026)

Além disso, a própria geometria *honeycomb* pode favorecer a formação de regiões concentradoras de tensão nas junções das células, reduzindo a eficiência da transferência de carga entre a matriz e o reforço. Na figura 29 é possível notar que a fratura decorre entre os hexágonos:

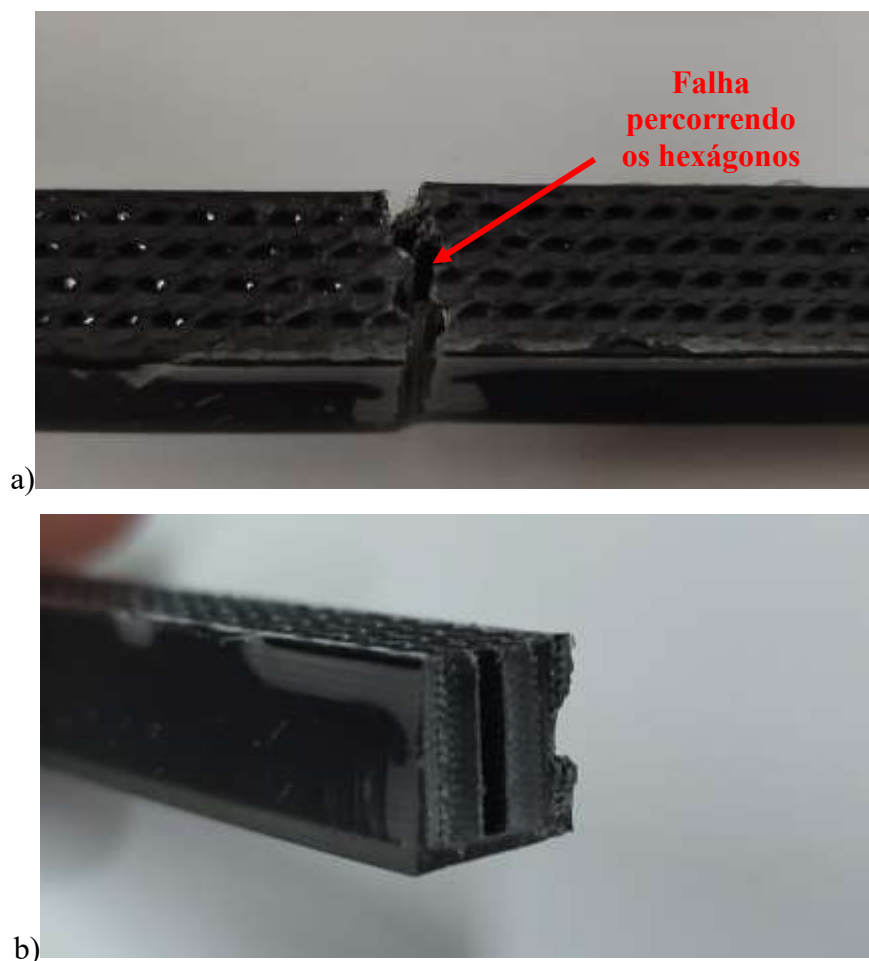


Figura 29. Falha macroscópica do compósito com reforço em geometria *honeycomb*. a) Vista superior e b) vista transversal. **Fonte:** Autor (2026)

As curvas correspondentes ao grupo Resina + Giroide (Figura 27.b) apresentaram comportamento significativamente mais uniforme. A proximidade entre as curvas indica menor variabilidade entre os corpos de prova, resultado compatível com os valores individuais de carga máxima apresentados na Tabela 2. Embora a carga máxima média tenha permanecido inferior à da resina pura, a estrutura Giroide apresentou desempenho superior ao *honeycomb*, sugerindo maior eficiência na distribuição dos esforços ao longo do compósito. Esse comportamento pode ser atribuído à geometria contínua característica das TPMS, que reduz descontinuidades estruturais e favorece uma distribuição mais homogênea das tensões durante o carregamento.

Para os compósitos contendo a estrutura *honeycomb* com direção perpendicular à original (Figura 27.c), observa-se novamente boa sobreposição entre as curvas, indicando repetibilidade satisfatória entre os corpos de prova. Entretanto, todas as curvas atingiram cargas máximas inferiores às observadas para as demais configurações, comportamento confirmado pela menor carga máxima média registrada (276,64 N). Esse resultado demonstra que a alteração da orientação da posição do reforço influenciou negativamente sua capacidade de suportar esforços de flexão, indicando que a disposição geométrica das células em relação à direção do carregamento possui influência direta sobre a eficiência estrutural do compósito.

As curvas do grupo Resina + Giroide orientado também a 90° (Figura 27.d) apresentaram comportamento intermediário entre as demais configurações. Embora tenha ocorrido redução da carga máxima em relação ao Giroide na orientação original, as curvas permaneceram relativamente próximas entre si, indicando boa repetibilidade experimental. A carga máxima média de 349,40 N permaneceu superior à obtida para o *honeycomb* na mesma orientação, evidenciando que a arquitetura Giroide mantém melhor capacidade de distribuição das tensões mesmo quando submetida à alteração da orientação estrutural.

Comparando-se os cinco grupos, observa-se que a introdução das estruturas impressas em ABS modificou o comportamento mecânico da matriz epóxi, porém não promoveu aumento da carga máxima quando comparada à resina sem reforço. Em todas as configurações reforçadas verificou-se redução da carga máxima média, indicando que, nas condições de fabricação adotadas, o reforço não atuou como elemento capaz de elevar a resistência à flexão do compósito. Esse comportamento pode estar associado à formação de regiões de descontinuidade na matriz, à diferença de rigidez entre os materiais constituintes e, principalmente, à qualidade da interface entre a resina epóxi e o ABS, fatores que podem favorecer a concentração de tensões e antecipar o início da falha. Além disso, a utilização do reforço em ABS com módulo elástico menor que a matriz de resina epóxi pode favorecer na

diminuição das propriedades mecânicas, levando a um comportamento inferior quando comparado com o da resina pura.

Entretanto, a comparação entre as arquiteturas evidencia que a geometria exerce papel determinante no desempenho mecânico. Entre os compósitos reforçados, a estrutura giroide apresentou comportamento superior ao *honeycomb* nas duas orientações avaliadas, indicando maior eficiência na transferência de cargas e menor sensibilidade às variações do processo de fabricação. Da mesma forma, os resultados demonstram que a orientação do reforço influencia diretamente a resposta mecânica dos compósitos, uma vez que ambas as geometrias apresentaram redução da carga máxima quando posicionadas a 90°, sendo esse efeito mais pronunciado para a estrutura *honeycomb*.

Em conjunto, a análise das curvas força × deslocamento e dos valores de carga máxima demonstra que a eficiência de um reforço arquitetado não depende apenas de sua presença no interior da matriz polimérica, mas principalmente de sua geometria, orientação e interação com a matriz, indicando uma influencia direta no comportamento mecânico sob flexão.

4.2 Tensão máxima e módulo de elasticidade em flexão

A figura 30 apresenta o gráfico com os valores médios da tensão máxima obtidos para os diferentes grupos experimentais.

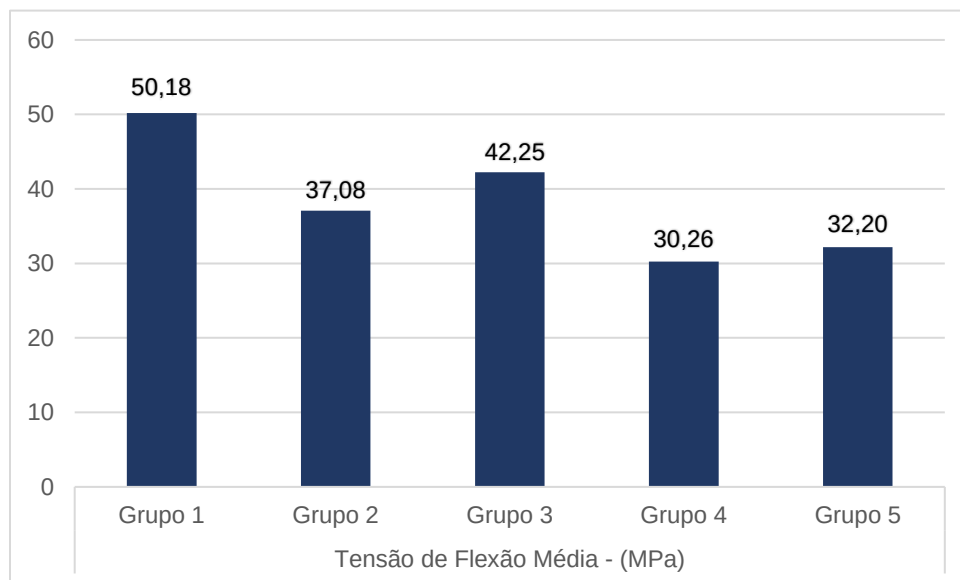


Figura 30. Gráfico de valores de tensão máxima de flexão para os grupos. **Fonte:** Autor (2026)

De maneira geral, observa-se que a introdução das estruturas arquitetadas influenciou significativamente o comportamento mecânico dos compósitos, sendo essa influência

dependente tanto da geometria do reforço quanto da sua orientação em relação à direção de aplicação da carga, corroborando com os resultados anteriores.

Os corpos de prova constituídos apenas pela matriz de resina epóxi apresentaram os maiores valores de tensão máxima à flexão, indicando que, nas condições avaliadas, a matriz pura foi capaz de suportar maiores carregamentos antes da ocorrência da falha. Esse resultado sugere que a incorporação das estruturas impressas em ABS não promoveu aumento da resistência máxima do material. Pelo contrário, em alguns casos observou-se redução da capacidade resistente, indicando que a presença do reforço pode ter introduzido regiões de descontinuidade na matriz ou favorecido concentrações de tensões na interface entre os materiais.

Entre os compósitos reforçados, a geometria **Giroide** apresentou desempenho superior ao da geometria **Honeycomb**, independentemente da orientação adotada. Esse comportamento indica que arquiteturas TPMS favorecem uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo da estrutura, reduzindo regiões críticas de concentração de tensões. Em contrapartida, a geometria *honeycomb*, caracterizada pela presença de paredes planas e interseções entre células, mostrou-se mais suscetível à concentração de tensões e ao início precoce da fratura, principalmente quando posicionada na orientação de 90°.

A influência da orientação do reforço também foi evidenciada pelos resultados obtidos na Figura 30. Para ambas as geometrias, a configuração posicionada a 90° (grupos 4 e 5) apresentou redução da tensão máxima quando comparada à orientação original (grupos 2 e 3), sendo esse efeito mais pronunciado para a estrutura Honeycomb. Esse comportamento demonstra que a orientação das células em relação à direção do carregamento altera significativamente os mecanismos de transferência de carga dentro do compósito, refletindo diretamente na sua resistência mecânica.

Na figura 31 se encontram os valores do módulo de elasticidade em flexão obtidos para os diferentes grupos experimentais respectivamente.

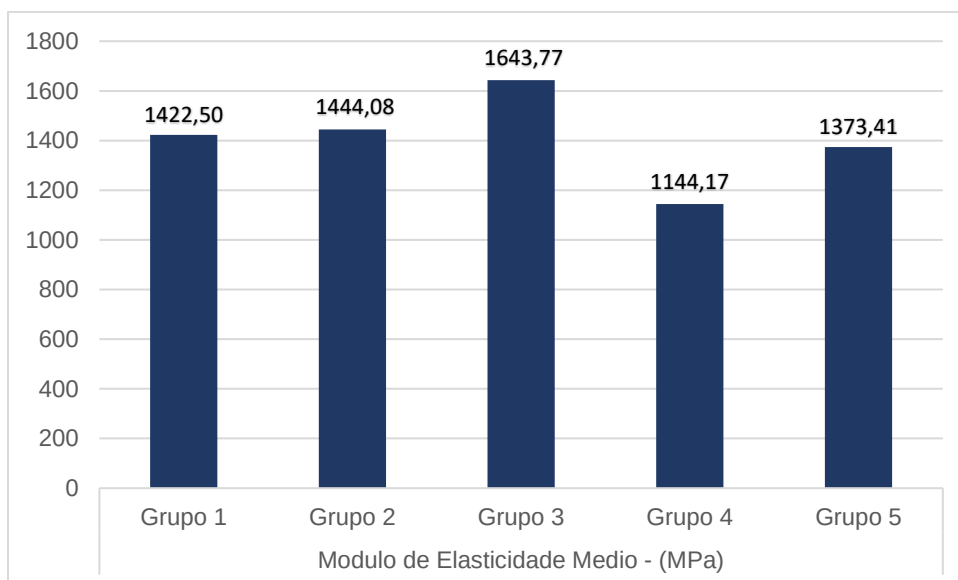


Figura 31. Valores do módulo de elasticidade de flexão para os grupos. **Fonte:** Autor (2026)

Os resultados indicam que a incorporação das estruturas arquitetadas influenciou diretamente na rigidez dos compósitos. Em especial, a geometria giroide (grupo 3) promoveu um aumento aproximado de 15,6% no módulo de elasticidade em relação à resina pura, enquanto a estrutura *honeycomb* (grupo 2) apresentou um incremento discreto de aproximadamente 1,5%. Esse comportamento demonstra que, durante a região elástica do ensaio, as estruturas impressas participaram da transferência de carga, reduzindo a deformação do conjunto para um mesmo nível de carregamento.

Embora o Grupo 1 tenha apresentado a maior tensão máxima à flexão, o valor do módulo de flexão para o mesmo não é o maior pois são fenômenos mecânicos distintos. O módulo de elasticidade está associado à rigidez do material, ou seja, à sua capacidade de resistir às deformações elásticas, enquanto a tensão máxima corresponde à maior tensão suportada antes da ocorrência da falha. Dessa forma, um material pode apresentar elevada rigidez inicial sem, necessariamente, possuir maior resistência à ruptura.

Esse comportamento sugere que, durante os estágios iniciais do carregamento, os reforços arquitetados contribuíram para restringir a deformação da matriz epóxi, aumentando a rigidez global do compósito. Entretanto, à medida que o carregamento se aproximou da carga máxima, fatores como diferenças entre as propriedades mecânicas da resina e do ABS, possíveis descontinuidades na interface matriz-reforço e concentrações de tensões nas regiões de contato favoreceram a nucleação e propagação de trincas, reduzindo a resistência máxima do material quando comparado à resina sem reforço.

A superioridade da geometria Giroide em relação ao *honeycomb* pode ser atribuída à

sua arquitetura baseada em TPMS, caracterizada por superfícies contínuas e ausência de mudanças bruscas de geometria. Essa configuração proporciona caminhos mais eficientes para a distribuição das tensões durante a fase elástica do carregamento, resultando em maior rigidez estrutural. Em contrapartida, a geometria *honeycomb* apresenta paredes planas e junções celulares bem definidas, que podem favorecer concentrações localizadas de tensões e reduzir a eficiência da transferência de carga.

Outro aspecto relevante refere-se à influência da orientação do reforço. Os grupos contendo estruturas posicionadas a 90° apresentaram redução significativa do módulo de elasticidade quando comparados às respectivas orientações originais, sendo esse efeito mais pronunciado para a geometria *honeycomb*. Esse resultado mostra que a orientação da arquitetura interna influencia diretamente a resposta mecânica dos compósitos, indicando comportamento anisotrópico das estruturas produzidas por manufatura aditiva. Nessa condição, a disposição das paredes celulares torna-se menos favorável à transferência de esforços, reduzindo a rigidez global do material.

4.3 Avaliação estatística

A análise estatística foi realizada com o objetivo de verificar a dispersão dos resultados de carga máxima e avaliar se as diferenças observadas entre os grupos experimentais são estatisticamente significativas. Os resultados da estatística descritiva são apresentados na Tabela 3.

Grupo	Carga Máxima (N)					Desvio Padrão (N)	Coef. De Variância (%)
1	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	23,42	5,11 %
	438,6	457,6	479,6	484,8	432,8		
2	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	104,29	30,77 %
	432	350,2	242,6	447,6	222,2		
3	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	12,96	3,35 %
	405,6	388,2	369,6	382,4	385,2		
4	CP 16	CP 17	CP 18	CP 19	CP 20	10,85	3,92 %
	288,6	265,8	278,2	265,2	285,4		
5	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	34,51	9,88%
	309,4	398,8	326	350,2	362,6		

Tabela 3. Análise dos valores de carga máxima e desvio padrão e coeficiente de variância. **Fonte:** Autor. (2026)

A partir dos resultados apresentados, observa-se que o Grupo 1 apresentou a maior carga máxima média (458,68 N), enquanto o Grupo 4 apresentou a menor média (276,64 N). Entre os compósitos reforçados, o Grupo 3, constituído pela resina com estrutura Giroide, apresentou a maior carga máxima média, com 386,20 N, seguido pelos Grupos 5 e 2, com 349,40 N e 338,92 N, respectivamente.

A análise da dispersão evidencia diferenças importantes entre as configurações estudadas. O Grupo 2 apresentou o maior desvio padrão (104,29 N) e coeficiente de variação (30,77%), indicando elevada variabilidade entre os corpos de prova. Essa dispersão é consideravelmente superior à observada nos demais grupos e pode estar relacionada à maior sensibilidade da configuração *honeycomb* às variações decorrentes da fabricação tais como impregnação da matriz e possíveis descontinuidades ou vazios no compósito.

Entretanto, o Grupo 3 apresentou o menor coeficiente de variação (3,35%), indicando elevada repetibilidade dos resultados obtidos para a estrutura Giroide. Os Grupos 4 e 1 também apresentaram baixa dispersão, com coeficientes de variação de 3,92% e 5,11%, respectivamente. O Grupo 5 apresentou variabilidade intermediária, com coeficiente de variação de 9,88%.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a arquitetura interna do reforço exerce influência significativa sobre as propriedades mecânicas dos compósitos, confirmando que o desempenho desses materiais depende não apenas da presença do reforço, mas também da sua geometria e orientação em relação ao carregamento aplicado.

Os ensaios de flexão em três pontos mostraram que a resina epóxi sem reforço apresentou a maior resistência máxima à flexão dentre todos os grupos avaliados. Esse resultado indica que, nas condições de fabricação empregadas neste estudo, a inserção das estruturas impressas em ABS não promoveu incremento da capacidade resistente do material. Tal comportamento sugere que fatores como a adesão interfacial entre a matriz e o reforço, a diferença entre as propriedades mecânicas dos materiais constituintes e possíveis descontinuidades introduzidas durante o processo de fabricação podem ter favorecido a concentração de tensões e antecipado o início da falha.

Entre os compósitos reforçados, a geometria Giroide apresentou desempenho superior ao *honeycomb*, tanto na orientação original quanto na configuração posicionada a 90°, evidenciando maior eficiência na distribuição das tensões durante o carregamento. Além disso, os corpos de prova contendo a estrutura Giroide apresentaram menor dispersão dos resultados experimentais, indicando maior uniformidade estrutural e melhor repetibilidade do processo de fabricação. Em contrapartida, os compósitos reforçados com a geometria *honeycomb* apresentaram maior variabilidade entre os corpos de prova, sugerindo maior sensibilidade a imperfeições geométricas e às condições de processamento.

A avaliação do módulo de elasticidade demonstrou que a introdução das estruturas arquitetadas promoveu aumento da rigidez dos compósitos, principalmente para a geometria Giroide, que apresentou o maior módulo de elasticidade dentre todos os grupos estudados. Esse resultado evidencia que os reforços internos participaram da transferência de carga durante a região elástica do ensaio, restringindo a deformação da matriz. Entretanto, esse aumento de rigidez não foi acompanhado por maior resistência máxima à flexão, demonstrando que rigidez e resistência são propriedades distintas e dependem de diferentes mecanismos de deformação e falha.

A influência da orientação do reforço também foi claramente observada. Em ambas as arquiteturas avaliadas, a configuração posicionada a 90° apresentou redução tanto da resistência máxima quanto do módulo de elasticidade, indicando que a orientação das células em relação à direção de aplicação da carga interfere diretamente nos mecanismos de transferência de esforços e, conseqüentemente, no desempenho mecânico do compósito.

A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os grupos experimentais, demonstrando que a geometria e a orientação das estruturas arquitetadas influenciaram de forma direta o comportamento mecânico dos materiais produzidos. Esses resultados reforçam a importância do projeto geométrico das estruturas celulares e evidenciam que a incorporação de um reforço arquitetado não garante melhoria das propriedades mecânicas, sendo necessária a otimização simultânea da geometria, da orientação e da qualidade da interface matriz-reforço.

Dessa forma, é possível inferir que as estruturas arquitetadas produzidas por manufatura aditiva apresentam elevado potencial para aplicações em compósitos estruturais, especialmente quando o objetivo é aumentar a rigidez específica do material. No entanto, para que essas arquiteturas também promovam ganhos de resistência mecânica, torna-se fundamental otimizar aspectos relacionados à adesão interfacial entre o ABS e a resina epóxi, bem como os parâmetros de fabricação e o próprio projeto estrutural das geometrias utilizadas.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises fractográficas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de identificar os mecanismos de falha responsáveis pela redução da resistência dos compósitos reforçados. Além disso, sugere-se investigar outras arquiteturas celulares, diferentes frações volumétricas de reforço, tratamentos superficiais para melhoria da adesão entre matriz e reforço, bem como a avaliação do comportamento mecânico em ensaios de tração, impacto e fadiga. Tais estudos poderão contribuir para o desenvolvimento de compósitos produzidos por manufatura aditiva com desempenho mecânico superior e ampliar sua aplicação em setores como a indústria aeroespacial, automotiva e de equipamentos de proteção.

6. REFERÊNCIAS

ALBERTO, L. G. S.; ANFLOR, C. T. M.; SANTANNA, E. D. M. **Estudo numérico e experimental de compósitos em fibra de carbono com núcleo fabricado em manufatura aditiva**. Monografia (Graduação em Engenharia Automotiva) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.23286.20805.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6272: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

BARBERO, Ever J. **Finite element analysis of composite materials using Abaqus®**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CREALITY. **K1C 3D printer**. [S. l.]: Creality, [s.d.]. Disponível em: . Acesso em: 9 ago. 2026.

DEL PINO, G. G. et al. **Análise de estruturas sanduíches com lâminas de material compósito de resina com e sem reforço de fibra de juta e núcleos *honeycomb* de ABS, PLA e PETG feitos em impressora 3D**. Caderno Pedagógico, v. 22, n. 6, e15381, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n6-057.

DEL PINO, G. G. et al. **Avaliação das propriedades mecânicas dos materiais mais utilizados em impressão 3D através de ensaios de tração, flexão e compressão**. Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible, v. 19, n. 81, e9602, 2026. DOI: 10.55905/rdelosv19.n81-076.

FORTULAN, C. A. et al. **Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM**. ResearchGate, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321162555>. Acesso em: jun. 2026.

GOHAR, Sohail; HUSSAIN, Ghulam; ALI, Aaqib; AHMAD, H. **Mechanical performance of *honeycomb* sandwich structures built by FDM printing technique**. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 36, n. 1, p. 3–21, 2023. DOI: 10.1177/0892705721997892.

ISO; ASTM INTERNATIONAL. **ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing — General principles — Terminology**. 2. ed. Geneva: International Organization for Standardization; West Conshohocken: ASTM International, 2021.

Lambiase, F.; Pace, F.; Andreucci, E. **Design guidelines for FDM-processed PEEK lattice structures: A comparative study**. Springer, 2025. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-16774-3>.

Layeb, N.; Oldal, I.; Zsidai, L. **Flexural strength evolution of 3D printed PLA-CF structures: optimization of FDM parameters for enhanced mechanical performance**. Springer, 2026. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40712-026-00424-x>.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

MARGEM, F. M. et al. **Avaliação da resistência à tração e do módulo de elasticidade do compósito de matriz epóxi reforçado com tecido de cânhamo**. ResearchGate, 2022.

OLIVEIRA, A. M. et al. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de materiais usuais: uma revisão de literatura**. Monografia — Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/9470>. Acesso em: jun. 2026.

OSWALDO FILIZOLA. **Máquinas universais de ensaios**. São Paulo: Oswaldo Filizola, [s.d.]. Acesso em: 25 junho. 2026.

Popovich, V. A. et al. **Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties**. *Materials & Design*, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.10.075
REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

SAMUDIN et al. **Mechanical performance and failure analysis of 3D-printed biodegradable polymer reinforced with carbon fiber in gyroid structures: a compression-tension comparative study**. *Iranian Polymer Journal*, 2026. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13726-026-01642-y>.

Sukumaar, V. N. et al. **A comprehensive review on the influence of fused deposition modelling (FDM) process parameters upon thermoplastic composite materials**. ScienceDirect, 2025. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504825000685>.

SUPREEM CARBON. *Analysis of delamination problems in carbon fiber products and how to avoid it*. [S. l.], 31 out. 2025. Disponível em: [Supreem Carbon](#). Acesso em: 2 jul. 2026.
VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p. ISBN 978-85-212-1150-1

WANG et al. **Mechanical Behavior of FDM Printed CF-3D Gyroid Structure Under Bending Moment: A Combined Experimental and Numerical Study**. *Polymer Composites*, 2026. DOI: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.71128>.

WANG, Y.; ZHANG, H.; LI, Y.; et al. **Effect of absorbent foam filling on mechanical behaviors of 3D-printed honeycombs**. *Polymers*, v. 12, n. 9, art. 2059, 2020. DOI: 10.3390/polym12092059.

Yu, S.; Sun, J.; Bai, J. **Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by**

additive manufacturing, Materials & Design, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>

ZHENG, X. et al. **Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials**. *Science*, v. 344, n. 6190, p. 1373–1377, 2014.

ZHU, L.; LI, N.; CHILDS, P. R. N. **Light-weighting in aerospace component and system design**. *Propulsion and Power Research*, v. 7, n. 2, p. 103–119, 2018. DOI:
10.1016/j.jprr.2018.04.001

3D FILA. **Filamento ABS Premium+ 1,75 mm**. Belo Horizonte: 3D Fila, [s.d.]. Disponível em: . Acesso em: 9 ago. 2026.

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

 Documento assinado digitalmente
WENDELL BRUNO ALMEIDA BEZERRA
Data: 18/08/2026 13:29:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data e local da assinatura eletrônica