

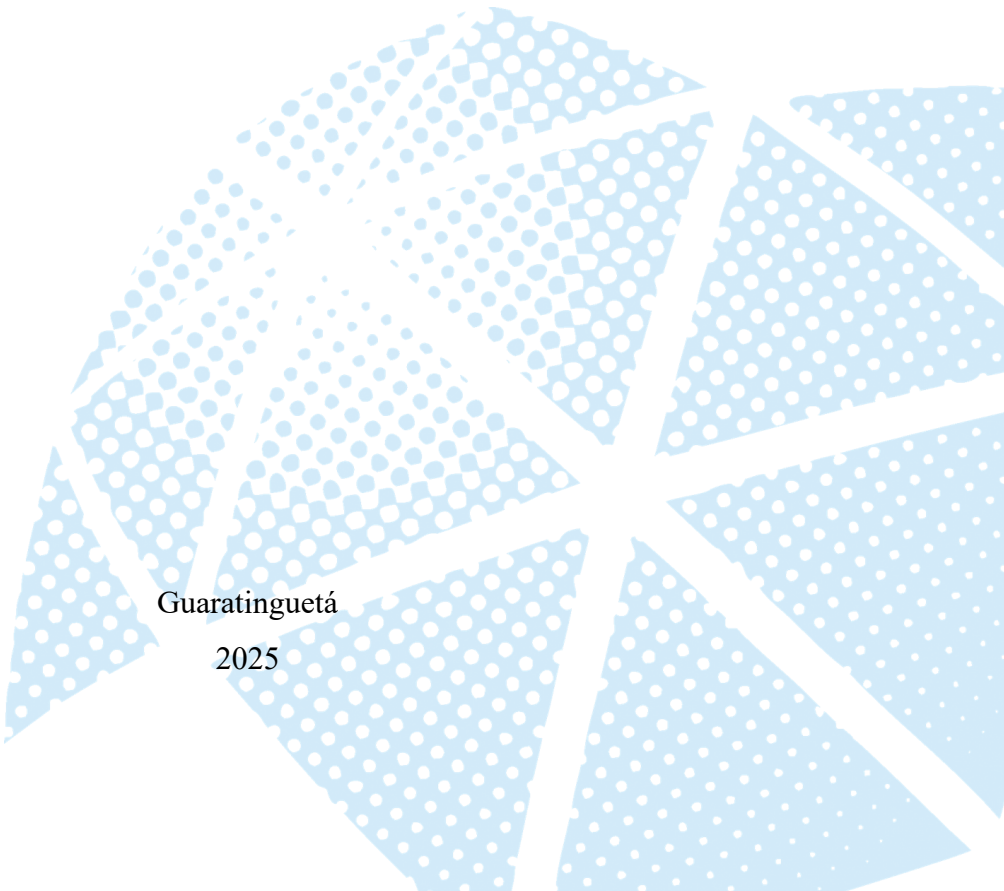
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá

CARLA CARVALHO PINTO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE VAZIOS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AMOSTRAS IMPRESSAS EM DISPOSITIVOS MSLA**

Guaratinguetá

2025



CARLA CARVALHO PINTO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE VAZIOS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AMOSTRAS IMPRESSAS EM DISPOSITIVOS MSLA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, do Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Coorientador(a): Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

Guaratinguetá

2025

P659e	Pinto, Carla Carvalho Estudo da influência do grau de vazios nas propriedades mecânicas de amostras impressas em dispositivos MSLA / Carla Carvalho Pinto - Guaratinguetá, 2025. 99 f : il. Bibliografia: f. 94-97 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador(a): Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva Coorientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi 1. Manufatura aditiva. 2. Impressão tridimensional. 3. Desenvolvimento sustentável. Título.
	CDU 681.5(043)

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O mercado global da manufatura aditiva, avaliado em cerca USD 14 bilhões em 2021, projeta alcançar USD 76 bilhões até 2030. Além da sua relevância econômica, a manufatura aditiva tem sido apontada como uma importante aliada na busca de processos manufatureiros mais sustentáveis, seja por meio da redução do uso de matéria prima, da redução de resíduos, do uso de materiais menos danosos ao ambiente ou da otimização dos processos de produção. Desse modo, o estudo da influência do grau de vazios nas propriedades mecânicas de materiais impressos auxilia na busca de parâmetros de processo que permitam uma minimização do uso de materiais poliméricos possibilitando uma redução do custo ambiental e econômico do processo produtivo. Além disso, a ampliação dos estudos de impressão 3D contribui com a região, uma vez que o campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na cidade de Guaratinguetá, está situado em uma área estratégica para o Brasil, com polos industriais focados na indústria automotiva e aeronáutica.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The global additive manufacturing market, valued at around USD 14 billion in 2021, is projected to reach USD 76 billion by 2030. In addition to its economic relevance, additive manufacturing has been identified as an important ally in the effort to create more sustainable manufacturing processes, whether by reducing raw material usage, minimizing waste, using less harmful materials to the environment, or optimizing production processes. In this way, studying the influence of hollowness degree on the mechanical properties of printed materials helps in identifying process parameters that allow for a reduction in the use of polymeric materials, enabling both environmental and economic cost reductions in production processes. Moreover, expanding research on 3D printing contributes to the region, as the campus of São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho” in Guaratinguetá is located in a strategic area for Brazil, with industrial hubs focused on the automotive and aerospace industries.

CARLA CARVALHO PINTO

**Estudo da Influência do Grau de Vazios nas Propriedades Mecânicas de
Amostras Impressas em Dispositivos mSLA.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestra em Engenharia

Data da defesa: 27/06/2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA

Orientador - UNESP



Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO

CEETEPS



Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES

UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pois tudo o que tenho, o que sou e o que vier a ser vem Dele. Agradeço também a Maria, Santa Mãe de Deus que intercedeu por mim e passou à frente em todos os momentos.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a meus orientadores, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva e Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi, pelas orientações acadêmicas, conhecimentos transferidos e pelo tempo e paciência dedicado a esse trabalho.

Gostaria de agradecer também a meu esposo Leandro, que por diversas vezes segurou à minha mão e me passou serenidade, sobretudo em momentos de angústia, como na confecção desse trabalho. Gostaria de fazer um agradecimento ao meus pais e de maneira especial à minha avó Maria Ilma (*in memorian*) que sempre me incentivou a estudar e me ensinou que o estudo muda a vida das pessoas.

Agradecer à UNESP também, universidade que tenho muito orgulho. Esses anos me ofereceram oportunidades incríveis, além de um imenso aprendizado pra vida. Seus colaboradores da biblioteca e dos laboratórios de informática no bloco 6 estavam sempre com boa vontade para ajudar, e por isso sou grata. Além disso, gostaria de agradecer ao Departamento de Materiais, pelo suporte técnico com os equipamentos e pela disponibilidade dos profissionais, que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva se apresenta como uma nova alternativa para construção de peças com flexibilidade de design e economia de material. Sua qualidade, durabilidade e propriedades mecânicas tem sido estudada a fim de viabilizar cada vez mais o uso da técnica pelas indústrias. Esse modelo de manufatura representa uma revolução nos métodos de fabricação, já que demandam o mínimo de interação humana. A estereolitografia mascarada (mSLA) é uma técnica de manufatura aditiva que utiliza resina fotocurável como matéria prima no processo de fabricação de peças. O estudo de vazios associadas a essa técnica é fundamental para entender seu impacto nas propriedades mecânicas do material. Para realizar tal estudo o trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira parte trata do estudo de concentradores de tensão em placas planas variando a relação diâmetro versus largura da placa, avaliando corpos de prova submetidos a carregamentos axiais e excêntricos. Para as amostras submetidas a carregamentos axiais a validação dos resultados ocorreu com a comparação entre o método analítico de Whitney Nuismer, correlação digital de imagens e método dos elementos finitos. Para as amostras submetidas a carregamentos excêntricos, a validação dos resultados ocorreu pelo método dos elementos finitos e correlação digital de imagens. Uma vez compreendido o comportamento mecânico de amostras com um furo central, foi possível expandir a análise para modelos mais complexos. Nesse sentido, a segunda parte tem como foco a introdução de uma cadeia de vazios em corpos de prova modificando a geometria e porcentagem de vazios afim de analisar o seu impacto nas propriedades mecânicas do material. Dessa forma, foram avaliadas as configurações circular com galerias, hexagonal com galerias e de dutos, para as porcentagens de 15%, 23% e 32%. As amostras foram submetidas a ensaios de tração e a ensaios de flexão em três pontos. A validação dos resultados ocorreu pela comparação dos métodos dos elementos finitos e correlação digital de imagens. A consistência dos resultados encontrados reforça a qualidade da técnica empregada, demonstrando que este estudo não apenas atingiu seus objetivos como também forneceu uma base para futuras investigações na área.

Palavras-chave: estereolitografia mascarada; manufatura aditiva; vazios; resina fotocurável.

ABSTRACT

Additive manufacturing presents itself as a new alternative for building parts with design flexibility and material savings. Its quality, durability, and mechanical properties have been studied in order to increasingly enable the use of the technique by industries. This manufacturing model represents a revolution in manufacturing methods, as it requires minimal human interaction. Masked stereolithography (mSLA) is an additive manufacturing technique that uses photocurable resin as raw material in the process of producing parts. The study of voids associated with this technique is fundamental to understanding its impact on the mechanical properties of the material.

To carry out such a study, the work was conducted in two stages. The first part deals with the study of stress concentrators in flat plates by varying the diameter-to-width ratio of the plate, evaluating specimens subjected to axial and eccentric loading. For samples subjected to axial loading, the validation of the results was done through comparison between the analytical method of Whitney-Nuismer, digital image correlation, and the finite element method. For samples subjected to eccentric loading, the validation of the results was done using the finite element method and digital image correlation.

Once the mechanical behavior of samples with a central hole was understood, it was possible to expand the analysis to more complex models. In this regard, the second part focuses on the introduction of a chain of voids in the specimens, modifying the geometry and void percentage in order to analyze their impact on the mechanical properties of the material. Thus, the configurations evaluated were circular with galleries, hexagonal with galleries, and duct-shaped, for void percentages of 15%, 23%, and 32%. The samples were subjected to tensile tests and three-point bending tests. The validation of the results was done by comparing the finite element method and digital image correlation. The consistency of the results found reinforces the quality of the technique employed, demonstrating that this study not only achieved its objectives but also provided a foundation for future investigations in the field.

Keywords: masked stereolithography; additive manufacturing; voids; photocurable resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da evolução das diferentes tecnologias de impressão 3D que realizam a manufatura através do processo de cura.	21
Figura 2 – Distribuições de tensão em uma placa plana com furo central.	25
Figura 3 – Ambiente do software CHITUBOX.....	30
Figura 4– (a) impressora Elegoo em operação. (b) Câmara de lavagem. (c) Câmara de luz UV com corpos de prova.....	32
Figura 5– Máquina SHIMADZU no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de tração.	33
Figura 6– Representação bidimensional do corpo de prova com dimensões em mm.	34
Figura 7– ROI definido para análise de deformação no Ncorr.....	35
Figura 8 – Modelo de corpo de prova com malha.	36
Figura 9 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga axial.....	37
Figura 10 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga excêntrica considerando a restrição da garra.	38
Figura 11 – Máquina SHIMADZU no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de tração.	39
Figura 12 – Representação bidimensional do corpo de prova com dimensões em milímetros.	39
Figura 13 – Ilustração da vista frontal e superior da célula unitária.....	40
Figura 14 – Corpo de prova de configuração circular com resina líquida confinada na amostra.	41
Figura 15 – Modelo do corpo de prova circular com as galerias a) peça completa e b) modelo seccionado.	42
Figura 16 – Modelo do corpo de prova hexagonal com as galerias a) peça completa e b) modelo seccionado.	43
Figura 17 – Modelo do corpo de prova de dutos a) peça completa e b) modelo seccionado...44	
Figura 18 – Corpos de prova das configurações a) circular com galerias b) hexagonal com galerias e c) dutos após serem submetidos ao ensaio de tração.....	46
Figura 19 – ROI definido para análise de deformação no Ncorr.....	46
Figura 20 – Modelos de corpo de prova seccionado com malha para as configurações a) circular com galerias; b) hexagonal com galerias e c) com dutos.	47
Figura 21 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga axial.....	48

Figura 22 – Ambiente de testes no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de flexão.	49
Figura 23 – Configuração a) circular com galerias; b) hexagonal com galerias e c) com dutos de corpos de prova utilizado em ensaios de flexão.	49
Figura 24 – Corpos de prova das configurações a) circular com galerias b) hexagonal com galerias e c) dutos após serem submetidos ao ensaio de flexão em três pontos.	50
Figura 25 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de flexão em três pontos.	51
Figura 26– Curva média tensão x deformação dos corpos de prova.	52
Figura 27 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,3$	53
Figura 28 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,4$	53
Figura 29 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,5$	54
Figura 30 – Campos de deformação obtidos por MEF com dados ao redor do furo de espécimes submetidos à carga axial para (a) $d/w = 0,3$; (b) $d/w = 0,4$; e (c) $d/w = 0,5$	55
Figura 31 – Campo de deformação obtido por MEF para corpos de prova submetidos a carga axial para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$	57
Figura 32 – Campo de tensões obtido por MEF para corpos de prova submetidos a carga axial para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$..	58
Figura 33 – Gráfico comparativo dos métodos Whitney-Nuismer, MEF e DIC para espécimes submetidos a carga axial.....	59
Figura 34 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,3.....	60
Figura 35 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,4.....	61
Figura 36 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,5.....	62
Figura 37 – Campos de deformação obtidos por MEF com dados ao redor do furo de corpos de prova submetidos a cargas excêntricas para (a) $d/w = 0,3$; (b) $d/w = 0,4$; e (c) $d/w = 0,5$	63
Figura 38 – Campo de deformação obtido por MEF para corpos de prova submetidos à carga excêntrica para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$	66
Figura 39 – Campo de tensões obtido por MEF para corpos de prova submetidos à carga excêntrica (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$	67

Figura 40 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração circular com galerias e porcentagem de 32% de vazios.	68
Figura 41 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração hexagonal com galerias e porcentagem de 32% de vazios.	68
Figura 42 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração de dutos e porcentagem de 32% de vazios.	69
Figura 43 – Campos de deformação obtidos por MEF com resultados na região central de espécimes submetidos a cargas axiais de porcentagens de 32% de vazios das configurações (a) circular com galerias; (b) hexagonais com galerias; e (c) dutos.....	69
Figura 44 – Campos de tensão obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	73
Figura 45 – Campos de tensão obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.	75
Figura 46 – Campos de deformação obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	76
Figura 47 – Gráfico tensão x porcentagem de vazios em relação as configurações estudadas para corpos de prova submetidos à tração.	78
Figura 48 – Ambiente de análise dos corpos de prova.	78
Figura 49 – Cavidade do corpo de prova da configuração circular com galerias livre de resina residual.....	79
Figura 50 – Cavidade do corpo de prova da configuração hexagonal com galerias livre de resina residual.....	80
Figura 51 – Cavidade do corpo de prova da configuração de dutos livre de resina residual. ..	80
Figura 52 – Cavidade do corpo de prova da configuração circular com galerias apresentando resina residual.	81
Figura 53 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	83
Figura 54 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	84

Figura 55 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	86
Figura 56 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	87
Figura 57 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	88
Figura 58 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.	89
Figura 59 – Gráfico tensão x porcentagem de vazios em relação as configurações estudadas para corpos de prova submetidos à flexão em três pontos.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Impressão.	30
Tabela 2 – Parâmetros da resina disponibilizados pelo fornecedor.....	32
Tabela 3 – Relação diâmetro-largura (d/w) dos corpos de prova.....	33
Tabela 4 – Quantidade de elementos e nós para cada estrutura.	36
Tabela 5 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo circular com galerias.....	45
Tabela 6 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo hexagonal com galerias.....	45
Tabela 7 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo de dutos.	45
Tabela 8 – Quantidade de nós e elementos para todas as configurações e porcentagens analisadas.....	48
Tabela 9 – Dados experimentais dos cinco corpos de prova, incluindo os valores de deformação-tensão juntamente com sua média e desvio padrão.	52
Tabela 10 – Resultados de tensão nominal obtidos por DIC para cada d/w.	54
Tabela 11 – Deformação média dos furos para cada relação d/w e valores obtidos por DIC.	56
Tabela 12 – Resultados da análise MEF de tensão e deformação para espécimes submetidos à carga axial.....	56
Tabela 13 – Resultados de Kt encontrados por Whitney–Nuismer, MEF e DIC.....	59
Tabela 14 – Resultados de tensão nominal obtidos por DIC para ambos os lados da amostra e para cada d/w.	62
Tabela 15 – Deformação média e máxima dos furos para as relações d/w e valores encontrados pelo método DIC no lado esquerdo.	64
Tabela 16 – Deformação média dos furos para as relações d/w e valores encontrados pelo método DIC no lado direito.	65
Tabela 17 – Resultados da análise MEF de tensão e deformação para amostras submetidas à carga excêntrica.	65
Tabela 18 – Deformação média para cada configuração de corpo de prova provenientes de análise MEF e análise DIC.....	71
Tabela 19 – Resultados de deformação, tensão e deslocamento provenientes de análise MEF.	72

Tabela 20 – Resultados experimentais dos corpos de prova das configurações circular com galerias, hexagonais com galerias e de dutos para 32% de vazios.	82
Tabela 21 – Comparação de deslocamento e tensão entre os métodos experimentais e a análise de elementos finitos.	90
Tabela 22 – Resultados de deformação, tensão e deslocamento provenientes de análise MEF.	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	16
1.2	OBJETIVOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	MANUFATURA ADITIVA	19
2.2	ESTEREOLITOGRAFIA MASCARADA – MSLA	21
2.3	CONCENTRADOR DE TENSÃO	23
2.4	ESTRUTURAS VAZADAS	25
2.5	SIMULAÇÃO	27
2.6	CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	PROCEDIMENTOS GERAIS PARA IMPRESSÃO	30
3.2	ESTUDO DE PLACA COM FURO CENTRAL.....	32
3.2.1	Corpo De Prova e Equipamentos	32
3.2.2	Ensaios	34
3.2.3	Análise de Elementos Finitos	35
3.2.4	Método Analítico.....	38
3.3	ESTUDO DE CADEIA DE FUROS	38
3.3.1	Ensaio de Tração	38
3.3.1.1	Corpo de Prova e Equipamentos: Parâmetros Gerais	38
3.3.1.2	Ensaios Experimentais	45
3.3.1.3	Análise de Elementos Finitos	47
3.3.2	Ensaio de Flexão	48
3.3.2.1	Corpo de Prova e Equipamentos: Parâmetros Gerais	48
3.3.2.2	Ensaios	50
3.3.2.3	Análise de Elementos Finitos	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	ESTUDO DE PLACA COM FURO CENTRAL.....	52
4.1.1	Corpo De Prova Submetido a Carga Axial	52
4.1.2	Corpo De Prova Submetido a Carga Excêntrica	59
4.2	ESTUDO DE CADEIA DE FUROS.....	67
4.2.1	Corpo De Prova Submetido a Ensaio de Tração	67

4.2.2	Corpo de Prova Submetido a Ensaio de Flexão.....	81
5	CONCLUSÃO.....	92
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O crescimento da população mundial e do consumo desenfreado tem sido motivo de preocupação para os governos e para a comunidade científica em geral, especialmente devido ao aumento da emissão de gases do efeito estufa e suas consequências sobre as mudanças climáticas (Kokare; Oliveira; Godina, 2023).

Dados apontam que o setor manufatureiro é responsável por 25% das emissões globais de CO_2 . Desse modo, torna-se necessário que a sociedade busque soluções sustentáveis a fim de minimizar os impactos ambientais causados pelo setor de manufatura. Nesse contexto, a manufatura aditiva, conhecida como impressão 3D, surge com uma importante alternativa, inovadora e mais sustentável, em relação às técnicas tradicionais de fabricação (Yousaf; Al Rashid; Polat; Koç, 2024).

A manufatura aditiva corresponde a um processo de união de materiais para fazer objetos a partir de dados de um modelo 3D depositando camadas até finalizar a estrutura modelada. A tecnologia de manufatura aditiva é eficiente e tem diversos benefícios em relação às técnicas tradicionais de fabricação como uma maior velocidade de fabricação, uma maior precisão dos objetos produzidos e também uma redução na quantidade de matéria prima utilizada, podendo ser uma aliada na busca pelo aumento da sustentabilidade no processo manufatureiro (Kanishka; Acherjee, 2023).

Nesse trabalho a técnica que será utilizada para a impressão 3D será a estereolitografia mascarada (mSLA) que utiliza resinas fotocuráveis como matéria prima na fabricação de peças. Como se trata de uma técnica que tem sido recentemente explorada, há uma constante mudança no processamento de novos materiais para atender as demandas de novas aplicações (Tamez; Taha, 2021).

O estudo de vazios é fundamental para entender como eles interferem nas propriedades mecânicas do material. Muitas vezes, furos ou aberturas são utilizados a fim de reduzir peso, facilitar acessos ou otimizar serviços de manutenção. Em áreas que possuem descontinuidades a tensão aumenta significativamente, podendo levar ao material uma falha prematura. A possibilidade da fabricação de peças com vazios no seu interior, sem prejuízo as suas propriedades mecânicas, possibilitaria economia de material e evitaria o uso excessivo de materiais poliméricos o que proporcionaria um ganho do ponto de vista ambiental (Patel; Desai, 2020).

No trabalho proposto nesse documento avaliou-se o impacto provocado pelo grau de vazios nas propriedades mecânicas. Assim, foi realizado um estudo prévio, onde foram analisados corpos de prova com um único furo central, pois a partir da compreensão de seu efeito isolado seria possível facilitar a compreensão para análises mais complexas. Com base nesse entendimento, foi adicionada uma cadeia de furos circulares para avaliar como essa modificação influencia o comportamento mecânico do material. Posteriormente foi possível introduzir cavidades hexagonais nos corpos de prova e também a introdução de dutos.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral investigar a relação entre o efeito da introdução de cavidades ocas na estrutura interna de resinas fotocuráveis e suas propriedades mecânicas.

Os objetivos específicos são:

- Analisar o efeito da introdução de um furo central em uma placa plana no comportamento mecânico de peças fabricadas por dispositivos mSLA;
- Analisar o efeito da introdução de uma cadeia de furos variando a geometria e a porcentagem de vazios no comportamento mecânico das peças;
- Avaliação da redução de quantidade de material presente em peças impressas, para minimizar o custo ambiental e econômico do processo de impressão.

1.3 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

A pauta ambiental tem sido motivo de preocupação para governos, sociedades e da comunidade científica. A Organização das Nações Unidas (ONU) lançou em 2015 os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável afim de fomentar soluções para o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, esse trabalho buscou estudar uma alternativa sustentável afim de diminuir a quantidade de polímero utilizado em peças impressas em dispositivos mSLA evitando assim desperdício de material. Esse objetivo está alinhado com o compromisso ético dos engenheiros de promover soluções sustentáveis.

Além disso, são escassos na literatura estudos que investiguem a relação de vazios em amostras de resinas fotocuráveis. Dessa forma, esse trabalho contribui para a disseminação de novas abordagens experimentais no estudo desse material. Além disso, a técnica pode ser utilizada em diferentes aplicações nos setores aeroespacial, automotivo e químico proporcionando desenvolvimento para a região.

1.4 IMPACTO POTENCIAL DA PESQUISA

Esse estudo tem efeitos significativos sob diferentes perspectivas. A ampliação do estudo de impressão 3D contribui com a região, uma vez que o campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na cidade de Guaratinguetá, está situado em um local estratégico para o Brasil. Em um raio de 100 km encontram-se dois importantes polos industriais, os das cidades de Resende – RJ e São José dos Campos – SP. A região de Resende contempla indústrias de diversos setores, com a predominância de indústrias do setor automobilístico, como a Volkswagen Caminhões e Ônibus, Nissan Motors, Hyundai Heavy Industries e Peugeot Automotive Industries. Além disso, outros setores também estão instalados ali, como a Michelin Pneus e Arcelormittal Aços Longos. Na cidade de São José dos Campos encontra-se a Embraer, uma das maiores fabricantes de aeronaves do mundo e no mesmo setor, há também a Boeing. Além disso a cidade conta com a fábrica da General Motors (GM) e uma variedade de indústrias do setor eletroeletrônico, como a Panasonic, Ericsson e Philips.

Tendo em vista o crescimento da manufatura aditiva, a academia tem se dedicado a estudar e entender os parâmetros relacionados a impressão que fornecem garantia de qualidade da peça e boas propriedades mecânicas. Nesse contexto, esse projeto pretende contribuir com o setor acadêmico na medida em que propõe relacionar os vazios presentes na estrutura interna do material impresso na impressora 3D com as suas propriedades mecânicas. Além disso, a possibilidade da fabricação de peças com vazios no seu interior, sem prejuízo as suas propriedades mecânicas, possibilitaria economia de material e evitaria o uso excessivo de materiais poliméricos que poderiam causar algum dano ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A técnica de construir componentes camada por camada utilizada na manufatura aditiva contrasta com modelos de manufatura tradicionalmente utilizados como a manufatura subtrativa. Nessa última, utiliza-se um sólido para a partir dele remover material até se obter a peça desejada. São exemplos dessa técnica o torneamento e o fresamento (Kanishka; Acherjee, 2023).

Quando se trata da manufatura subtrativa, peças que possuem muitos detalhes e alta complexidade exigem uma investigação profunda a fim de determinar a melhor sequência para fabricar certas características, o melhor ferramental e a melhor técnica para fabricar tal componente (Kanishka; Acherjee, 2023). Ao contrário disso, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, traz consigo a simplicidade de demandar a modelagem da peça desejada e conhecimento técnico para a operação da máquina.

A manufatura aditiva tem transformado gradualmente as indústrias pela flexibilidade de design, economia de material e fabricação econômica, mesmo em baixos volumes. Os princípios da indústria 4.0 englobam a manufatura aditiva pois, uma vez configurada, demandam o mínimo de interação humana. O monitoramento da produção em tempo real também é possível pela interconectividade. A facilidade de produção de peças fabricadas em impressora 3D traz consigo uma contribuição significativa para as indústrias, uma vez que torna possível uma fabricação local, reduzindo a dependência de fábricas centralizadas (Kanishka; Acherjee, 2023).

O rápido desenvolvimento dos processos de manufatura tem influenciado de forma importante a economia global ao converter matérias-primas em produtos acabados para o consumo. Na União Europeia (EU), por exemplo, o setor manufatureiro representa cerca de 15% do seu produto interno bruto (PIB). Apesar disso, a expansão do setor não apenas gera bens e serviços, mas é responsável por quase 26% do consumo final de energia e por aproximadamente 23% das emissões totais de gases do efeito estufa (Jayawardane; Davies; Gamage; John *Et Al.*, 2023) ; (Kokare; Oliveira; Godina, 2023).

A Organização das Nações Unidas (ONU), através dos “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” (ODS), tem incentivado as indústrias, os governos e a sociedade a buscarem alternativas mais sustentáveis para os processos produtivos. O ODS 9, por exemplo, destaca a importância de se desenvolver uma infraestrutura regional, de qualidade, confiável e

sustentável e fomenta a inovação e a pesquisa científica como fatores preponderantes para alcançarmos um desenvolvimento sustentável (ONU, 2015). Nesse contexto, a manufatura aditiva pode se apresentar como uma aliada do meio ambiente, ao reduzir o desperdício de matéria prima, reduzir o consumo de energia, permitir a produção local e facilitar a manufatura sob demanda, evitando a necessidade de estoques e reduzindo as necessidades de transporte (Priyadarshini; Kr; Ruchi; Atanu *et al.*, 2025).

Com a expansão das técnicas de manufatura aditiva, a indústria tem realizado aos poucos a migração de tecnologia pois a complexidade de uma peça que pode ser fabricada na impressora 3D era anteriormente considerada inatingível por meio das técnicas tradicionais. Na impressão 3D o esforço para fabricar um cubo é o mesmo que para fabricar uma geometria altamente complexa (Li; Mcpartland; Gutierrez; Pedersen *et al.*, 2024).

A manufatura aditiva pode utilizar como matéria prima cerâmicas, metais e polímeros. Os polímeros são macromoléculas, ou seja, uma série de monômeros ligados repetidamente. Devido a sua facilidade de mudança de estado físico, ele é o material mais utilizado na impressão 3D (Manoj Prabhakar; Saravanan; Haiter Lenin; Jerin Leno *et al.*, 2021).

Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos ou termorrígidos (termofixos). Os termoplásticos são a classe de polímeros mais comumente utilizada e englobam materiais como ABS e PLA (Tamez; Taha, 2021). No entanto, nas últimas décadas a utilização dos termorrígidos tem se expandido e ganhado relevância devido a uma série de vantagens, como a estabilidade térmica, resistência química, resistência a solventes e resistência mecânica. Por isso eles têm sido utilizados para substituir metais e ligas em diversos ramos da indústria em uma ampla gama de aplicações, como médica, engenharia, aeroespacial, robótica, marítima, e energia, entre outras, fazendo-os cada vez mais necessários para a sociedade contemporânea. Diferentemente dos termoplásticos, os termorrígidos não podem ser facilmente remodelados após a sua fabricação devido às ligações cruzadas de alta densidade formadas durante o processo de cura, tornando os polímeros produzidos irreversíveis. Essa característica torna os termorrígidos materiais adequados para a produção de componentes permanentes e formas sólidas de grande porte (Wang; Yang; Shen; Li *et al.*, 2022).

A indústria automotiva tem buscado utilizar polímeros em substituição a outros materiais, principalmente os metais. Atualmente, um automóvel médio, tem massa aproximada de 1.300 kg, das quais 15% correspondem a materiais poliméricos (Júnior; Belini; Ellenberger; Keinert, 2020). A BMW já incorpora a manufatura aditiva de metais na produção de seus veículos. Como o principal material utilizado na manufatura aditiva são os polímeros, seria possível viabilizar componentes automotivos fabricados na impressora 3D. Além da indústria

automobilística, há estudos que afirmam que utilizando manufatura aditiva o tempo de produção de aeronaves pela Boeing se reduziria em 25% (Kanishka; Acherjee, 2023).

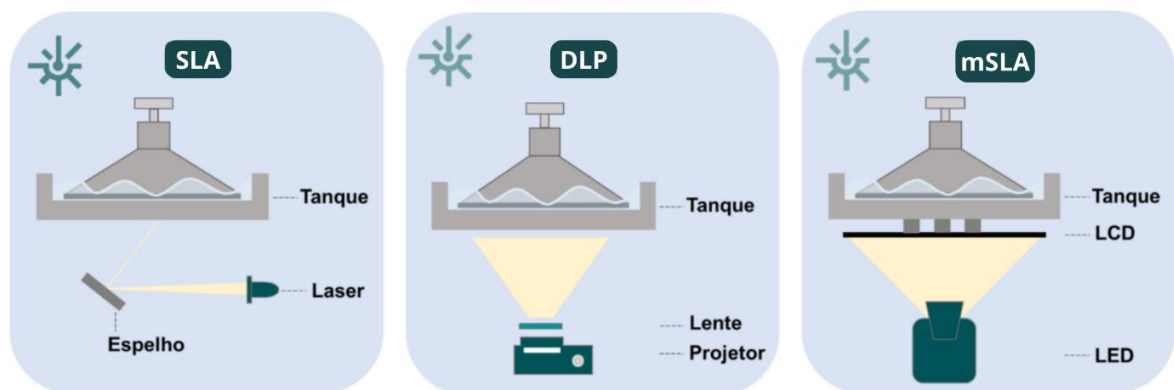
Pesquisas recentes apontam para uma expectativa de um crescimento anual de 18,2% até 2026 no mercado de manufatura aditiva. O mercado global de manufatura aditiva, avaliado em USD 13,89 bilhões em 2021, está previsto para alcançar aproximadamente USD 76,20 bilhões até 2030, com uma esperada taxa de crescimento anual de 20,9% de 2022 a 2030 (Kanishka; Acherjee, 2023).

2.2 ESTEREOLITOGRAFIA MASCARADA – MSLA

Há diversas técnicas utilizadas na manufatura aditiva de polímeros, são elas: modelagem por deposição fundida (FDM), estereolitografia (SLA), VAT fotopolimerização, estereolitografia mascarada (mSLA), processamento de luz digital (DLP), sinterização a laser seletiva (SLS), jateamento de material (MJ), fusão por feixe de elétrons (EBM) e fusão seletiva à laser (SLM) (Manoj Prabhakar; Saravanan; Haiter Lenin; Jerin Leno *et al.*, 2021).

A estereolitografia mascarada (mSLA) é a evolução da SLA e do DLP. O SLA é o processo pioneiro em impressão 3D do mundo, no qual através de um laser e de um espelho, realizava o escaneamento de uma linha na resina líquida. Posteriormente, surgiu o DLP, que substituiu o laser e o espelho por um projetor e assim foi possível curar uma camada inteira de uma só vez. No método mSLA o projetor foi substituído por um conjunto de LED UV e mascarado por meio de um visor de cristal líquido (Junk; Bär, 2023). Na Figura 1 é possível visualizar a ilustração de cada uma das técnicas.

Figura 1 – Ilustração da evolução das diferentes tecnologias de impressão 3D que realizam a manufatura através do processo de cura.



Fonte: CURE, 2025.

A mSLA é utilizada para imprimir uma gama de peças de diferentes nichos. A impressora de estereolitografia mascarada consiste em uma fonte de luz UV, um módulo LCD, lentes de proteção e zoom, tanque de resina com fundo transparente e a plataforma de impressão. A técnica possui uma ampla gama de aplicações, tendo sido utilizada para imprimir biomateriais (Minin; Blatov; Rodionov; Zubarev, 2021), metamateriais para aplicações mecânicas (Braszkiewicz, 2021) e elementos para sistemas microeletromecânicos (Kumar; Bhushan; Pandey; Bhattacharya, 2019).

A maior parte das formulações de resinas vendidas comercialmente é confidencial. No entanto, é sabido que normalmente elas consistem em metacrilatos multifuncionais e epoxi (Zhang; Xiao, 2018). As resinas desse tipo são compatíveis com diferentes tipos de impressoras 3D disponíveis no mercado e têm sido usadas em variadas aplicações, como a impressão de componentes com memória de forma, redes poliméricas híbridas à base de siloxano, componentes funcionais para aplicações biológicas, entre outros (Bagheri; Jin, 2019).

A estereolitografia mascarada consiste na utilização da irradiação da luz UV para a solidificação de resinas líquidas. Essa luz UV tem como fonte o LED, e são emitidas através de um display de cristal líquido (LCD), o que permite que uma camada completa seja curada (Junk, 2023). A composição de um polímero fotocurável, que é o caso da resina, corresponde a monômeros e fotoiniciadores. No momento que a luz penetra nos fotoiniciadores eles são transformados em radicais ativos e assim atacam os monômeros gerando assim monômeros ativos. Dessa forma, ocorre formação de cadeias poliméricas, uma vez que os monômeros vão reagindo entre si. Com a formação de cadeias longas e contínuas ocorre a formação do estado sólido à medida que essas cadeias vão se unindo (Valizadeh; Weeger, 2022). Esse processo ocorre camada a camada à medida que a plataforma realiza o deslocamento da resina que está no tanque. Essa reação depende principalmente da intensidade da luz UV e do tempo de exposição da camada. Esses fatores definem a quantidade de energia luminosa absorvida e o grau de conversão do monômero e estão diretamente relacionadas com as propriedades mecânicas finais do material impresso (Valizadeh; Weeger, 2022). Após esse processo de impressão a peça é removida da plataforma e deve ser lavada. Posteriormente a lavagem a peça deve ser seca e idealmente curada em uma câmera de luz UV (Junk; Bär, 2023).

Uma vantagem da mSLA em relação a FDM é que a técnica mSLA permite imprimir peças com espessuras de camada significativamente menores que a FDM. Apesar disso a FDM possui uma maior flexibilidade de produção de peças quando se trata de gama de

cores, uma vez que na FDM é possível fabricar uma mesma peça com diferentes cores, o que é uma limitação da mSLA (Junk; Bär, 2023).

A técnica mSLA, conforme explicado, submete toda a plataforma ao LED para realizar a cura. Isso significa que o tempo de impressão será o mesmo se a plataforma está totalmente ocupada com um grande número de peças ou com uma única peça apenas. Esse fato representa uma grande vantagem em relação a FDM, que é a técnica mais comum, onde só é realizada a impressão de uma peça por vez. Apesar disso, na mSLA, após a impressão é necessária a lavagem, secagem e cura, aumentando assim o tempo para a finalização da peça (Junk; Bär, 2023).

Os fatores tempo de lavagem e de cura têm sido discutidos na literatura, uma vez que alteram significativamente a qualidade e a resistência mecânica da peça produzida. A fase de lavagem é extremamente importante para gerar uma boa qualidade de superfície da peça e consiste na remoção da resina não curada. O líquido utilizado para a lavagem é despejado sobre a peça em uma câmara fechada (Nowacki; Kowol; Koziol; Olesik *et al.*, 2021).

A maioria das resinas comerciais recomenda a utilização de álcool isopropílico nos processos de lavagem pós-impressão. A utilização desse material no processo de lavagem das peças pode se revelar uma etapa problemática do ponto de vista ambiental e de saúde. O álcool isopropílico apresenta uma elevada pressão de vapor tornando-o muito volátil, ou seja, com alta propensão à evaporação. Além disso, é um produto inflamável e que requer precauções específicas de segurança. Nesse contexto, as resinas laváveis com água se apresentam como uma alternativa ao uso das resinas tradicionais pois elimina os riscos associados a utilização do álcool isopropílico e representam uma redução nos custos de produção (Koukousaki, 2023). Neste trabalho foram utilizadas resinas laváveis com água para a obtenção dos corpos de prova.

Em seguida ao processo de lavagem, ocorre o processo de pós cura. Essa fase é fundamental para aumentar a conversão da resina e, por isso, as propriedades mecânicas são definidas na fase de pós-cura. Desse modo, a escolha do tempo de pós cura é de extrema importância para se obter bons resultados em termos de propriedades mecânicas (Nowacki; Kowol; Koziol; Olesik *et al.*, 2021) (Uzcategui; Muralidharan; Ferguson; Bryant *et al.*, 2018).

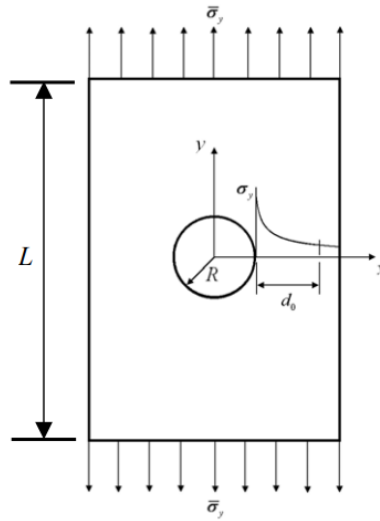
2.3 CONCENTRADOR DE TENSÃO

Os materiais de uma maneira geral, quando em uso, estão submetidos a forças ou cargas. A investigação dos conceitos de tensão e deformação entre os corpos é fundamental para garantir segurança e confiabilidade, uma vez que é possível prever problemas e antecipar

soluções quando se realiza essa análise. A submissão de uma carga axial de tração ou compressão em uma barra de secção transversal uniforme gera uma tensão constante ao longo da secção. Entretanto, se há um furo, entalhe ou ranhura no material a tensão local aumentará significativamente (Hearn, 1997). O fator de concentração de tensão é um critério que mede como o impacto da descontinuidade geométrica em um material amplifica tensão nominal aplicada a ele. Entende-se que o efeito do tamanho do furo é um fator fundamental para tal análise, uma vez que quanto menor o tamanho do furo, menor a probabilidade de falha (Pyl; Kalteremidou; Van Hemelrijck, 2019). Dos métodos analíticos que se propõem a prever as resistências de entalhes, alguns merecem destaque: mecânica da fratura, dano progressivo e tensão pontual. Os modelos de mecânica por fratura analisam as tensões ao redor do furo, analisando as trincas para prever falhas; os modelos de dano progressivo analisam durante o processo de carregamento as mudanças nas distribuições de tensões; o modelo de tensão pontual analisa a média das tensões ao longo de uma distância característica (De Moraes, 2000).

Devido a sua simplicidade, o critério de tensão pontual é uma técnica muito difundida e será adotado neste trabalho. O método de Whitney e Nuismer baseia-se nos critérios de tensão pontual e tensão média. Ele foi desenvolvido para estimar a resistência de um laminado frágil com furo central. O método considera a distribuição de tensões ao longo da direção de carga e considera duas dimensões características como propriedades do material (Whitney; Nuismer, 1974). Na Figura 2 é possível observar uma ilustração contendo uma placa de comprimento L com furo circular de raio R submetido a uma tensão σ_y . A distribuição de tensões ao longo do eixo x evidencia o efeito da concentração de tensão causado pelo furo. O método de Whitney Nuismer estuda esse efeito em uma distância d_0 a partir do contorno do furo.

Figura 2 – Distribuições de tensão em uma placa plana com furo central.



Fonte: Tsai; Hwan; Lin; Huang, 2012.

Considerando uma placa infinita isotrópica o fator de concentração de tensão nominal chamado de K_∞^t é igual 3 (MOHAMED MAKKI; CHOKRI, 2017). A equação (1), realiza uma comparação entre os modelos de resistência finita e infinita. Sendo K_{tg} o fator de concentração de tensão bruto, d é o diâmetro do furo e w a largura da placa.

$$\frac{K_t^\infty}{K_{tg}} = \frac{3\left(1 - \frac{d}{w}\right)}{2 + \left(1 - \frac{d}{w}\right)^3} \quad (1)$$

Em seguida, é possível obter o fator de concentração de tensão líquida (K_{tn}) dado pela equação (2):

$$K_{tn} = K_{tg} \left(1 - \frac{d}{w}\right) \quad (2)$$

Esse método será utilizado nesse trabalho, a fim de validar analiticamente o comportamento mecânico de amostras de resinas fotocuráveis impressas em dispositivos mSLA contendo furos centrais em uma placa plana.

2.4 ESTRUTURAS VAZADAS

Muitos estudos têm buscado maneiras de reduzir os custos de fabricação de objetos produzidos por manufatura aditiva, seja através da diminuição do tempo de impressão, seja através da redução do uso de matéria prima, sem que com isso ocorra comprometimento significativo das propriedades mecânicas do material. Abeykoon et al. testaram como a densidade de preenchimento afetaria as propriedades mecânicas de objetos impressos por FDM

utilizando PLA e ABS. Ao utilizarem densidades de preenchimento variando entre 25 a 100%, os autores relataram que uma densidade de preenchimento de 100%, velocidade de preenchimento de 90 mm/s e padrão de preenchimento linear foram a melhor combinação de parâmetros FDM para objetos impressos utilizando PLA, ABS, CFR-PLA, CFR-ABS e CNT-ABS (Abeykoon; Sri-Amphorn; Fernando, 2020).

Le et al. utilizaram o planejamento de experimentos para estudar a resistência máxima e o tempo de impressão de peças impressas por FDM utilizando PLA, considerando como variáveis o diâmetro do bico, o número de camadas externas, a temperatura de extrusão, a porcentagem de preenchimento e o padrão de preenchimento. Os autores apontaram que o uso de um diâmetro maior (bico de 0,6 mm), com mais camadas externas e 10% de preenchimento, pode minimizar o tempo de impressão sem prejudicar significativamente a resistência quando se compara com uma peça fabricada com 40% de preenchimento (Le; Rabsatt; Eisazadeh; Torabizadeh, 2022).

Ali et al. estudaram o efeito da porcentagem de preenchimento (50%, 75% e 100%) nas propriedades mecânicas de peças impressas por FDM utilizando dois tipos de poliamida (PA6 e PA66) como matéria prima. Em todos os casos os autores encontraram uma piora das propriedades mecânicas com o decréscimo da porcentagem de preenchimento (Feroz Ali; Raghu; Yogesh Muthu Ram; Harshavardhan Reddy *et al.*, 2022).

Dev e Srivastava investigaram o efeito do padrão de preenchimento (gyroid, favo de mel e concêntrico) e da porcentagem de preenchimento (20%, 50%, 80% e 100%) sobre as propriedades mecânicas de amostras impressas por FDM utilizando ABS como matéria prima. Os autores afirmaram que as peças de ABS impressas em 3D com padrões de favo de mel e giroide com uma densidade de preenchimento de 80% exibiram valores de resistência à flexão e compressão comparáveis às peças sólidas (Dev; Srivastava, 2021).

Galeta et al. introduziram diferentes formatos de cavidades ocas adicionando furos em toda a amostra de teste. Ele realizou testes com a estrutura favo de mel, circular e listras e comparou com estruturas totalmente preenchidas. As amostras foram obtidas com impressão a jato de tinta. Verificou-se que as amostras com estrutura de favo de mel possuíam a maior resistência à tração, o que foi surpreendente, considerando que a estrutura de favo de mel é amplamente conhecida por sua resistência à compressão e não à tração (Galeta; Raos; Stojšić; Pakši, 2016).

Kao et al. estudaram o efeito do aumento dos vazios em compósitos obtidos através de gesso e uma resina de silicone impressas por manufatura aditiva. Neste trabalho, os autores fabricaram corpos de prova variando a porcentagem de material e modificando a configuração

e a quantidade de furos em cada amostra. As propriedades mecânicas das peças produzidas foram avaliadas por meio de testes de flexão em três pontos. Os resultados indicaram que as amostras com um design de célula unitária grande, e, portanto, alto grau de vazios, exibiram maiores módulos de flexão (Kao; Dressen; Kim, 2015).

O trabalho de Exley et al. investigou a influência do grau de vazios em ABS e PLA, puros e reforçados com fibra de carbono, nas propriedades mecânicas, ao incrementar a porcentagem de vazios em 0%, 10%, 20% e 30%. Para a realização do estudo foram fabricados corpos de prova em dispositivos FDM com diferentes estruturas de cavidades, sendo elas favo de mel, circulares e quadrados. O comportamento mecânico foi avaliado em ensaios de tração e flexão. Para as amostras submetidas ao ensaio de flexão o estudo concluiu que as diferentes geometrias não influenciaram no comportamento mecânico das amostras. Entretanto, percebeu-se que em todos os casos há redução das propriedades mecânicas com o aumento de vazios, e ela é mais significativa entre 0 e 10% (Exley; Perera; Abeykoon, 2024). Além disso, de todos os materiais estudados o PLA exibiu os melhores resultados em relação ao ABS para os diferentes ensaios realizados. Há uma lacuna científica quanto a investigação do grau de vazios em resinas fotocuráveis, e esse será o foco desse trabalho.

2.5 SIMULAÇÃO

CAE (Computer Aided Engineer) pode ser definida como um conjunto de métodos que computam as características e simulam situações físicas reais com o uso do computador. Elas avaliam a funcionalidade, encaixe e geometria do produto, facilitando assim a definição do processo de fabricação e montagem. Devido à facilidade e versatilidade do CAE, quando há o desenvolvimento de um projeto, antes da finalização do protótipo, já é possível prever todos os possíveis movimentos e definir os pontos críticos. Há diversos softwares que realizam simulações estruturais e mecânicas, como o Ansys, Abaqus e MSC Nastran. Nesse trabalho foi utilizado o Ansys para as simulações mecânicas

Para realização da simulação no Ansys, é preciso definir as seguintes configurações: geometria, propriedades do material, malha, condições de contorno e os tipos de análises que serão realizadas. A definição das propriedades do material são fundamentais para assegurar que a peça tenha o comportamento mecânico esperado. Os parâmetros de entrada para simulações mecânicas geralmente incluem o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Uma etapa fundamental na simulação é a confecção da malha. Critérios como tamanho de malha, tipo do elemento e refinamento auxiliam na precisão e na convergência dos resultados. Outro fator

importante na simulação são as condições de contorno, a definição de apoios, restrições e cargas que descrevem para o modelo quais são as condições reais aos quais o corpo está submetido. É essencial que comparações entre a simulação e outros métodos, como analítico e experimental, sejam realizadas a fim de assegurar que os resultados estejam compatíveis (Ansys, 2009).

2.6 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

A técnica DIC baseia-se no registro de pelo menos duas imagens, uma obtida antes e outra após a deformação de uma amostra. A técnica consiste na obtenção dos campos de deformação no plano da superfície das amostras a partir da comparação das imagens, desde que possuam um padrão granular e resolução adequadas (Wu; Kumar; Lin; Chen, 2023); (Teixeira Pinto; Touchard; Castagnet; Nadot-Martin *et al.*, 2013). Para utilização do método, existem diversas plataformas de código aberto como py2DIC (Belloni; Ravanelli; Nascetti; Di Rita *et al.*, 2019) e Ncorr (Arabul; Lunt, 2022). Para este trabalho será utilizada o software Matlab Ncorr.

Muitos estudos têm utilizado a DIC para avaliar as propriedades mecânicas de peças com a existência de entalhes/furos. Saleh et al. estudou o efeito de entalhes circulares em três diferentes arquiteturas de compósitos de resina epóxi/fibra de carbono/tecido. Foi possível visualizar através do método DIC os contornos de deformação com regiões de tensão/deformação ao redor da periferia do furo. Entretanto, devido a ductilidade do material, as amostras com furo exibiram uma redução mínima (menos de 10%) na resistência em comparação à resistência da amostra sem furo (Saleh; Wang; Yudhanto; Joesbury *et al.*, 2017). Aidi et al estudou as propriedades residuais e os correspondentes estados de dano em compósitos de fibra de carbono/epóxi com entalhe central submetidos a carregamento por fadiga utilizando radiografia, DIC e uma técnica de medição de vibração sem contato. O trabalho demonstrou que a técnica de vibração em conjunto com o método DIC fornece uma excelente ferramenta não destrutiva para monitoramento do desenvolvimento de danos por fadiga (Aidi; Philen; Case, 2015). Makki et al estudaram os fatores de concentração de tensão para materiais compósitos e aço com diferentes diâmetros de furo. A partir dos resultados, foi concluído que a presença de descontinuidade geométrica provoca impactos significativos no fator de concentração de tensão (SFC) para o aço e para os materiais compósitos. O trabalho mostrou ainda que os resultados obtidos pelo método DIC e pelo Métodos dos Elementos Finitos (MEF) para materiais isotrópicos são muito próximos (Mohamed Makki; Chokri, 2017).

O uso da DIC para a determinação das propriedades mecânicas em amostras fabricadas por manufatura aditiva também tem sido encontrado na literatura. Luo et al afirma ser o pioneiro na utilização da técnica DIC para determinar a deformação térmica superficial de amostras de ácido polilático (PLA) impressas por FDM. O estudo demonstrou que quando a temperatura diminui para -40°C ocorre uma significativa localização da deformação o que poderia provocar falhas prematuras nos corpos de prova (Luo; Luo; Zhang; Li *et al.*, 2022). Hosseinabadi et al comparou duas técnicas de manufatura aditiva, FDM e PolyJet™, utilizando a DIC afim de analisar a deformação plástica em colmeias poliméricas. Os resultados apontaram que a técnica DIC foi eficaz para estudar a localização da deformação em hastes de colmeias impressas em 3D e que as amostras impressas pela técnica PolyJet™ possuem distribuições de deformação mais homogêneas quando comparadas à técnica FDM (Goodarzi Hosseinabadi; Bagheri; Avila Gray; Altstädt *et al.*, 2017). Tang et al utilizaram DIC para avaliar os efeitos dos parâmetros de processos sobre as propriedades mecânicas em estruturas de malha impressas por FDM utilizando PLA. Os resultados mostraram que à medida que a temperatura de impressão aumenta, a resistência à tração e o módulo de elasticidade tendem a aumentar inicialmente e depois diminuir (Tang; Liu; Yang; Liu *et al.*, 2020).

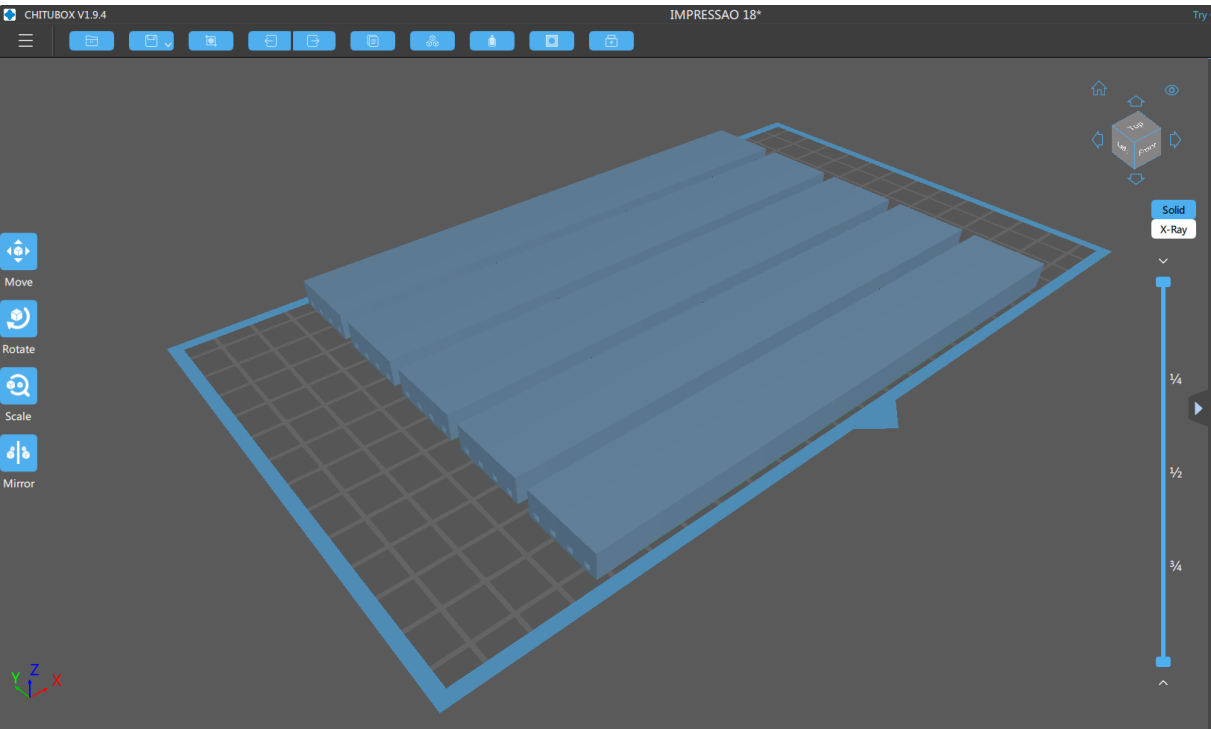
São raros na literatura trabalhos que utilizam a técnica DIC para o estudo de propriedades mecânicas de peças com furos fabricadas por manufatura aditiva, especialmente aquelas impressas através da mSLA, que é uma técnica de impressão 3D bastante recente. Volgin et al fez o uso de uma amostra de PLA com furo central impressa por FDM para validar um estudo de modelagem constitutivo de Três Redes e realizou a comparação dos resultados com as previsões por MEF (Volgin; Shishkovsky, 2021). O estudo de Falta et al (2022) emprega DIC para avaliar características mecânicas de peças impressas por mSLA. O trabalho buscou analisar as características mecânicas sob diferentes tipos de carregamento e estudar a sensibilidade à taxa de deformação na resposta à compressão em amostras maciças e em treliças de favo de mel invertido (Falta; Yunus., 2022). Oliveira et al fez o uso de cilindros produzidos em dispositivos mSLA para realizar um estudo sobre campo de tensões comparando resultados fornecidos por MEF e DIC. Os autores demonstram que a investigação de campos de tensão utilizando resina fotocurável em dispositivos mSLA apresentam resultados consistentes, uma vez que a variação das tensões analisadas foi entre 0,6% e 8,2% (Oliveira; Rosario De Oliveira; Alvarado Silva; Guidi *et al.*, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTOS GERAIS PARA IMPRESSÃO

Todas as amostras que foram estudadas nesse trabalho foram modeladas usando o software Inventor 2024 e posteriormente convertidas para o formato Stereolithography (STL). Essa conversão é fundamental pois através dela o desenho da amostra é inserido no software fatiador CHITUBOX (Figura 3) para gerar as máscaras, ou seja, fatiar a amostra em várias camadas de impressão onde a máscara representa uma camada com a espessura estabelecida. Nesse software fatiador são inseridos o tempo de exposição inicial para a primeira camada, o tempo de exposição para as demais camadas e a espessura das camadas. Os parâmetros utilizados na máquina estão descritos na Tabela 1.

Figura 3 – Ambiente do software CHITUBOX.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 1 – Parâmetros de Impressão.

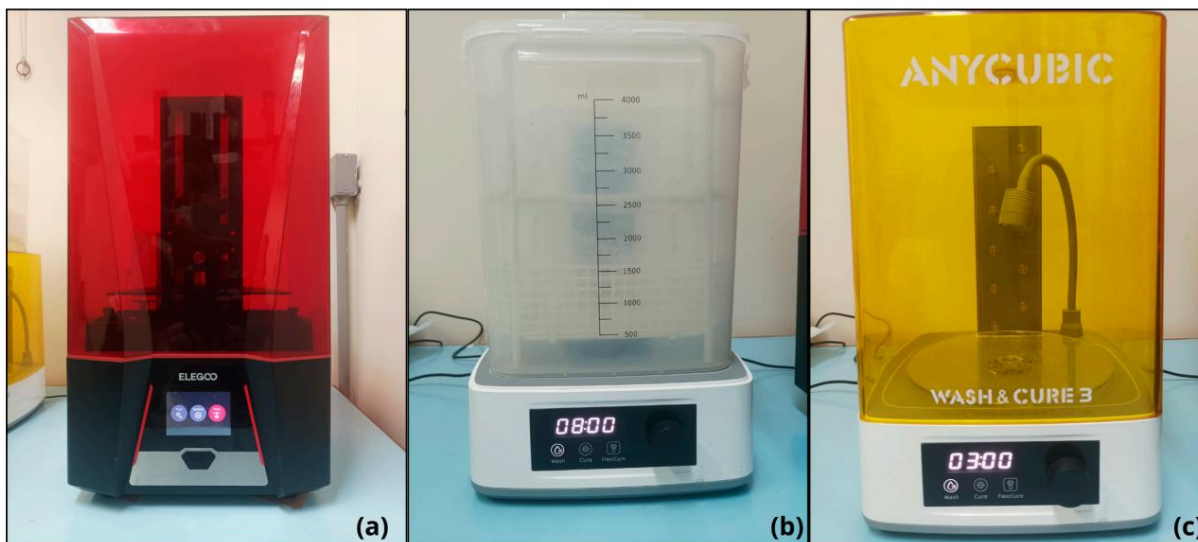
Altura de camada	0,050 mm
Camadas de base	4
Tempo de exposição	2,2 s

Tempo de exposição base	20 s
Contagem de camadas de transição	5
Tipo de transição	Linear
Tempo de descanso antes da elevação	0 s
Tempo de descanso após a elevação	0 s
Tempo de descanso após a retração	0,5 s
Distância elevação inferior	3,0 + 4,0 mm
Distância elevação	3,0 + 4,0 mm
Distância de retração inferior	5,5 + 1,5 mm
Distância de retração	5,5 + 1,5 mm
Velocidade de elevação inferior	65 & 180 mm/min
Velocidade de elevação	65 & 180 mm/min
Velocidade de retração inferior	180 & 65 mm/min
Velocidade de retração	180 & 65 mm/min

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizada uma impressora mSLA fabricada pela empresa ELEGOO, modelo Saturn 2. Após a impressão, os corpos de prova passam por etapas de pós-processamento, sendo lavados em água por 8 minutos. Em seguida, são submetidos a uma câmara de luz UV por 1 h. A Figura 4 mostra a impressora, a câmara de lavagem e a câmara de luz UV. A resina usada é lavável em água e de cor cinza, fabricada pela ANYCUBIC. Os parâmetros da resina do fornecedor são mostrados na Tabela 2.

Figura 4– (a) impressora Elegoo em operação. (b) Câmara de lavagem. (c) Câmara de luz UV com corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 2 – Parâmetros da resina disponibilizados pelo fornecedor.

Parâmetros de Resina	Valores
Comprimento de onda UV	365–405 nm
Alongamento de ruptura	8–15%
Densidade	1.15–1.20 g/cm ³
Módulo de elasticidade à tração	1600–1800 MPa
Viscosidade	140–250 MPa·s (25°C)
Módulo de flexão	1500–1600 MPa
Dureza	80 Shore D
Temperatura de deflexão térmica	60–65 °C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2 ESTUDO DE PLACA COM FURO CENTRAL

3.2.1 Corpo De Prova e Equipamentos

Para o estudo de concentradores de tensão em placas com furo central, foram introduzidos furos circulares nos corpos de prova, variando a relação diâmetro/largura, com o corpo de prova sem furos servindo como padrão de comparação, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação diâmetro-largura (d/w) dos corpos de prova.

Diâmetro (mm)	d/w
Sem furo	-
1,9	0,1
3,8	0,2
5,7	0,3
7,6	0,4
9,5	0,5

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O ambiente de teste é apresentado na Figura 5, destacando a câmera CANON e a máquina de teste SHIMADZU. Células de carga de 5 kN foram usadas, e a velocidade de teste foi de 5 mm/min de acordo com o padrão ASTM D638 adaptado.

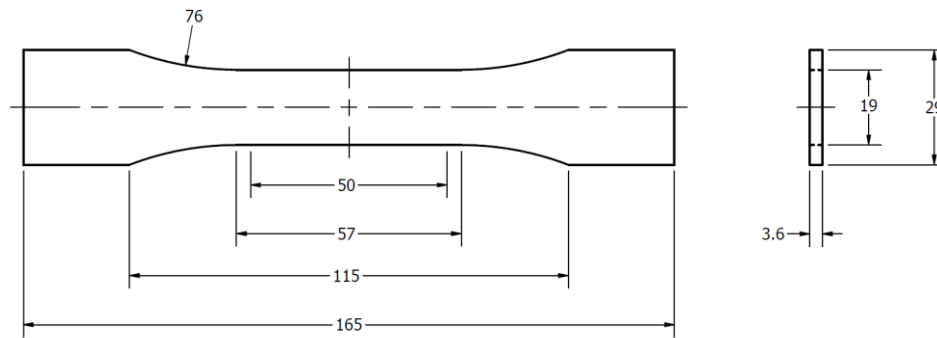
Figura 5– Máquina SHIMADZU no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Cinco corpos de prova foram impressos para cada configuração usando o padrão ASTM D638 Tipo 3 adaptado, e o diagrama bidimensional do corpo de prova com as dimensões em mm pode ser visto na Figura 6.

Figura 6– Representação bidimensional do corpo de prova com dimensões em mm.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

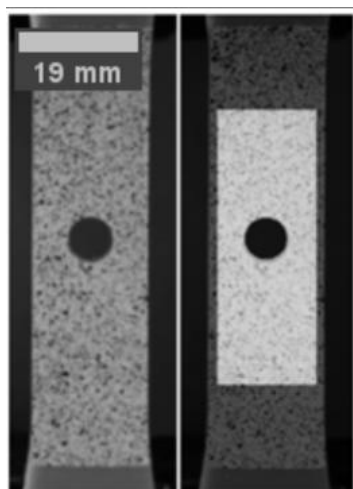
3.2.2 Ensaios

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios sob cargas axiais, onde a região de fixação do corpo de prova foi totalmente fixada na garra durante a aplicação da carga. Adicionalmente, foram realizados ensaios com cargas excêntricas, onde a região de fixação do corpo de prova foi parcialmente fixada durante a aplicação da carga.

Para determinar o módulo de Young da resina estudada, o extensômetro da máquina foi inserido em corpos de prova submetidos à carga axial. Assim, foi encontrado um valor de 1,76 GPa para o módulo de Young. O coeficiente de Poisson de 0,34 foi determinado pelo trabalho de Oliveira (Oliveira; Rosario De Oliveira; Alvarado Silva; Guidi *et al.*, 2025).

A análise foi conduzida usando o método DIC para os corpos de prova submetidos a cargas axiais e excêntricas. Durante os ensaios, os corpos de prova foram filmados com a câmera CANON T7i. Os vídeos foram divididos em quadros e, posteriormente, esses quadros foram processados no software Matlab Ncorr (versão 1.2) para análise de deformações. Para a análise, é necessário definir uma região de interesse (ROI), conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7– ROI definido para análise de deformação no Ncorr.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em seguida, é definido o subconjunto a ser analisado na imagem. Como as deformações ao redor do furo central são o foco do estudo, o subconjunto é definido nessa região. Para este trabalho, foi definido um subconjunto com raio de 50 pixels para os corpos de prova submetidos à carga axial e 12 pixels para os corpos de prova submetidos à carga excêntrica. Essa diferença ocorre devido ao tamanho de grão dos corpos de prova testados. Conforme apontado por Beleza, o tamanho de grão e a qualidade da imagem analisada estão diretamente relacionados ao raio do subconjunto. Os resultados de Beleza mostram que, para amostras com padrões de grãos menores, raios maiores resultam em erros relativos menores, enquanto para amostras com padrões de grãos maiores, raios médios produzem os melhores resultados. No entanto, a qualidade das imagens também influencia nessa análise (Beleza, 2017).

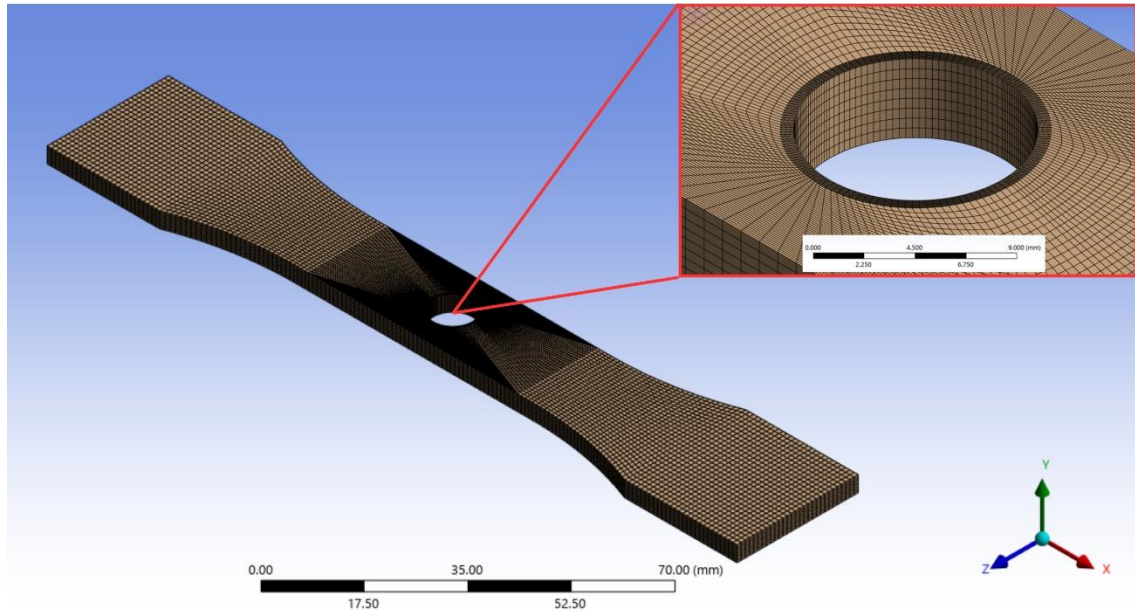
3.2.3 Análise de Elementos Finitos

Nesse trabalho utilizou-se simulação no software Ansys 2024 R1. Como parâmetros de entrada para a simulação foram adicionados o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o tipo de estrutura isotrópica. Foram modeladas geometrias com furos de diâmetros de 9,5 mm, 7,6 mm, 5,7 mm, 3,8 mm, 1,9 mm e também geometria totalmente preenchida.

Desenvolveu-se uma malha estruturada para os modelos estudados. Para as geometrias que continham furos foi realizado um refinamento em torno do furo (Figura 8) com

o objetivo de garantir maior precisão dos resultados já que nessa região há variações significativas no campo de tensões.

Figura 8 – Modelo de corpo de prova com malha.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os elementos utilizados pelo software para a encontrar a solução para os carregamentos axial e excêntrico foram o SOLID185 e SURF154. O SOLID185 geralmente é utilizado para estruturas 3D para aplicações de deformação, deflexão, entre outros. O SURF154 pode ser usado para diversos carregamentos e aplicações de efeito de superfície para análises 3D (ANSYS, 2009).

Na Tabela 4 é possível verificar a quantidade de elementos e nós que foram utilizados para cada estrutura analisada.

Tabela 4 – Quantidade de elementos e nós para cada estrutura.

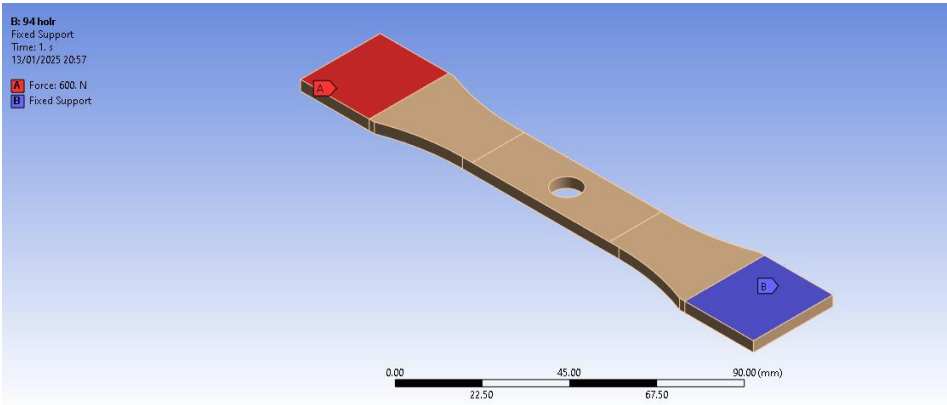
Diâmetro (mm)	d/w	Número de elementos	Número de nós
Sem furo	-	102.696	94.038
1,9	0,1	95.853	21.191
3,8	0,2	94.038	109.696
5,7	0,3	102.416	117.720
7,6	0,4	99.888	114.876

9,4	0,5	98.240	113.040
-----	-----	--------	---------

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para as condições de contorno reproduziu-se as condições do corpo de prova em um ensaio de tração utilizando carga axial, onde a base está presa a garra e na parte superior está sendo submetido ao carregamento. Na Figura 9 é possível visualizar as condições de contorno que foram empregadas em MEF, a região onde está aplicado o carregamento (A) e a região fixada (B). Para análise foi escolhida uma força de 600 N para todos os corpos de prova.

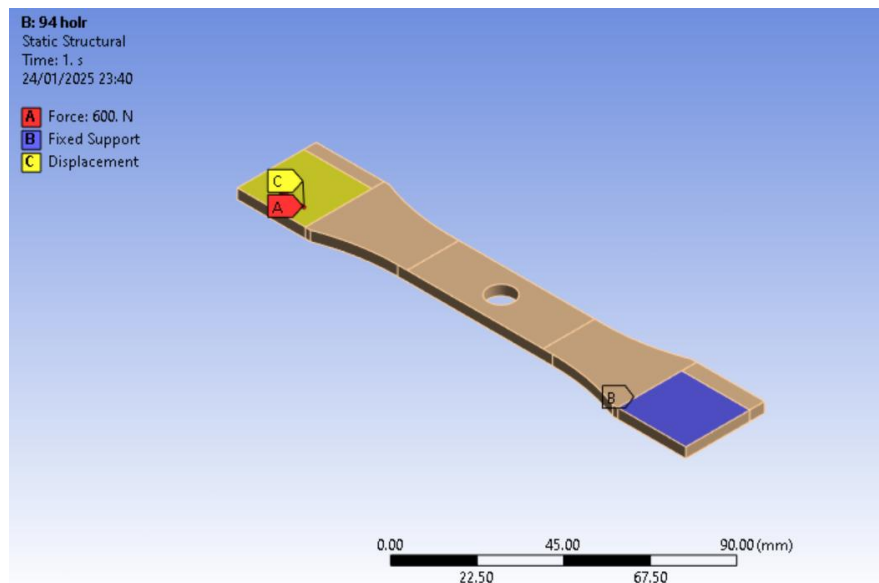
Figura 9 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga axial.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi realizada também a simulação reproduzindo as condições de contorno do ensaio de tração com a carga excêntrica onde o corpo de prova estava com sua zona de fixação 23.5 mm preso a garra considerando a restrição ocasionada pelo efeito da garra, conforme Figura 10.

Figura 10 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga excêntrica considerando a restrição da garra.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2.4 Método Analítico

O método analítico de Whitney Nuismer pode ser aplicado apenas para placas planas com furos centrais submetidos a esforços axiais. No desenvolvimento das equações foram considerados o modelo de placa infinita para materiais isotrópicos de plana infinita e foram realizadas análises para cada relação d/w .

3.3 ESTUDO DE CADEIA DE FUROS

3.3.1 Ensaio de tração

3.3.1.1 Corpo de prova e equipamentos: parâmetros gerais

O ambiente de teste é do ensaio de tração dos corpos de prova com cadeias de furos é apresentado na Figura 11.

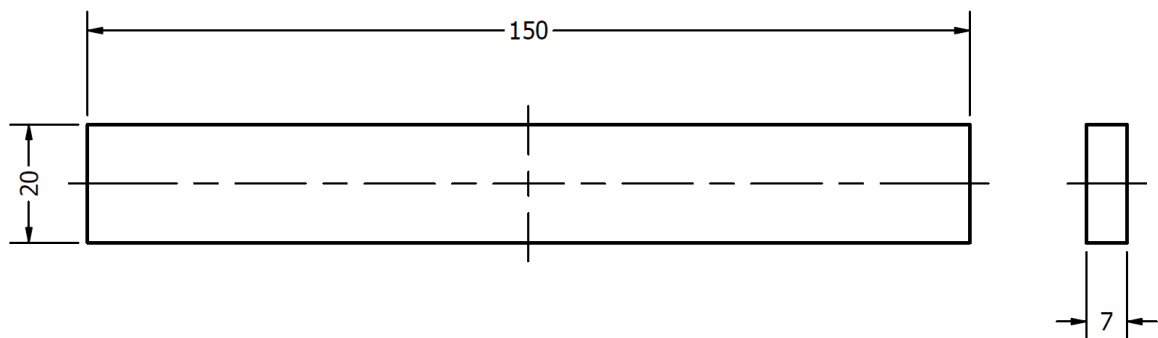
Figura 11 – Máquina SHIMADZU no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para determinar o efeito do grau de vazios foi removida uma quantidade gradualmente crescente de material da amostra, tendo como padrão de comparação a amostra sem furos. As dimensões dos corpos de prova foram determinadas segundo a norma D3039, conforme é possível visualizar na Figura 12.

Figura 12 – Representação bidimensional do corpo de prova com dimensões em milímetros.

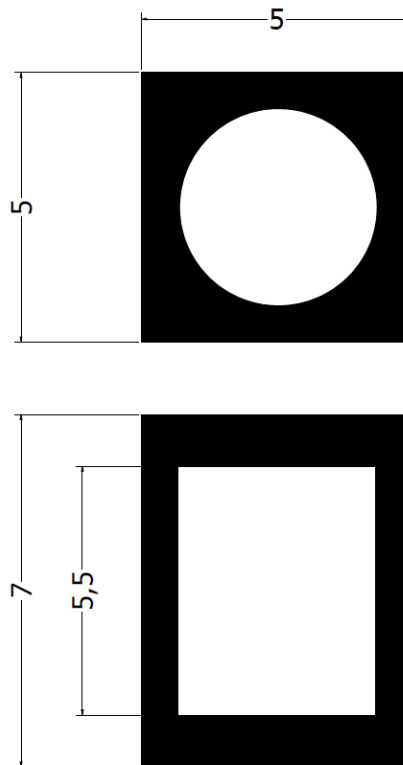


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para o estudo de estruturas vazadas foram introduzidas cavidades ocas nos corpos de prova variando a porcentagem de vazios e a geometria da cavidade. Na seção 3.2 foi apresentado o impacto da introdução de um furo circular central em uma placa plana nas propriedades mecânicas das amostras. A partir desse estudo, é possível aprofundar a análise e estudar o impacto nas propriedades mecânicas de amostras com uma cadeia de furos circulares.

Utilizando como a base a referência de Exley (2024), dividiu-se a amostra em células unitárias para facilitar a incrementação de porcentagem de vazios (Exley; Perera; Abeykoon, 2024). Dessa forma, como a relação comprimento x largura úteis da amostra é de 50 mm x 20 mm, é possível dividir essa área em células unitárias com medidas 5 mm x 5 mm, tendo assim 10 células no eixo do comprimento e 4 no eixo da largura, resultando em 40 células unitárias. Na Figura 13 é possível visualizar a ilustração da célula unitária.

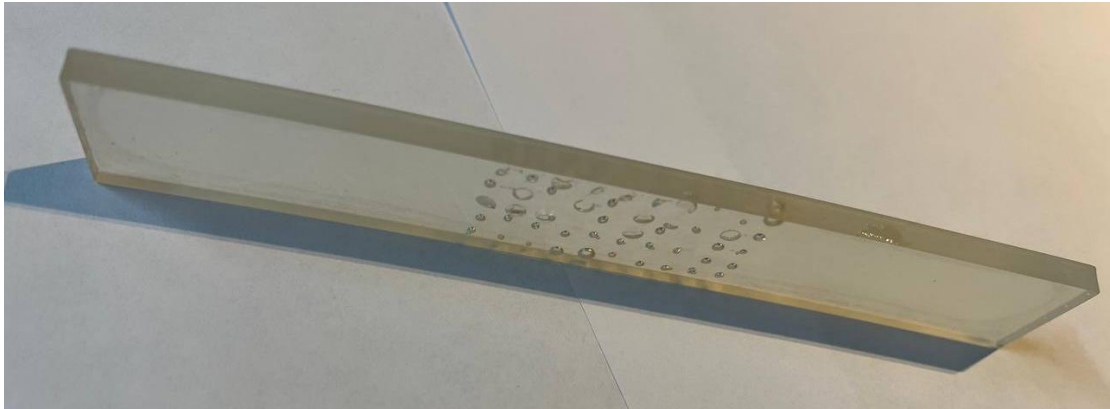
Figura 13 – Ilustração da vista frontal e superior da célula unitária.



Fonte: Exley et al (2024).

Durante o processo de impressão dos corpos de prova, encontrou-se um problema na configuração proposta. Devido a impressão por mSLA solidificar resinas líquidas camada a camada pelo processo de cura, encontrou-se dificuldade em remover completamente a resina que estava dentro da cavidade. Na Figura 14 é possível visualizar um corpo de prova impresso, mostrando que as cavidades circulares não eliminaram completamente a resina no processo de impressão.

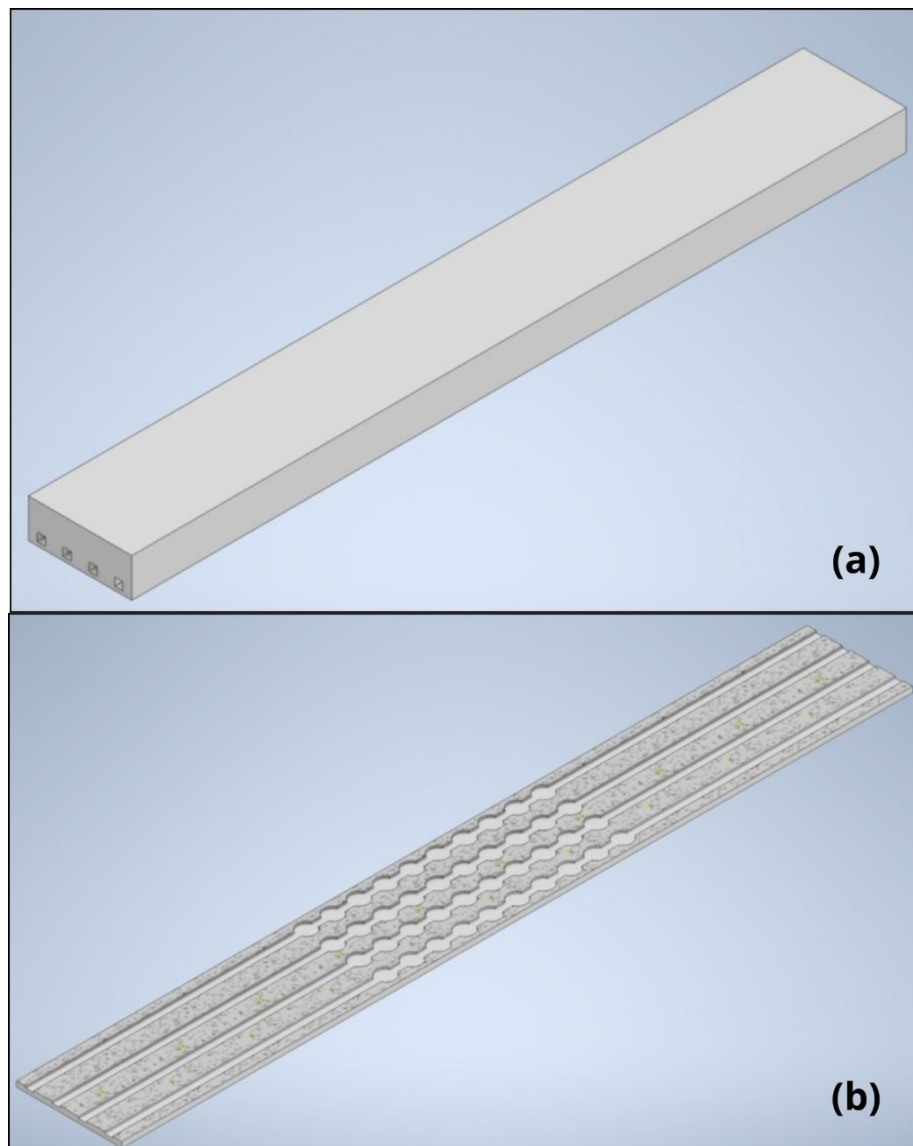
Figura 14 – Corpo de prova de configuração circular com resina líquida confinada na amostra.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Dessa forma, decidiu-se por modificar a configuração inicialmente proposta, que continha apenas furos, e foram introduzidas galerias para a drenagem da resina que não é eliminada no processo de impressão. Após o processo de impressão utilizou-se uma seringa com água para garantir que a resina que havia ficado no interior do corpo de prova fosse removida. O modelo do corpo de prova com as galerias pode ser observado na Figura 15.

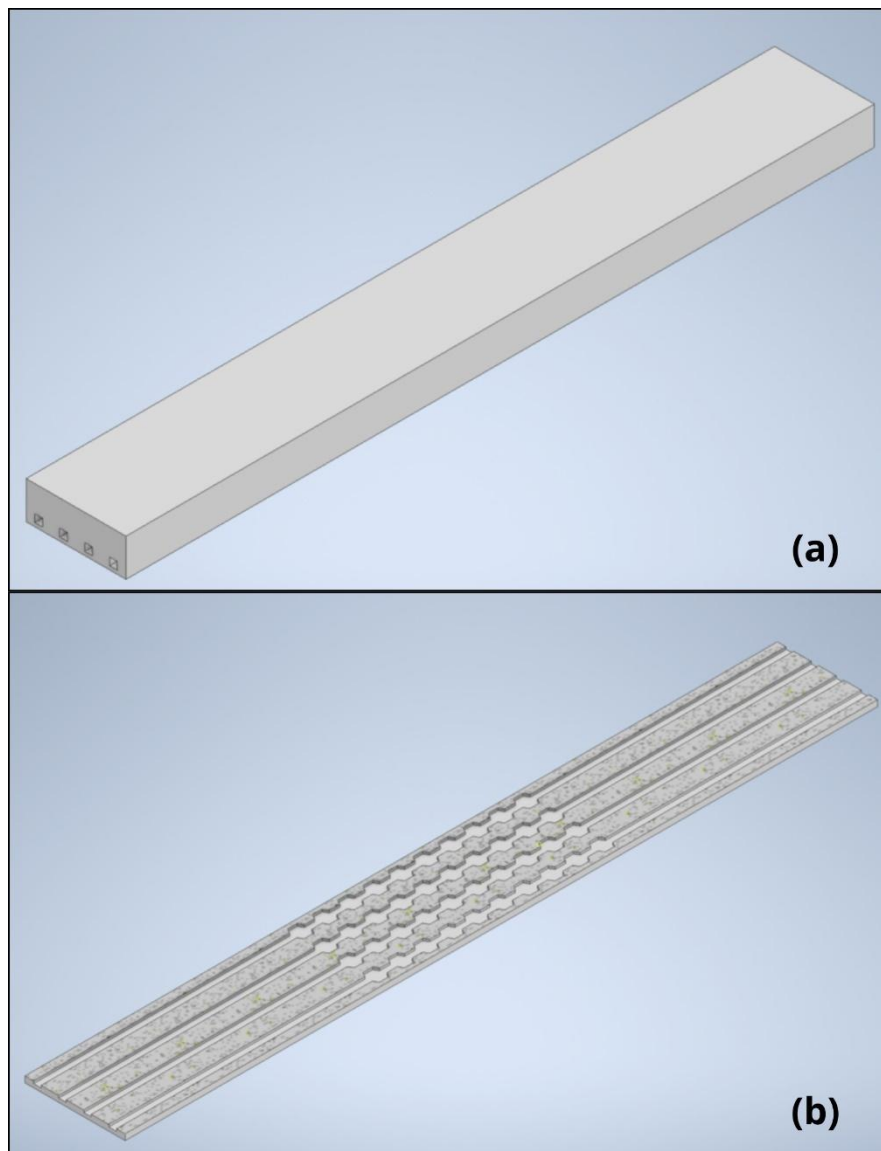
Figura 15 – Modelo do corpo de prova circular com as galerias a) peça completa e b) modelo seccionado.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

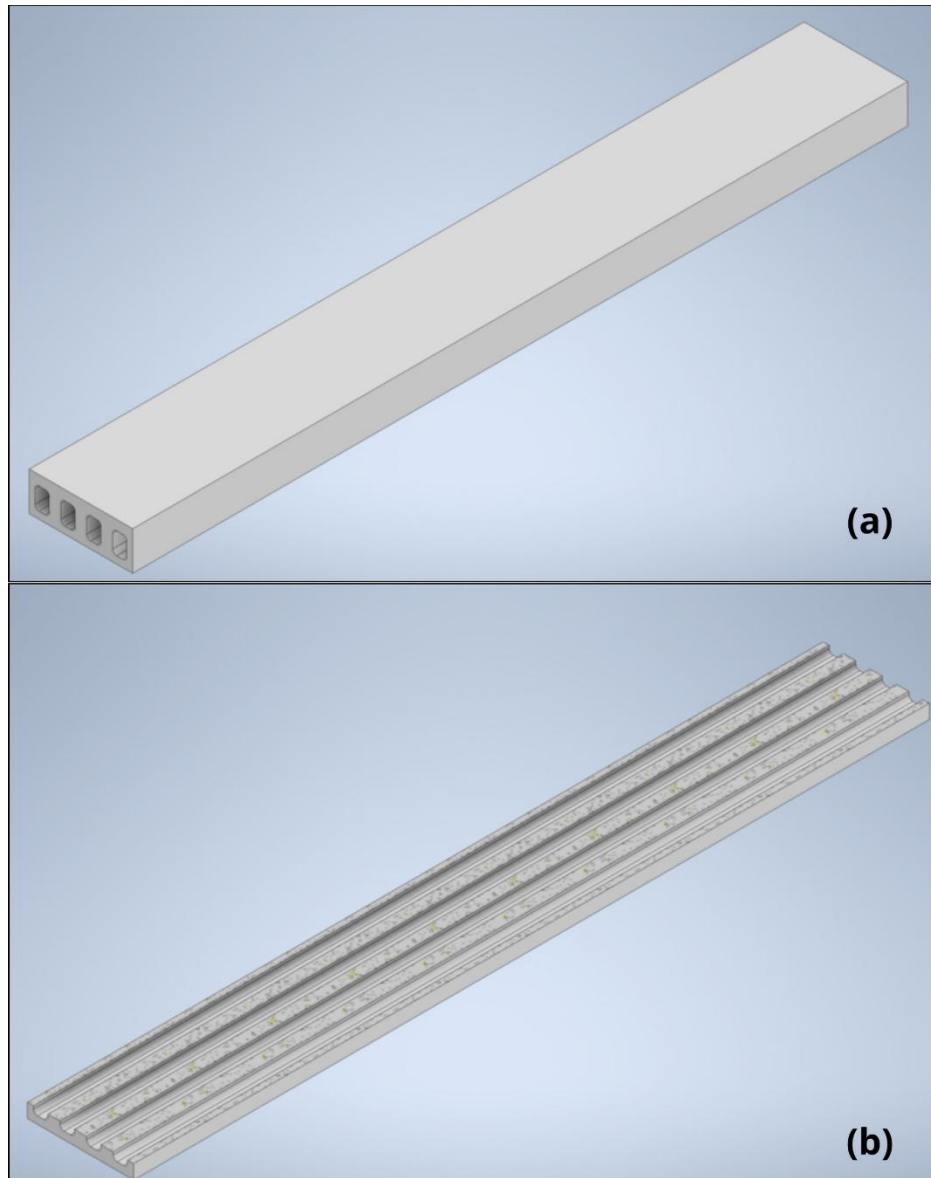
Além do corpo de prova com cavidade circular, foram impressas outras duas configurações, geometria hexagonal com galerias (Figura 16) e também o corpo de prova com dutos (Figura 17). Para as configurações circulares e hexagonais a galeria está posicionada a 0,75 mm acima da superfície inferior do corpo de prova. Por outro lado, na configuração do corpo de prova com dutos, eles estão posicionados centralmente ao longo da espessura.

Figura 16 – Modelo do corpo de prova hexagonal com as galerias a) peça completa e b) modelo seccionado.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 17 – Modelo do corpo de prova de dutos a) peça completa e b) modelo seccionado.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além da diferença entre a geometria dos corpos de prova, variou-se a porcentagem de vazios nas peças. Analisou-se corpos de prova com porcentagens de 15%, 23% e 32% de vazios. Nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 é possível visualizar as características dos corpos de prova.

Tabela 5 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo circular com galerias.

Porcentagem de vazios total	32%	23%	15%
Diâmetro do furo (mm)	3,49	2,85	2
Volume do furo (unidade) (mm ³)	52,6	35,1	17,3
Porcentagem vazio dos furos	30%	20%	10%
Volume galeria (unidade) (mm ³)	112,5	112,5	112,5
Dimensões galerias (útil) (mm)	1,5 x 1,5 x 50	1,5 x 1,5 x 50	1,5 x 1,5 x 50
Porcentagem de vazio de galerias	2%	3%	5%

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 6 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo hexagonal com galerias.

Porcentagem de vazios total	32%	23%	15%
Lado do furo (mm)	1,9	1,55	1,1
Volume do furo (unidade) (mm ³)	51,6	34,3	17,3
Porcentagem vazio dos furos	30%	20%	10%
Volume galeria (unidade) (mm ³)	112,5	112,5	112,5
Dimensões galerias (útil) (mm)	1,5 x 1,5 x 50	1,5 x 1,5 x 50	1,5 x 1,5 x 50
Porcentagem de vazio de galerias	2%	3%	5%

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 7 – Especificações referentes as porcentagens de vazios utilizado no modelo de dutos.

Porcentagem de vazios total	32%	23%	15%
Volume duto (unidade) (mm ³)	560,3	404,6	269,8
Dimensões do duto (útil) (mm)	4,15 x 2,7 x 50	4,15 x 2,7 x 50	4,15 x 2,7 x 50

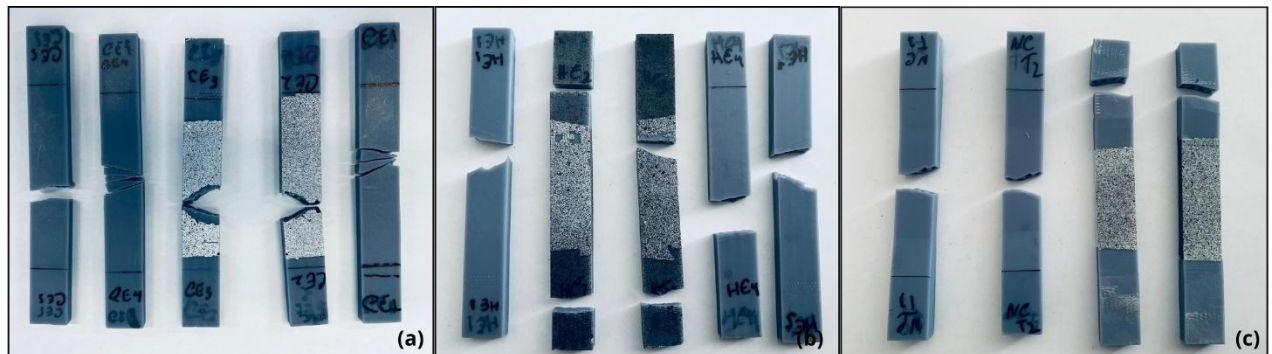
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para essas configurações de corpo de prova com uma cadeia de furos, não há teoria analítica prevista e, por isso, a validação ocorreu pela comparação entre simulação e pelo método experimental para corpos de prova com porcentagem de vazios de 32%.

3.3.1.2 Ensaios Experimentais

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração. Na Figura 18 é possível visualizar os corpos de prova ensaiados para cada configuração.

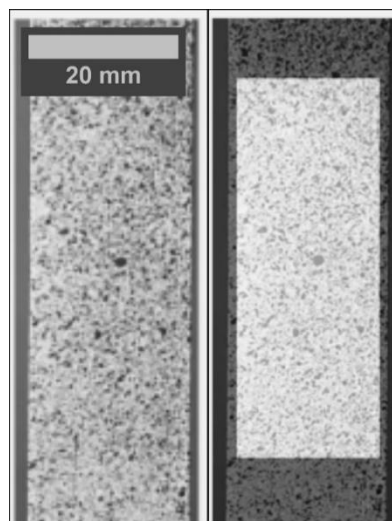
Figura 18 – Corpos de prova das configurações a) circular com galerias b) hexagonal com galerias e c) dutos após serem submetidos ao ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para os ensaios de tração nas estruturas vazadas, foi conduzida uma análise experimental utilizando DIC para corpos de prova com porcentagem de vazios de 32%. O procedimento para obtenção das imagens foi o mesmo que aplicado para os corpos de prova com furo central, as amostras foram filmadas, os vídeos foram divididos em quadros e processados no software Matlab Ncorr para análise de deformações. Na Figura 19 visualiza-se a definição da região de interesse (ROI).

Figura 19 – ROI definido para análise de deformação no Ncorr.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para as amostras que foram analisadas através do método DIC, é necessário definir o subconjunto a ser analisado na imagem. Foi definido um subconjunto com raio de 22 pixels para os corpos de prova de configuração circular com galerias, 10 pixels para os corpos de prova

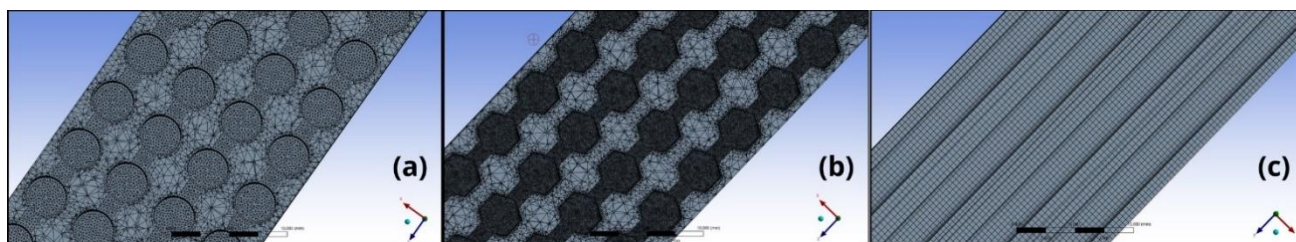
hexagonais com galerias e 40 para os corpos de prova com dutos. Conforme explicado na seção 3.2.2, Beleza apresenta essa diferença em seu trabalho, onde é apontado que o tamanho de grão e a qualidade da imagem analisada estão diretamente relacionados ao raio do subconjunto (BELEZA, 2017).

3.3.1.3 Análise de Elementos Finitos

Nesse trabalho utilizou-se simulação no software Ansys 2024 R1. Como parâmetros de entrada para a simulação foram adicionados o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o tipo de estrutura isotrópica. Foram modeladas geometrias com cavidades circulares com galerias, hexagonais com galerias e dutos.

Desenvolveu-se uma malha estruturada para os modelos estudados. Para as cavidades realizou-se um refinamento garantir maior precisão dos resultados. Na Figura 20 é possível observar as malhas elaboradas para os modelos com cadeias de furos circular, hexagonal e com dutos.

Figura 20 – Modelos de corpo de prova seccionado com malha para as configurações a) circular com galerias; b) hexagonal com galerias e c) com dutos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os elementos utilizados pelo software para a encontrar a solução foram o SOLID185 e SURF154.

Para o modelo do corpo de prova totalmente preenchido foram utilizados 24000 elementos e 109437 nós. Na Tabela 8 é possível verificar a quantidade de elementos e nós que foram utilizados para os demais modelos desenvolvidos.

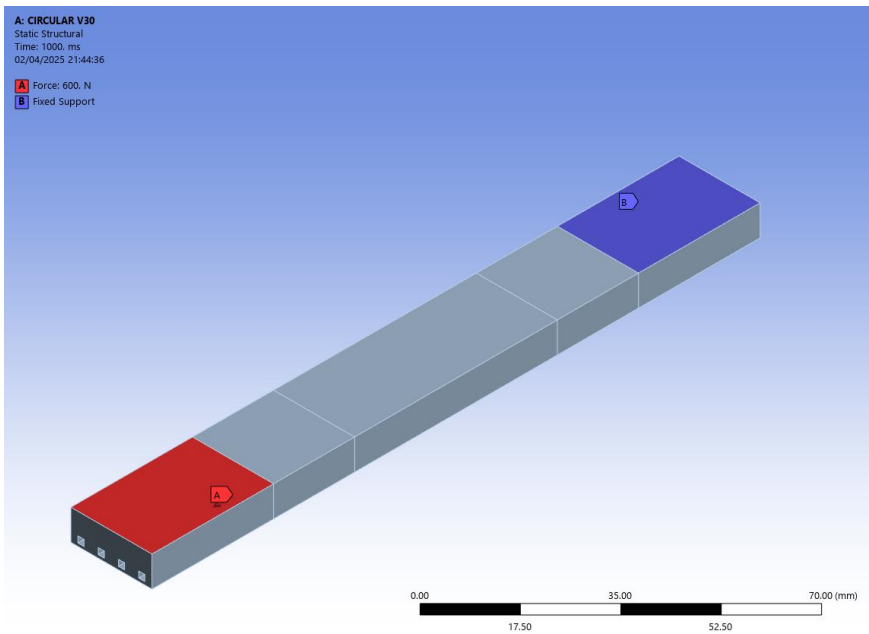
Tabela 8 – Quantidade de nós e elementos para todas as configurações e porcentagens analisadas.

% de Vazios	Circular com galerias		Hexagonal com galerias		Dutos	
	Elementos	Nós	Elementos	Nós	Elementos	Nós
15%	302.212	501.640	1.196.335	2.030.902	107.510	487.360
23%	400.226	672.898	1.675.447	2.833.368	102.901	468.520
32%	423.619	714.724	1.916.960	3.245.056	83.793	395.199

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Buscando representar as condições do corpo de prova em um ensaio de tração, onde é aplicada carga axial, empregou-se o carregamento de 600 N na região A e a região de fixação em B. Na Figura 21 está representada as condições de contorno do corpo de prova com circular com galerias, a mesma condição foi aplicada para as demais configurações.

Figura 21 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de carga axial.



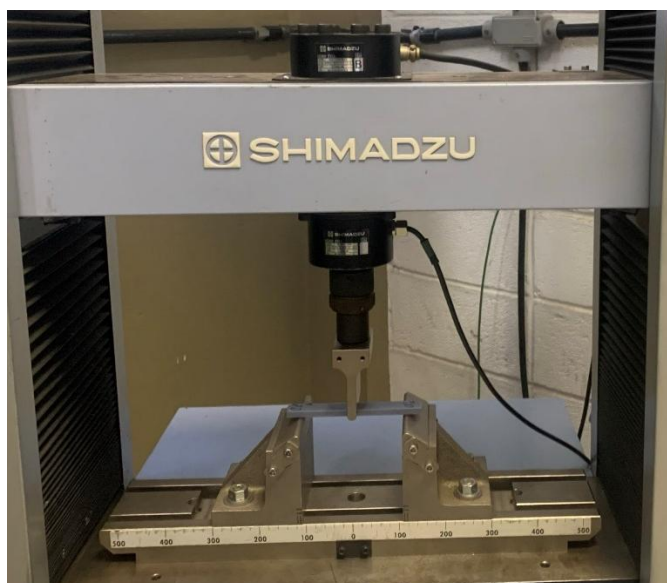
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.3.2 Ensaio de flexão

3.3.2.1 Corpo de prova e equipamentos: parâmetros gerais

Para o ensaio de flexão (Figura 22) se utilizou as células de 5 kN e a velocidade de teste de 3 mm/min de acordo com o padrão ASTM D790.

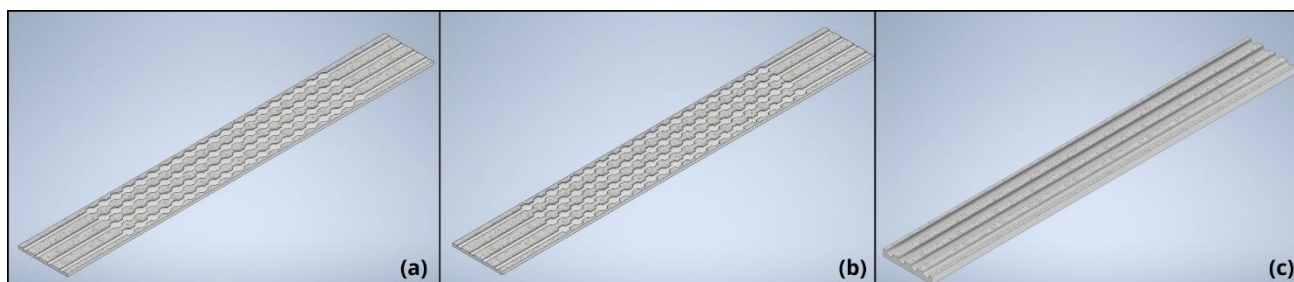
Figura 22 – Ambiente de testes no laboratório de ensaios preparado para o ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Da mesma maneira que apresentado na seção 3.3.1, utilizou-se o corpo de prova conforme norma D3039 e foi removida uma quantidade gradualmente crescente de material da amostra, tendo como padrão de comparação a amostra sem furos. Dessa forma, para as geometrias circular e hexagonal com galerias analisou-se corpos de prova com 20 células no eixo do comprimento e 4 no eixo da largura, resultando em 80 células unitárias. As especificações para cada um dos corpos de prova seguem os mesmos parâmetros que apresentados anteriormente nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7. Na Figura 23 é possível observar os corpos de prova utilizados para o ensaio.

Figura 23 – Configuração a) circular com galerias; b) hexagonal com galerias e c) com dutos de corpos de prova utilizado em ensaios de flexão.



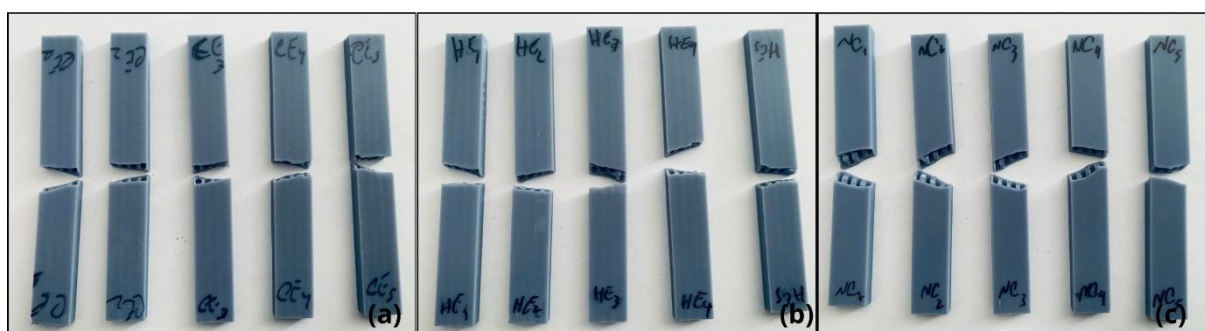
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A validação dos resultados ocorreu pela comparação entre simulação e pelo método experimental para corpos de prova com porcentagem de vazios de 32%. Para essa porcentagem o resultado de momento de inércia fornecido pelo Inventor foi de $499,75 \text{ mm}^4$ para o corpo de prova circular, $511,86 \text{ mm}^4$ para a configuração hexagonal e $642,11 \text{ mm}^4$ para a configuração de dutos.

3.3.2.2 Ensaios

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos. Na Figura 24 é possível visualizar os corpos de prova ensaiados para cada configuração utilizando os corpos de prova com 32% de vazios.

Figura 24 – Corpos de prova das configurações a) circular com galerias b) hexagonal com galerias e c) dutos após serem submetidos ao ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

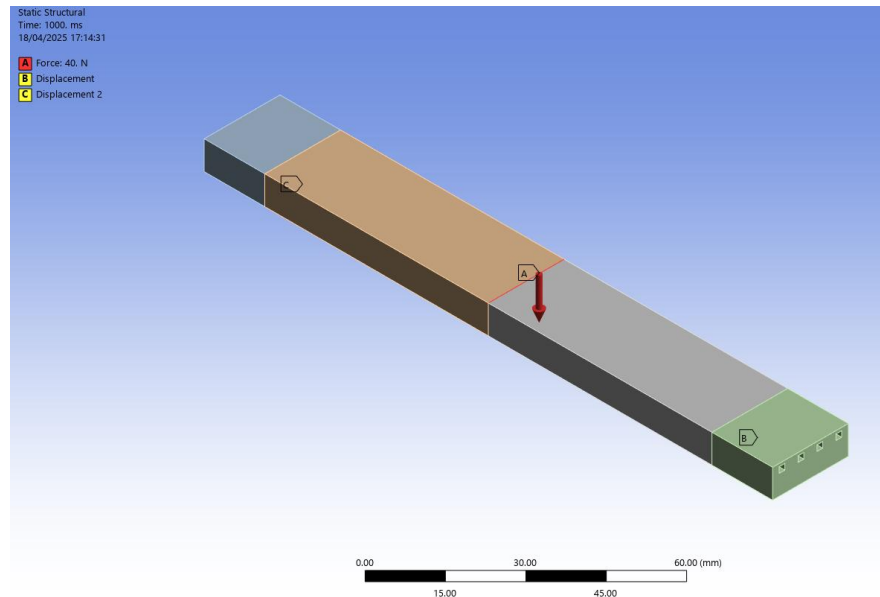
3.3.2.3 Análise de Elementos Finitos

Conforme explicado na seção 3.2.3, o software Ansys 2024 R1 foi utilizado para análise de elementos finitos. Os parâmetros de entrada para a simulação foram o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o tipo de estrutura isotrópica. Desenvolveu-se uma malha estruturada para os modelos estudados e para as cavidades realizou-se um refinamento garantir maior precisão dos resultados.

Para representar o ensaio de flexão em três pontos empregou-se o carregamento de 40 N na região A e restrições em todos os eixos em B e restrição apenas no eixo Y em C. Na

Figura 25 está representada as condições de contorno do corpo de prova com circular com galerias, a mesma condição foi aplicada para as demais configurações.

Figura 25 – Condições de contorno do corpo de prova para simulação de flexão em três pontos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

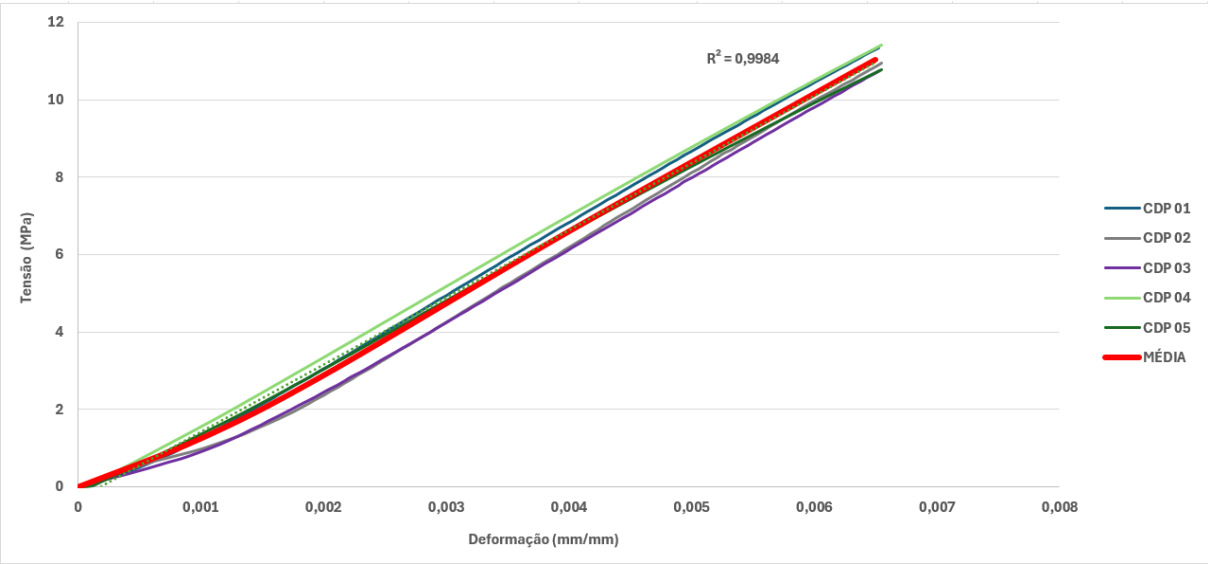
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDO DE PLACA COM FURO CENTRAL

4.1.1 Corpo de Prova Submetido a Carga Axial

As amostras com furo central foram submetidas à esforços axiais. Na Figura 26, visualiza-se a curva tensão-deformação média dos ensaios realizados nos cinco corpos de prova. A Tabela 9 mostra os dados experimentais das amostras, com os valores de tensão-deformação juntamente com sua média e desvio padrão.

Figura 26– Curva média tensão x deformação dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 9 – Dados experimentais dos cinco corpos de prova, incluindo os valores de deformação-tensão juntamente com sua média e desvio padrão.

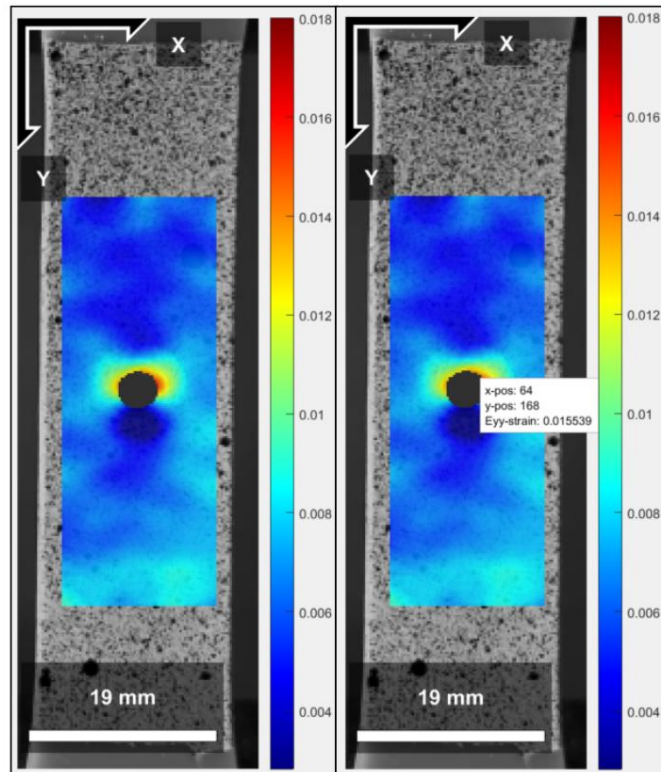
Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)					Média	Desvio padrão
	CDP 01	CDP 02	CDP 03	CDP 04	CDP 05		
0,00100	1,319	1,002	0,906	1,619	1,412	1,252	0,294
0,00200	3,052	2,36	2,524	3,391	3,077	2,881	0,456
0,00400	6,892	6,215	6,199	7,01	6,696	6,603	0,378
0,00600	10,451	9,696	9,808	10,586	9,996	10,162	0,337

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As amostras submetidas a carregamentos axiais foram analisadas utilizando o método de correlação de imagens digitais. Os resultados de deformação para aplicação de carga

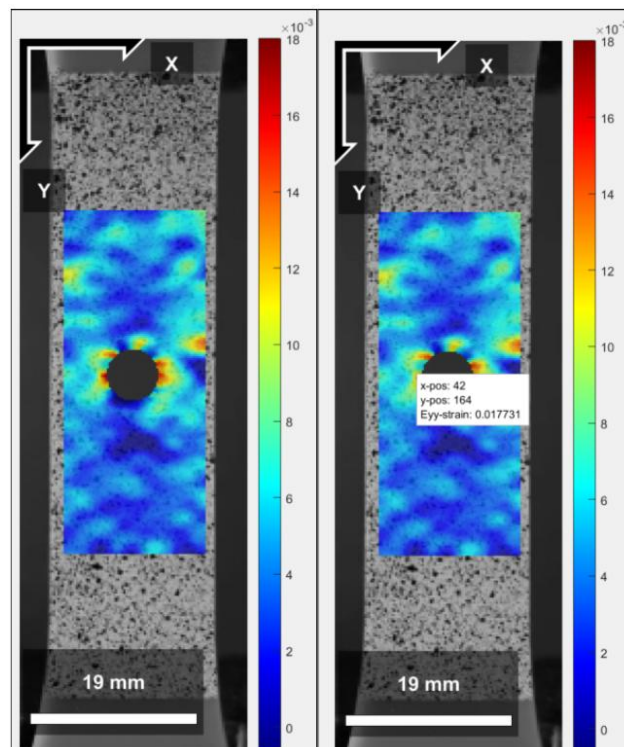
de 600 N para as relações d/w 0,3, 0,4 e 0,5 podem ser vistas nas Figura 27, Figura 28 e Figura 29.

Figura 27 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,3$.



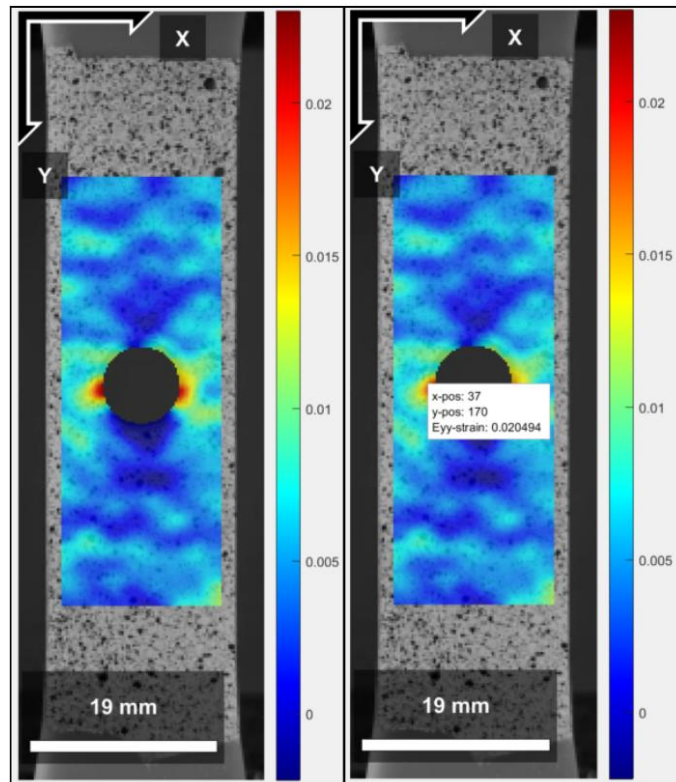
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 28 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,4$.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 29 – Campo de deformações obtidos por DIC para a relação $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Através dos valores de deformação obtidos pelo método DIC e sabendo-se o valor do módulo de Young calculou-se a tensão através da equação 3:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

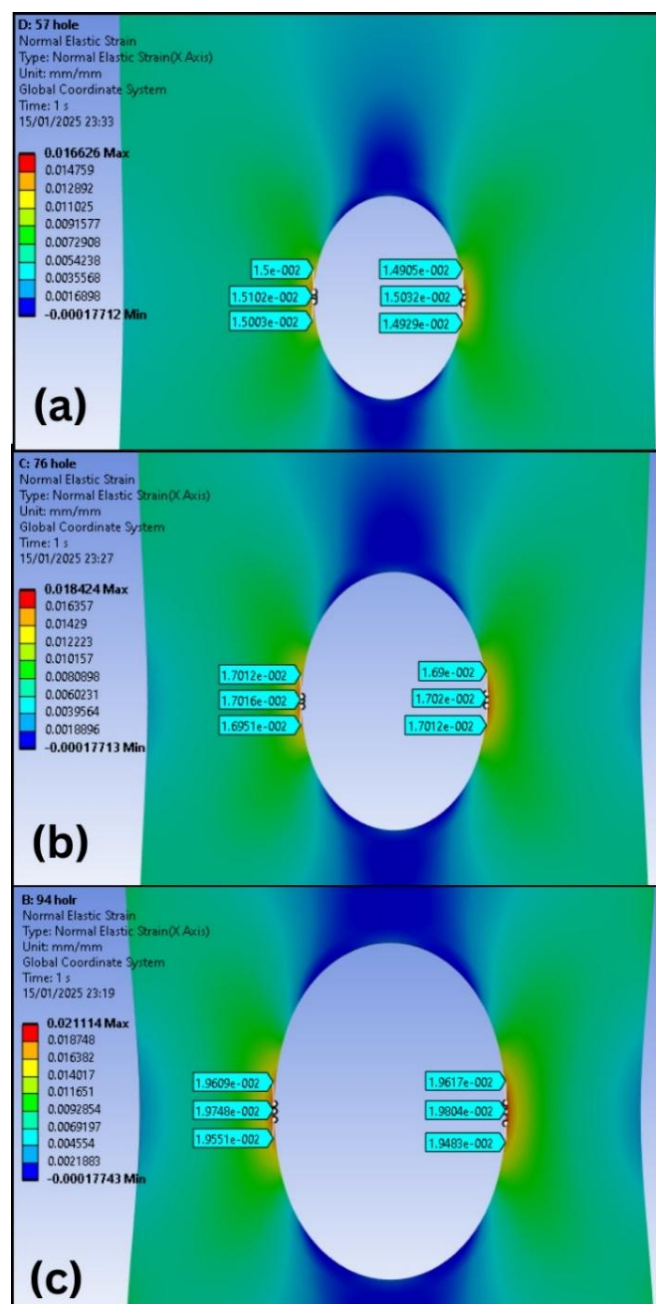
Na Tabela 10 encontram-se os resultados de tensão nominal para cada relação d/w analisada através do método DIC.

Tabela 10 – Resultados de tensão nominal obtidos por DIC para cada d/w .	
d/w	Tensão (MPa)
0,3	27,34
0,4	31,21
0,5	36,07

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É possível realizar a comparação entre os dados encontrados na análise DIC e na simulação utilizando MEF. Na Figura 30 encontra-se os valores de deformação encontrados ao redor dos furos de relação d/w 0,3, 0,4 e 0,5. A deformação máxima dos corpos de prova são encontrados dentro da cavidade do furo. Entretanto, para realizar a análise comparativa é necessário basear-se nos dados ao redor do furo na simulação, uma vez que a análise DIC é realizada no plano bidimensional.

Figura 30 – Campos de deformação obtidos por MEF com dados ao redor do furo de espécimes submetidos à carga axial para (a) $d/w = 0,3$; (b) $d/w = 0,4$; e (c) $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Tabela 11 estão os dados de deformação média obtidos através dos pontos selecionados ao redor do furo e os valores máximos de deformação obtidos por MEF (Figura 13). Adicionalmente, a Tabela apresenta os valores de deformação obtidos pelo método DIC. Assim, foi feita uma comparação entre o valor máximo e o método DIC, e uma região na borda do furo também foi selecionada para análise comparativa. Os valores de erro apresentados foram calculados conforme a Equação (4).

$$Erro\ Percentual = \frac{|Valor\ Exato - Valor\ aproximado|}{|Valor\ Exato|} \times 100\% \quad (4)$$

Tabela 11 – Deformação média dos furos para cada relação d/w e valores obtidos por DIC.

d/w	Max MEF (mm/mm)	Média MEF (mm/mm)	DIC (mm/mm)	Erro (Max) (%)	Erro (Média) (%)
0,3	0,0166	0,0149	0,0155	6,6260	4,4390
0,4	0,0184	0,0168	0,0177	3,8040	5,7770
0,5	0,0211	0,0196	0,0205	2,8440	4,35270

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados da simulação de deformação, bem como a tensão para uma carga de 600 N, podem ser encontrados na Tabela 12. Os dados apresentados na Tabela 12 para os corpos de prova entalhados referem-se aos valores máximos encontrados, que coincidem com os valores ao redor do furo. Para a análise do corpo de prova sem furo, os resultados da Tabela 12 referem-se aos valores encontrados no meio do corpo de prova, mantendo assim a mesma referência para todos os corpos de prova.

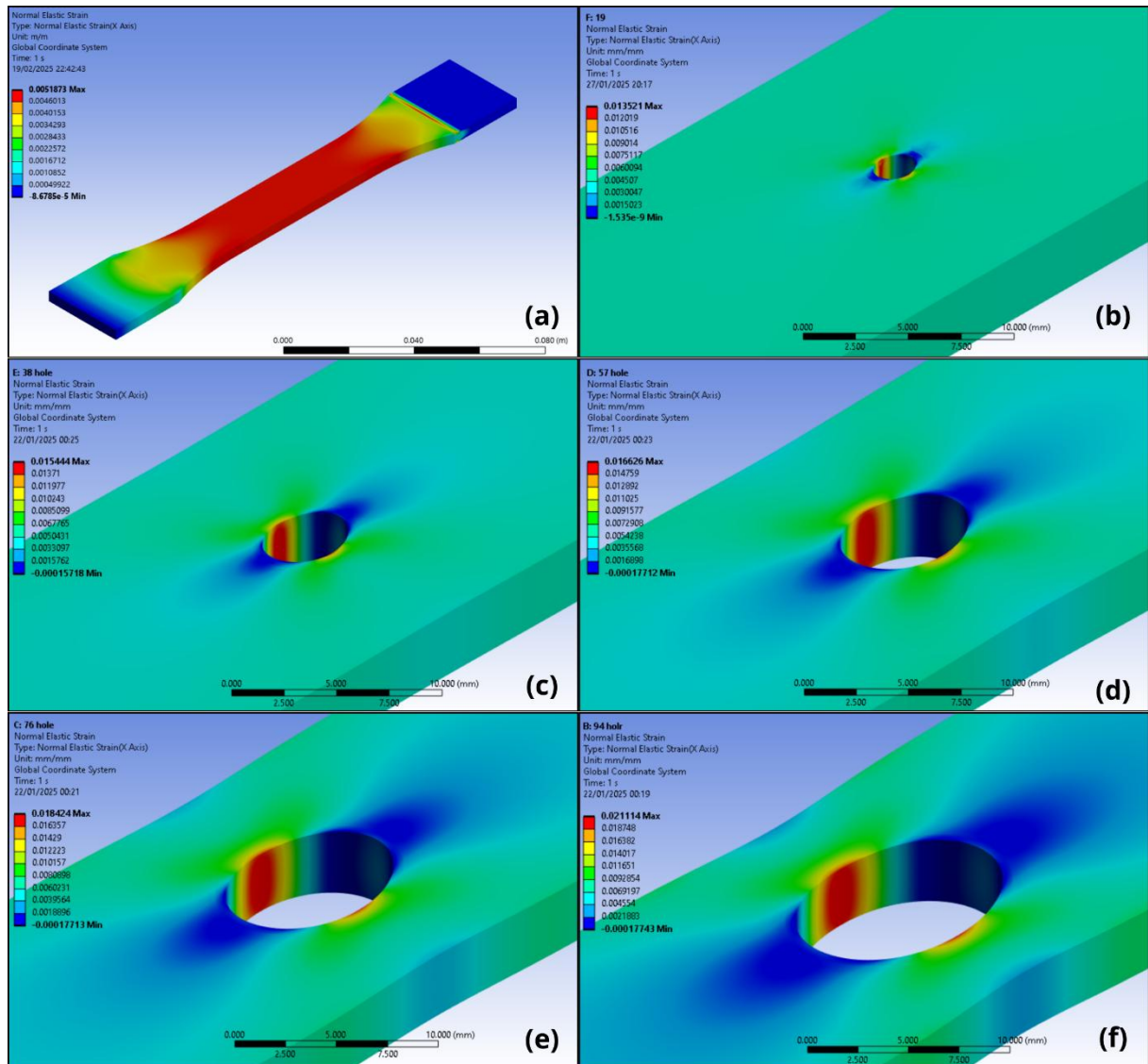
Tabela 12 – Resultados da análise MEF de tensão e deformação para espécimes submetidos à carga axial.

Diâmetro (mm)	d/w	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
Sem furo	-	8,533	0,00485
1,9	0,1	25,412	0,01352
3,8	0,2	28,401	0,01544
5,7	0,3	30,101	0,01663
7,6	0,4	33,070	0,01842
9,5	0,5	37,763	0,02111

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A simulação mostrou que o comportamento do campo de deformação foi o esperado, pois o campo de deformação aumenta e se concentra na parede interna do furo conforme a razão d/w aumenta. Além disso, é possível ver o efeito da carga axial no espécime sem furo na Figura 31.

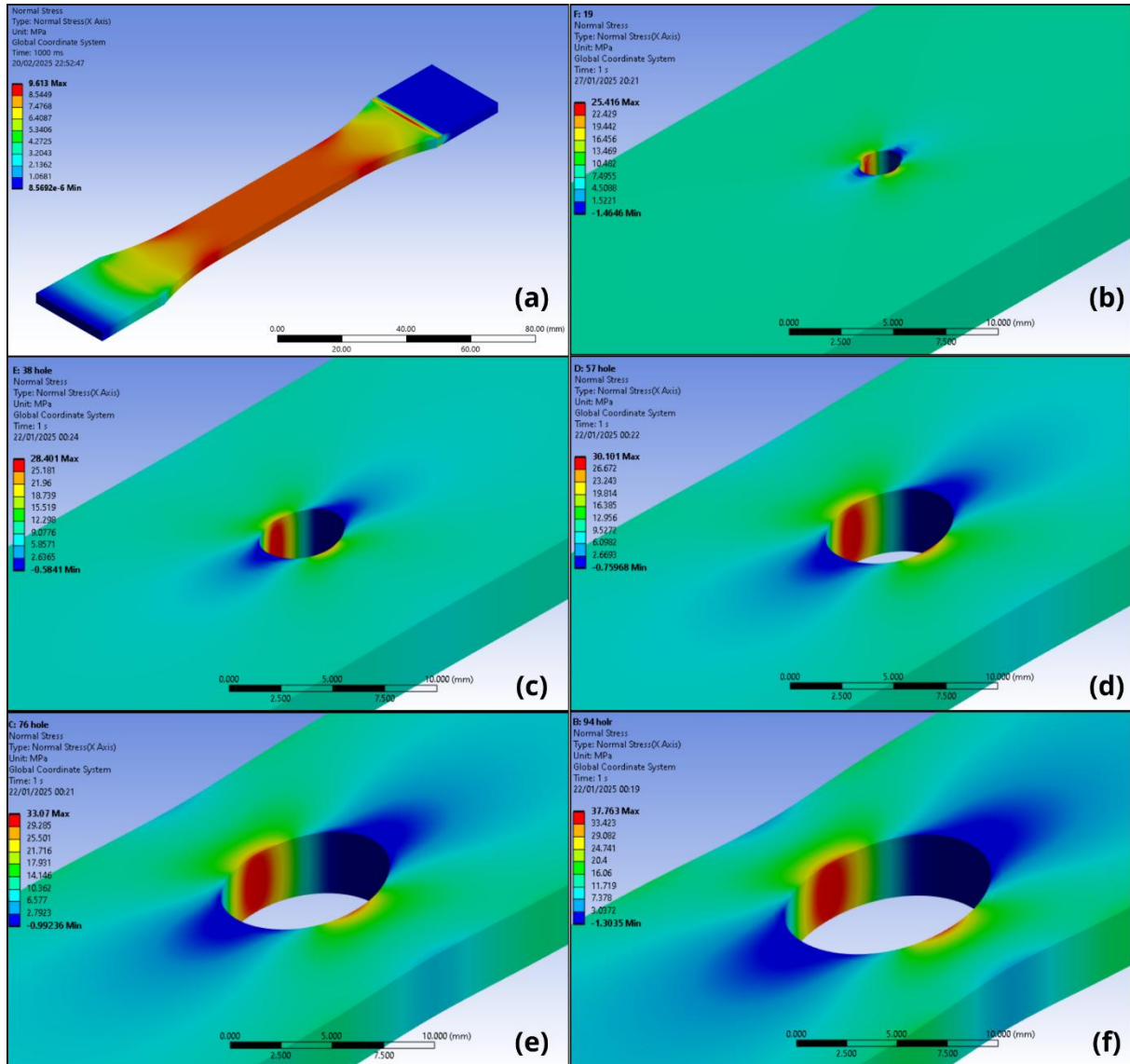
Figura 31 – Campo de deformação obtido por MEF para corpos de prova submetidos a carga axial para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além do campo de deformação, o campo de tensão também foi analisado. Como esperado, a tensão máxima concentrou-se na cavidade interna do furo. Na Figura 32, o campo de tensão para cada razão d/w estudada pode ser identificado.

Figura 32 – Campo de tensões obtido por MEF para corpos de prova submetidos a carga axial para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Tabela 13, são apresentados os resultados do fator de concentração de tensões (K_t) pelo método analítico, simulação e DIC. Foi realizado o cálculo do erro percentual (Equação (4)) para os métodos MEF e DIC em comparação ao método analítico de Whitney–Nuismer. Pode-se observar que, em todos os casos, o erro ficou abaixo de 6%, indicando que o estudo apresenta resultados consistentes. Além disso, em todos os casos analisados, quanto maior a relação d/w , menor o K_t encontrado. Isso ocorre porque, quando o diâmetro aumenta, a área onde a carga é distribuída é maior, suavizando assim a distribuição de tensões.

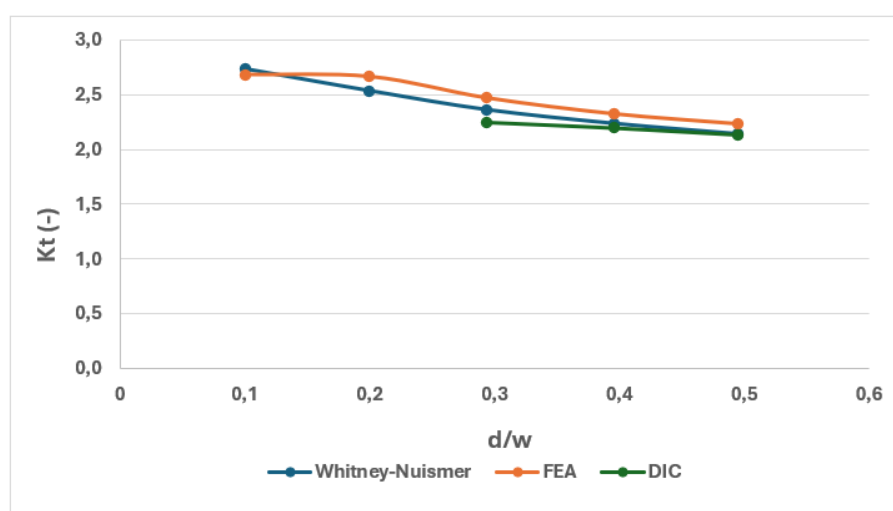
Tabela 13 – Resultados de K_t encontrados por Whitney–Nuismer, MEF e DIC.

Diâmetro (mm)	d/w	Whitney– Nuismer	MEF (mm/mm)	Erro MEF (%)	DIC (mm/mm)	Erro DIC (%)
1,9	0,1	2,7290	2,6805	5,6438	-	-
3,8	0,2	2,5317	2,6621	4,9003	-	-
5,7	0,3	2,3609	2,4688	4,3696	2,2430	5,2547
7,6	0,4	2,2371	2,3248	3,7752	2,1938	1,9707
9,5	0,5	2,1442	2,2354	4,0850	2,1353	0,4185

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 33 pode-se observar a diferença gráfica entre os modelos teórico, simulado e experimental.

Figura 33 – Gráfico comparativo dos métodos Whitney-Nuismer, MEF e DIC para espécimes submetidos a carga axial.



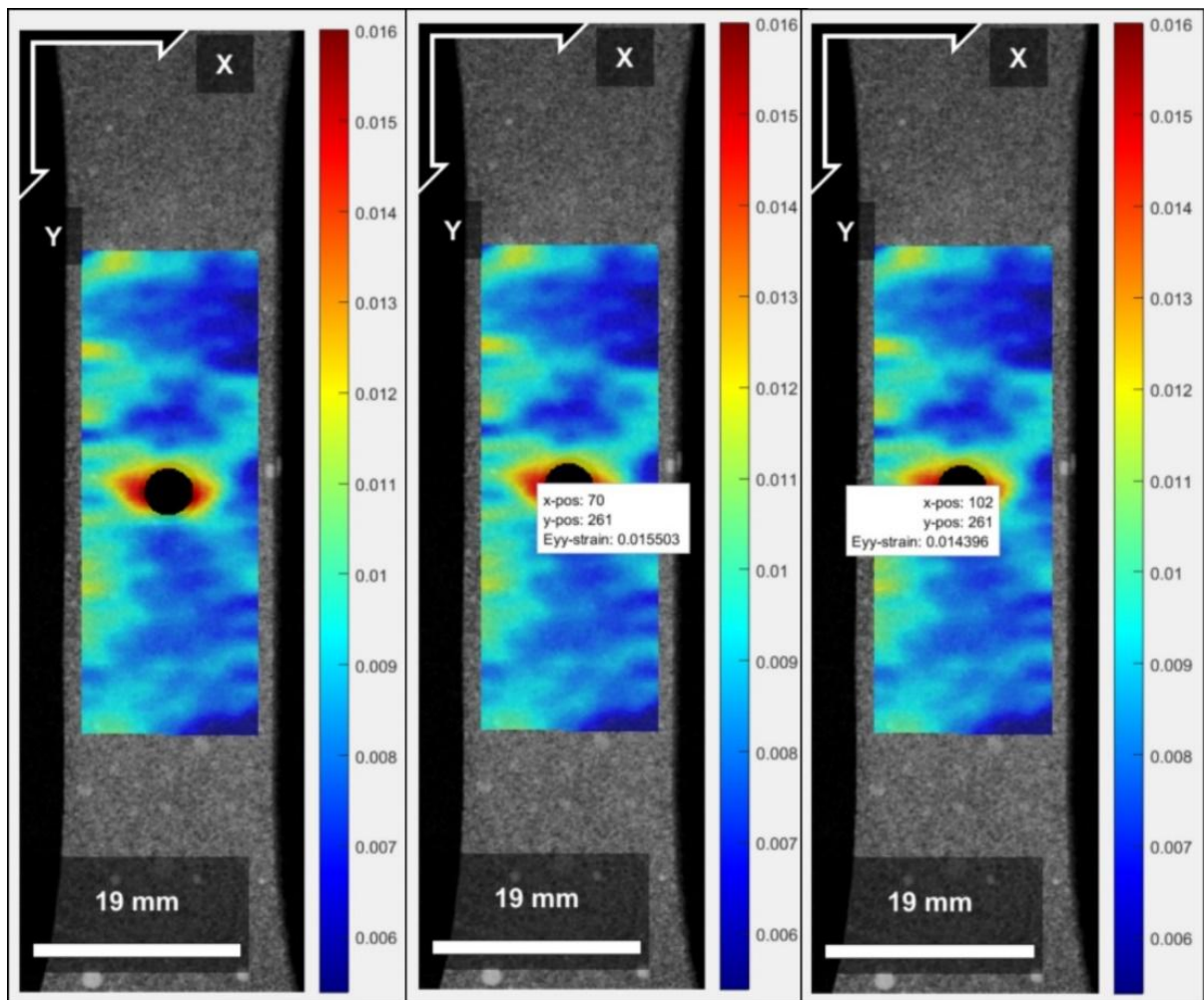
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.1.2 Corpo de Prova Submetido a Carga Excêntrica

As amostras quando submetidas a cargas excêntricas estão sob ação do efeito de tração combinado com a flexão gerada pela ação do momento fletor sobre os corpos de prova. Devido a ação da garra na região superior das amostras, o efeito de flexão foi minimizado nos ensaios que foram realizados. Este fenômeno foi analisado pelo método de Correlação de Imagem

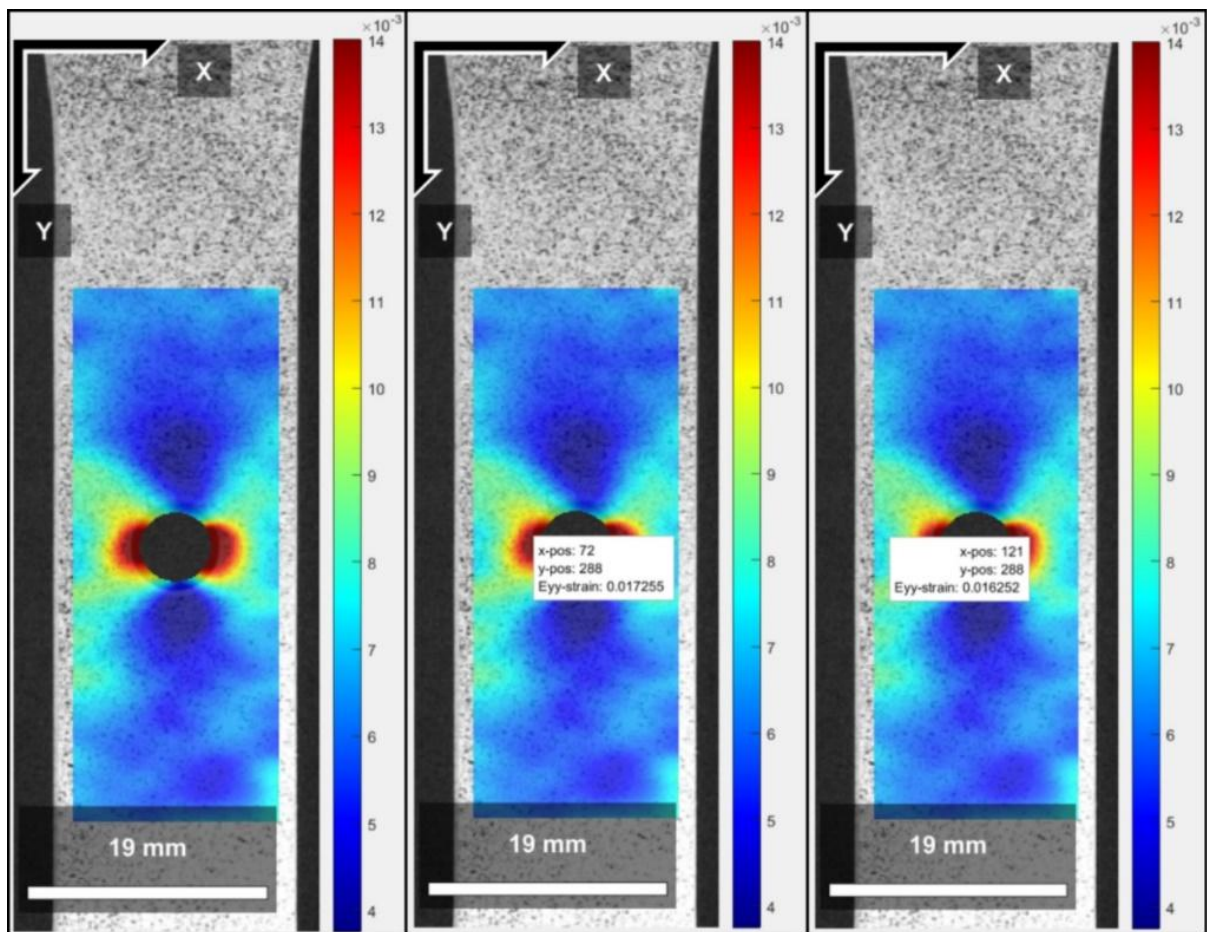
Digital. As Figura 34, Figura 35 e Figura 36 apresentam os resultados de deformação para as relações d/w de 0,3, 0,4 e 0,5, respectivamente, para uma aplicação de carga de 600 N, destacando os campos de deformação que são mais evidentes no lado esquerdo em comparação ao direito. Foram indicados valores de deformação com posições cartesianas. É possível perceber que os valores foram obtidos da mesma coordenada y , modificando apenas a coordenada x para evidenciar que o lado esquerdo tem valores mais expressivos que o lado direito devido à carga excêntrica aplicada.

Figura 34 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,3.



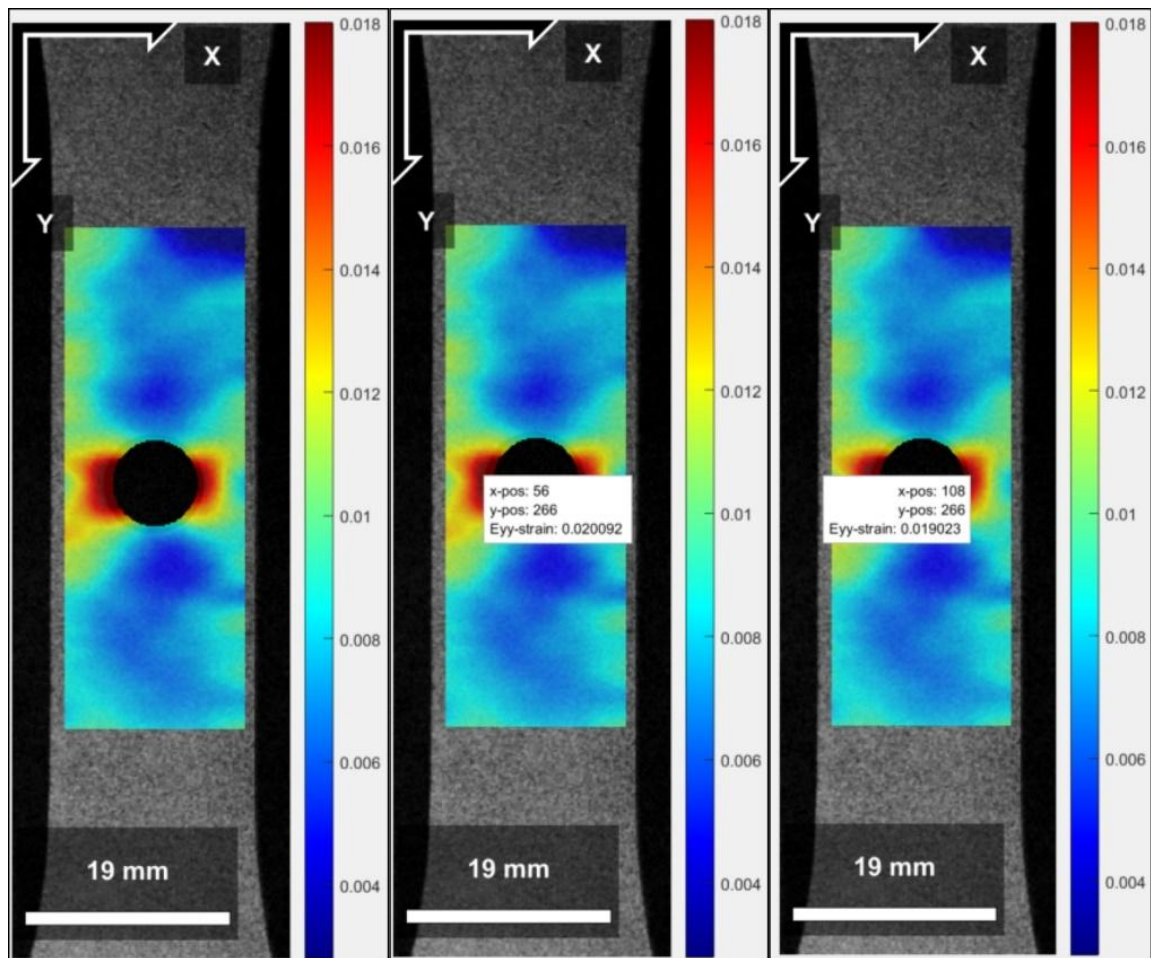
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 35 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,4.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 36 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a razão d/w de 0,5.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A obtenção das tensões para os corpos de prova submetidos a carregamentos excêntricos foi o mesmo que a metodologia empregada para os carregamentos axiais, utilizando a deformação obtida pelo método DIC para cada relação d/w e aplicando a equação (3). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 14.

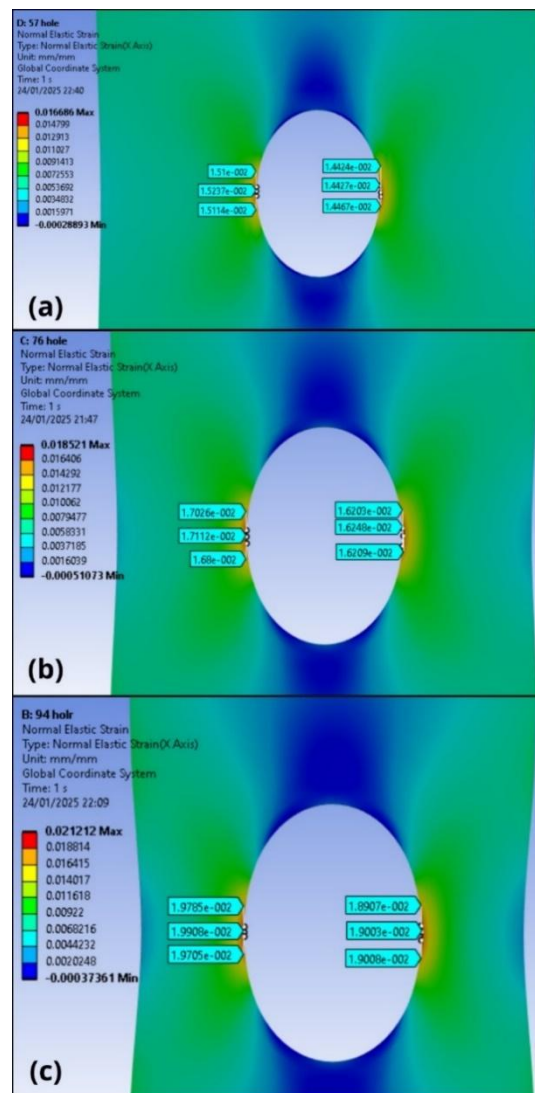
Tabela 14 – Resultados de tensão nominal obtidos por DIC para ambos os lados da amostra e para cada d/w .

d/w	Tensão do lado esquerdo (MPa)	Tensão do lado direito (MPa)
0,3	26,882	25,463
0,4	30,369	28,604
0,5	35,200	33,440

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Devido ao fato de o corpo de prova ter sido submetido a uma carga excêntrica, as análises pelo método de Whitney–Nuismer ficam comprometidas, pois o método é válido apenas para situações em que a amostra estudada é submetida a cargas aplicadas simetricamente. Para amostras submetidas a carga excêntrica, há uma assimetria no campo de tensões, e por isso a análise MEF foi empregada para fazer comparações com DIC. A Figura 37 mostra os campos de deformação obtidos por MEF, contendo dados de deformação ao redor dos furos para cada relação d/w estudada. Percebe-se que os valores encontrados na região ao redor do furo no lado esquerdo são maiores do que no lado direito.

Figura 37 – Campos de deformação obtidos por MEF com dados ao redor do furo de corpos de prova submetidos a cargas excêntricas para (a) $d/w = 0,3$; (b) $d/w = 0,4$; e (c) $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Tabela 15, podem ser encontrados os dados de deformação média obtidos pelos pontos selecionados ao redor do furo no lado esquerdo e os valores máximos de deformação obtidos por MEF (Figura 37). Além disso, a tabela também apresenta os valores máximos encontrados pelo método DIC. Assim, foi realizada uma comparação entre o valor máximo encontrado por MEF e o valor de deformação obtido por DIC. Além disso, uma região na borda esquerda do furo foi selecionada para uma análise comparativa.

Na Tabela 16, podem ser encontrados os dados de deformação obtidos por MEF e os dados de deformação obtidos pelo método DIC, ambos para o lado direito. Os dados de valor máximo obtidos por MEF não foram comparados ao método DIC para o lado direito, uma vez que, no caso de uma carga excêntrica, a assimetria gerada resulta em um valor de deformação menos significativo para este lado. A assimetria encontrada nos resultados ocorre porque a garra estava fixada no lado esquerdo e parcialmente livre no lado direito (Figura 10). Assim, a região mais afetada pela carga aplicada foi o lado esquerdo.

Os valores de erro encontrados nas tabelas foram calculados conforme a Equação (4) e demonstram resultados consistentes, pois o maior erro encontrado para o lado esquerdo (Tabela 15) foi de 6,9% e para o lado direito 0,3% (Tabela 16).

Tabela 15 – Deformação média e máxima dos furos para as relações d/w e valores encontrados pelo método DIC no lado esquerdo.

<i>d/w</i>	MEF (Esquerda)			Max	Média (MEF)	DIC	Erro	Erro
	(mm/mm)			(MEF) (mm/mm)	(mm/mm)	(mm/mm)	(Max) (%)	(Média) (%)
0,3	0,0151	0,0152	0,0151	0,0167	0,0152	0,0155	6,8680	2,3080
0,4	0,0170	0,0171	0,0168	0,0185	0,0170	0,0173	4,2657	1,6235
0,5	0,0198	0,0199	0,0191	0,0212	0,0196	0,0200	3,4037	2,1398

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 16 – Deformação média dos furos para as relações d/w e valores encontrados pelo método DIC no lado direito.

d/w	MEF (Direita) (mm/mm)			Média (MEF) (mm/mm)	DIC (mm/mm)	Erro (%)
0,3	0,0144	0,0144	0,0145	0,0144	0,0144	0,3001
0,4	0,0162	0,0163	0,0162	0,0162	0,0163	0,1973
0,5	0,0189	0,0190	0,0190	0,0189	0,0190	0,1441

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados de deformação, bem como a tensão para 600 N com carregamento excêntrico obtidos por MEF, podem ser encontrados na Tabela 17. Os resultados apresentados na tabela para os corpos de prova com furo referem-se aos valores máximos obtidos, que são iguais aos valores ao redor do furo. Para o corpo de prova sem furo, os resultados referem-se aos valores encontrados no meio da peça, mantendo-se assim a mesma referência para todos os corpos de prova.

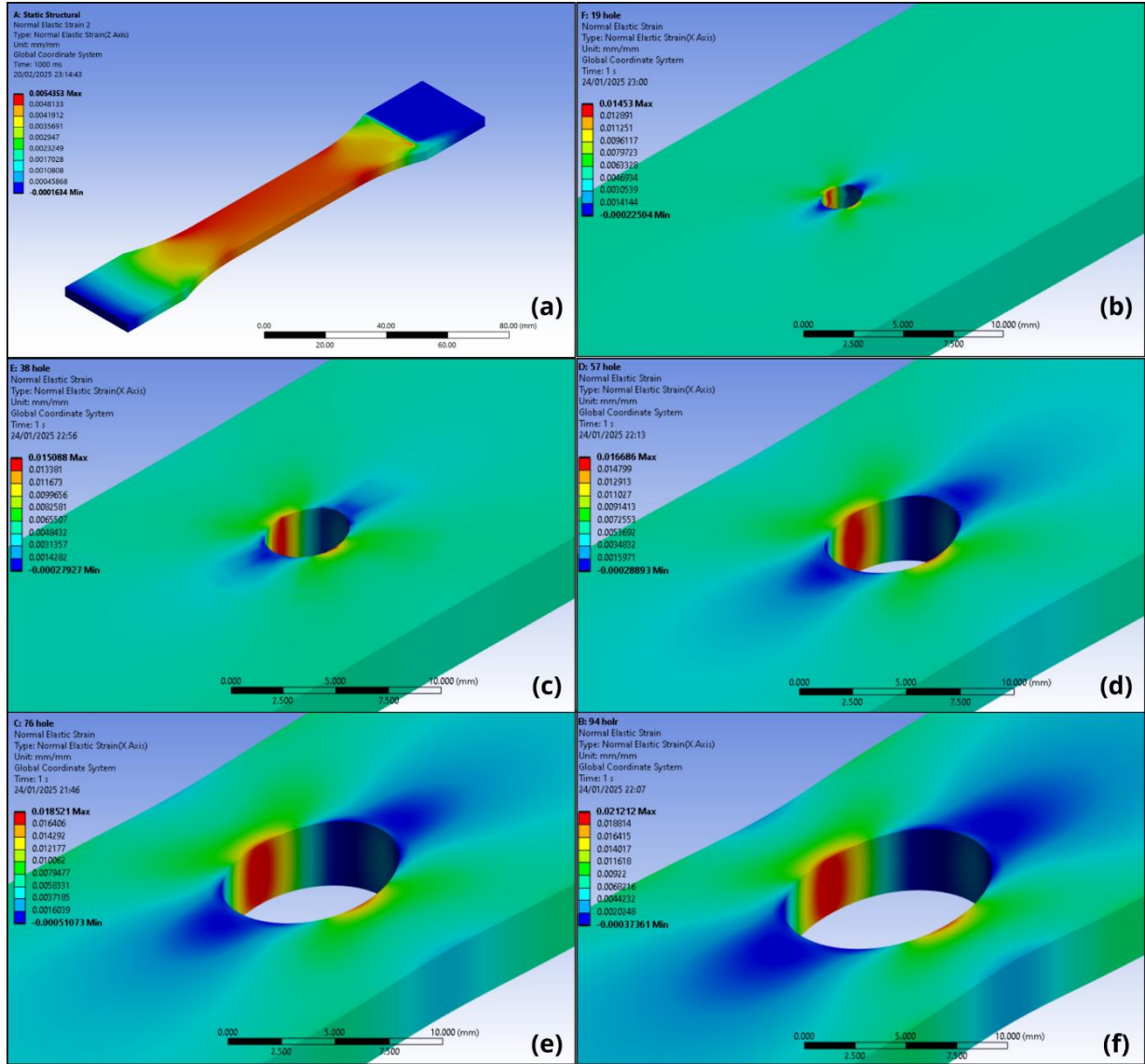
Tabela 17 – Resultados da análise MEF de tensão e deformação para amostras submetidas à carga excêntrica.

Diâmetro (mm)	d/w	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
Sem furo	-	8,5629	0,00484
1,9	0,1	26,976	0,01453
3,8	0,2	27,615	0,015088
5,7	0,3	29,982	0,016686
7,6	0,4	33,288	0,018521
9,5	0,5	37,981	0,021212

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Através da simulação, é possível estudar o comportamento dos campos de deformações quando submetidos a cargas excêntricas. Devido ao efeito do aumento do tamanho da razão d/w , é possível perceber que o campo de deformações aumenta na região esquerda (Figura 38), que é submetida à carga mais intensa.

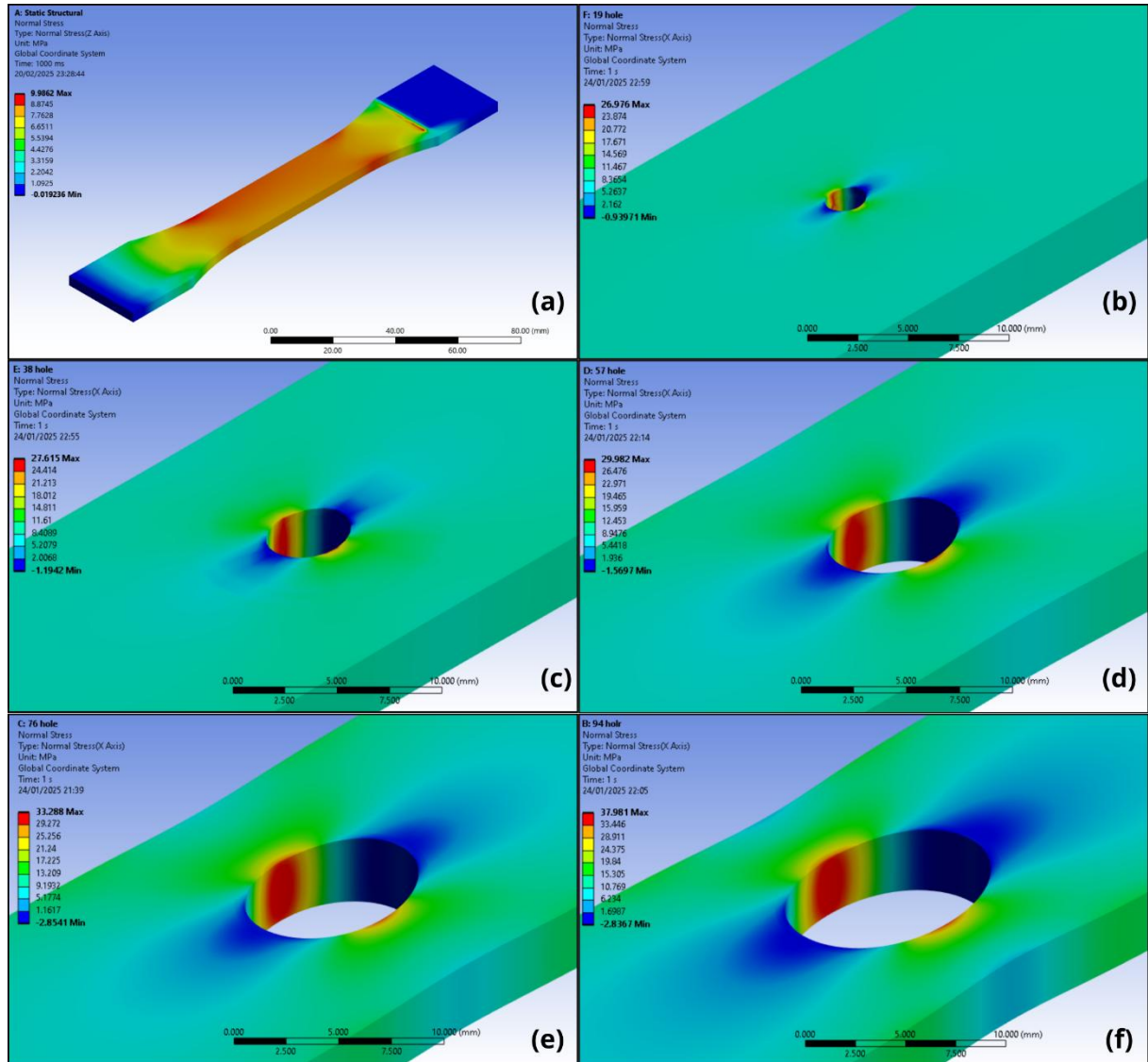
Figura 38 – Campo de deformação obtido por MEF para corpos de prova submetidos à carga excêntrica para (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Além do campo de deformação, o campo de tensão também foi analisado, como pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Campo de tensões obtido por MEF para corpos de prova submetidos à carga excêntrica (a) sem furo; (b) $d/w = 0,1$; (c) $d/w = 0,2$; (d) $d/w = 0,3$; (e) $d/w = 0,4$; e (f) $d/w = 0,5$.



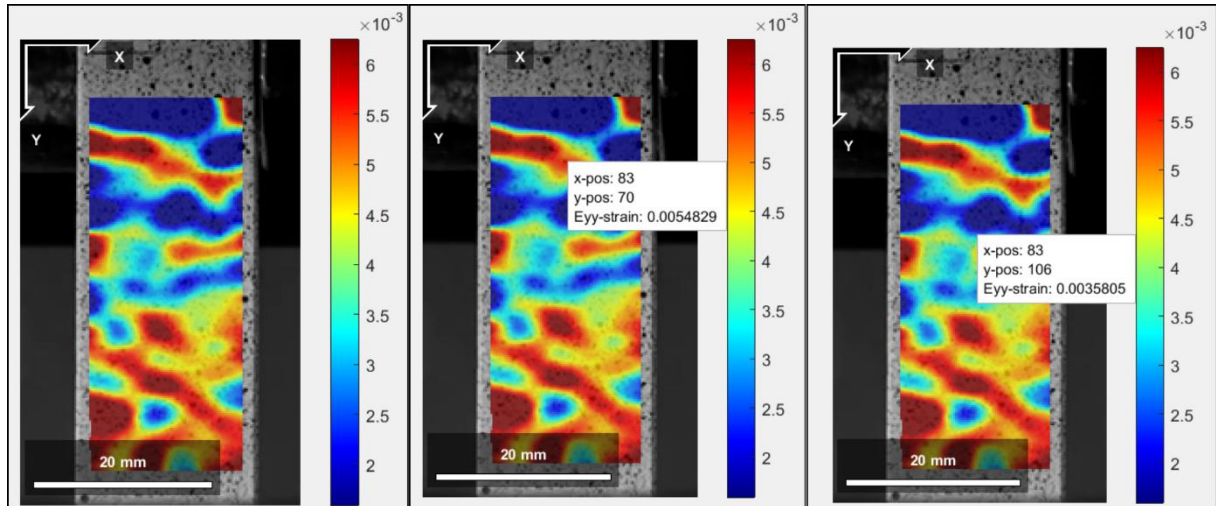
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2 ESTUDO DE CADEIA DE FUROS

4.2.1 Corpo de Prova Submetido a Ensaio De Tração

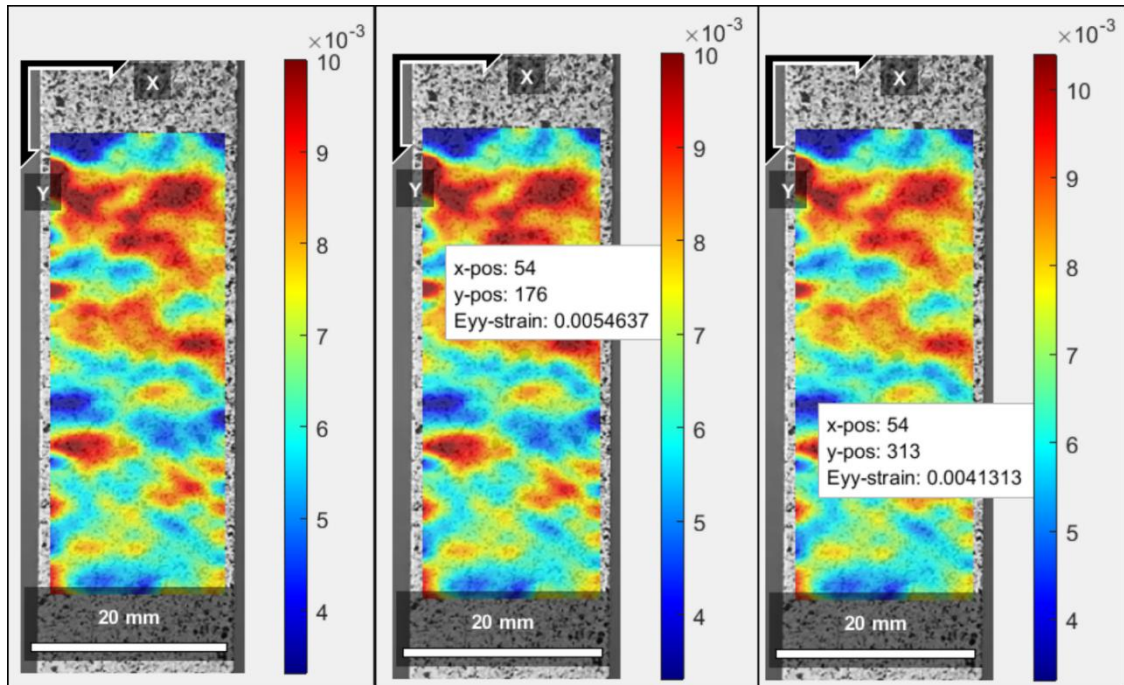
Os corpos de prova com diferentes geometrias de cadeia de furos que foram submetidos a esforços axiais foram analisados utilizando o método de correlação de imagens digitais. É possível observar os resultados de deformação para aplicação de carga de 600 N para as geometrias circulares com galerias, hexagonais com galerias e corpos de prova com dutos nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42 respectivamente.

Figura 40 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração circular com galerias e porcentagem de 32% de vazios.



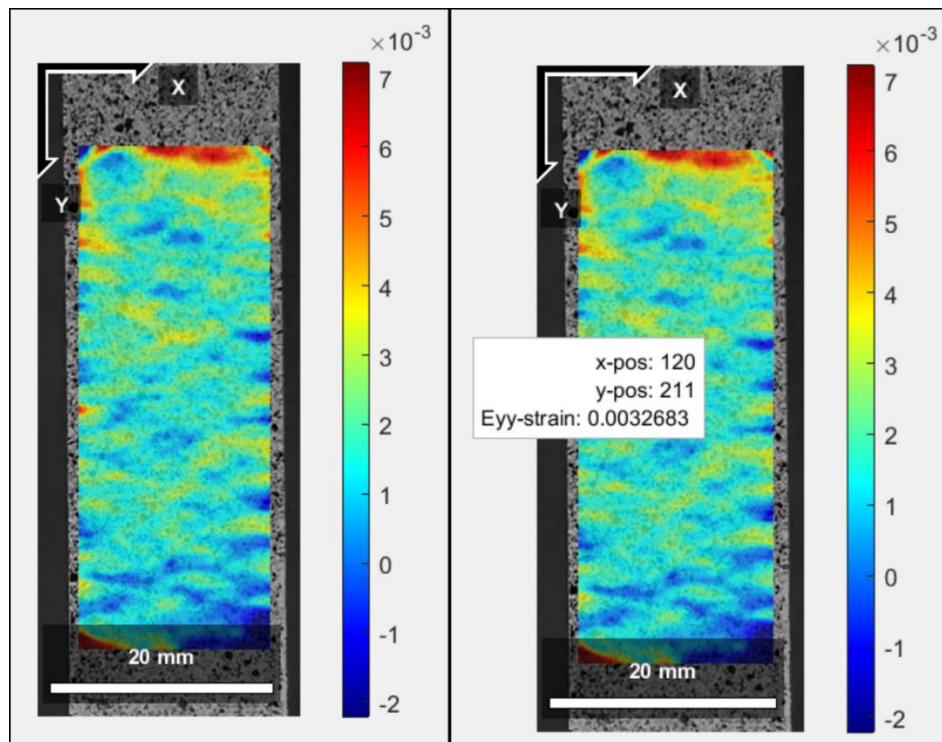
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 41 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração hexagonal com galerias e porcentagem de 32% de vazios.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 42 – Diagramas dos campos de deformação (mm/mm) gerados pelo método DIC para a configuração de dutos e porcentagem de 32% de vazios.

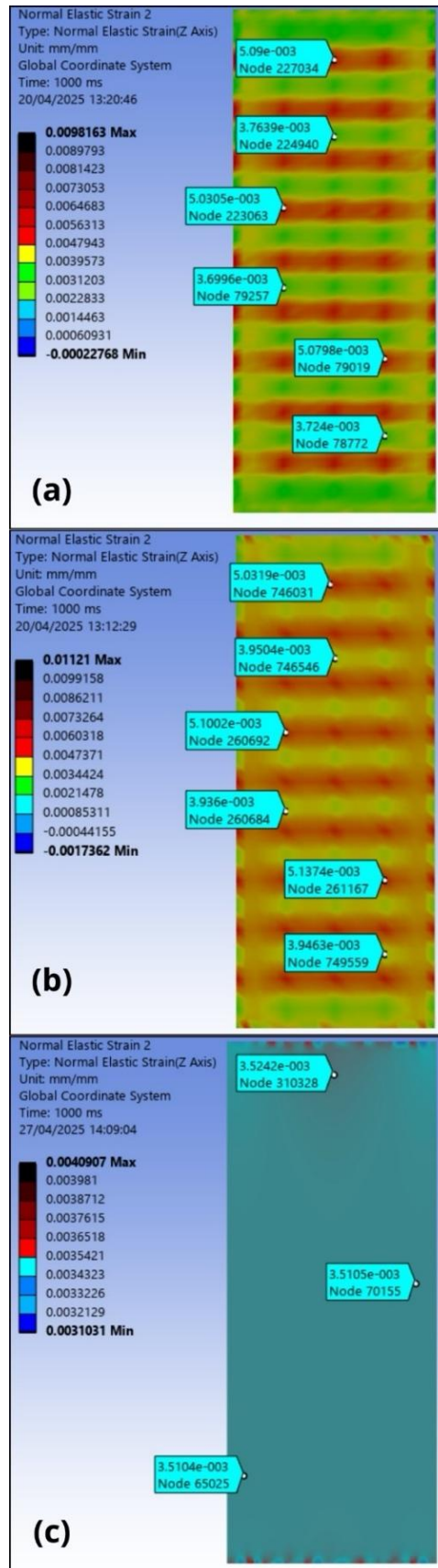


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

É possível realizar a comparação entre os dados encontrados na análise DIC e na simulação utilizando MEF. Na Figura 43 encontra-se os valores de deformação encontrados para as configurações circulares com galerias, hexagonais com galerias e de dutos. A deformação máxima dos corpos de prova é encontrada dentro da cavidade do furo. Entretanto, para realizar a análise comparativa é necessário basear-se nos dados superficiais na simulação, uma vez que a análise DIC é realizada no plano bidimensional.

Figura 43 – Campos de deformação obtidos por MEF com resultados na região central de espécimes submetidos a cargas axiais de porcentagens de 32% de vazios das configurações (a)

circular com galerias; (b) hexagonais com galerias; e (c) dutos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Realizando a comparação qualitativa entre o DIC e a simulação, observa-se que para o circular com galerias foi possível captar o padrão alternado de regiões. Entretanto, quando se observa a configuração hexagonal com galerias percebe-se que há algumas manchas e que o padrão intercalado de regiões não foi captado com clareza. Isso ocorre porque durante a preparação do corpo de prova, a pintura realizada gerou uma estrutura de grãos de tamanho elevado, e assim, dificulta uma identificação de padrões durante a análise uma vez que as deformações são muito pequenas. Conduzindo a mesma análise para a configuração de dutos, percebe-se que o método DIC e a simulação possuem correspondência, uma vez que foi captada região central percebe-se uma uniformidade no diagrama de deformação, enquanto nas extremidades há pontos com valores mais discrepantes.

Na Tabela 18 estão disponíveis os dados de deformação média obtidos através dos pontos selecionados na superfície de cada configuração obtidos por MEF (Figura 47) para uma análise quantitativa. Adicionalmente, a Tabela apresenta os valores de deformação obtidos pelo método DIC. Dessa forma, para as configurações circulares e hexagonais com galerias, realizou-se uma comparação entre os valores médios para as regiões dos furos e as regiões de transição e o método DIC. Os valores de erro apresentados na Tabela 18 foram calculados conforme a Equação (4). Analisando os resultados encontrados, percebe-se que o modelo de simulação estava representativo quando comparado a análise experimental utilizando o método DIC já que o erro máximo encontrado foi de 8,2%.

Tabela 18 – Deformação média para cada configuração de corpo de prova provenientes de análise MEF e análise DIC.

Configuração	Local	Média (MEF) (mm/mm)	DIC (mm/mm)	Erro (%)
Circular com galerias	Região dos furos	0,00507	0,00548	8,2
	Região de transição	0,00373	0,00376	4,0
Hexagonais com galerias	Região dos furos	0,00509	0,00546	7,3
	Região de transição	0,00394	0,00413	4,7
Dutos	-	0,00351	0,00327	7,0

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados da simulação de deformação, bem como o deslocamento para uma carga de 600 N, podem ser encontrados na Tabela 19. Os dados apresentados na Tabela 19 para cada configuração e porcentagem de vazios referem-se aos valores máximos encontrados.

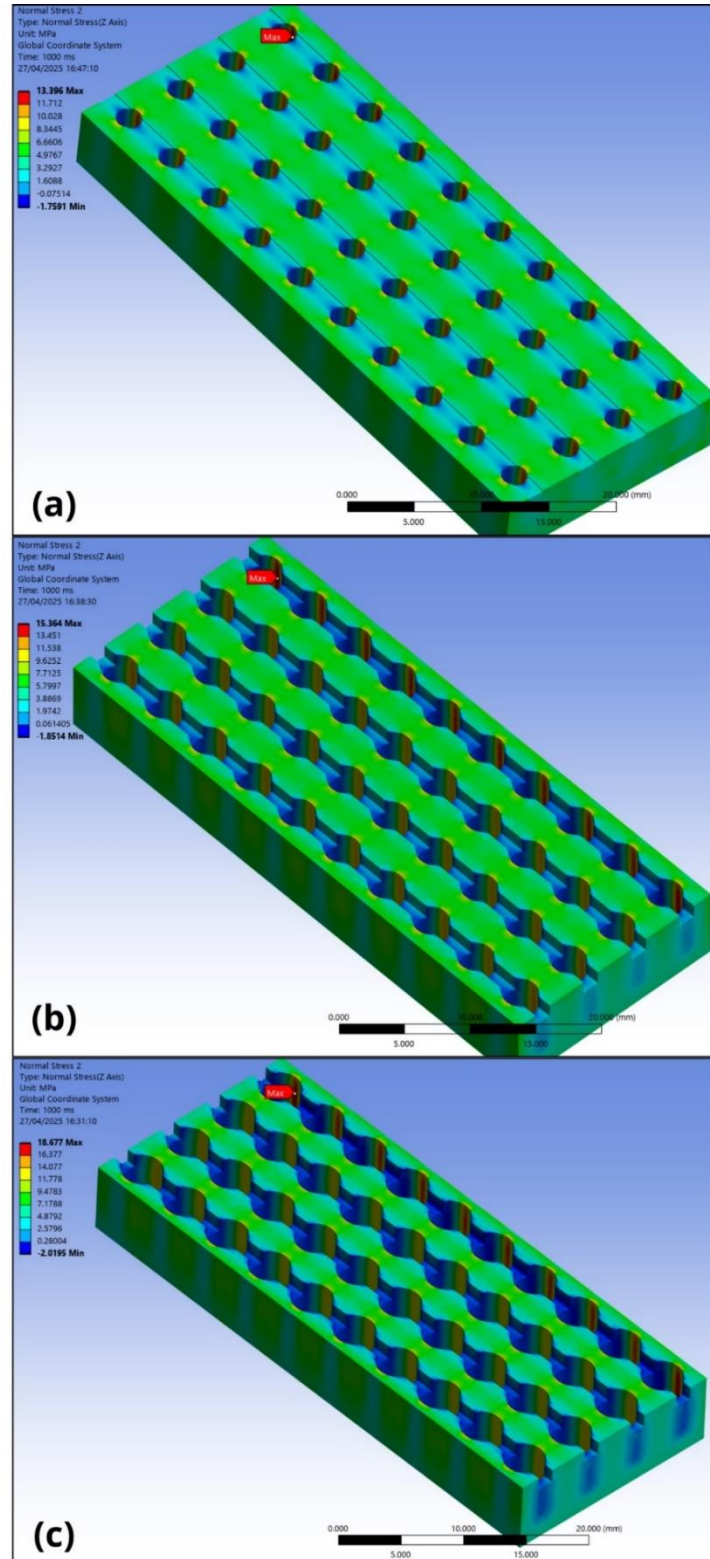
Tabela 19 – Resultados de deformação, tensão e deslocamento provenientes de análise MEF.

Configuração	Porcentagem de vazios (%)	Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
Circular	30	0,009816	18,677
	20	0,008088	17,662
	10	0,007075	13,396
Hexagonal	30	0,01121	26,731
	20	0,01	23,609
	10	0,00859	19,785
Dutos	30	0,00409	7,7921
	20	0,00356	6,6812
	10	0,00332	6,1883
Totalmente Preenchido	0	0,0023187	4,1113

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 44 é possível visualizar os campos de tensão da configuração circular com galerias para as porcentagens de 15%, 23% e 32%. Percebe-se que o campo de tensão ao redor da cadeia de furos apresenta aparência semelhante ao campo de deformação de um furo central em uma placa plana (Figura 32) uma vez que ao redor de cada furo da cadeia visualiza-se através do diagrama de cores, uma tensão mais elevada perpendicular a direção do carregamento e localizado no interior da borda o furo. Além disso, percebe-se que a máxima tensão está localizada nos furos que se encontram nas extremidades do corpo de prova. Isso se dá porque a espessura da parede da extremidade é menor do que a espessura da parede entre os furos.

Figura 44 – Campos de tensão obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.

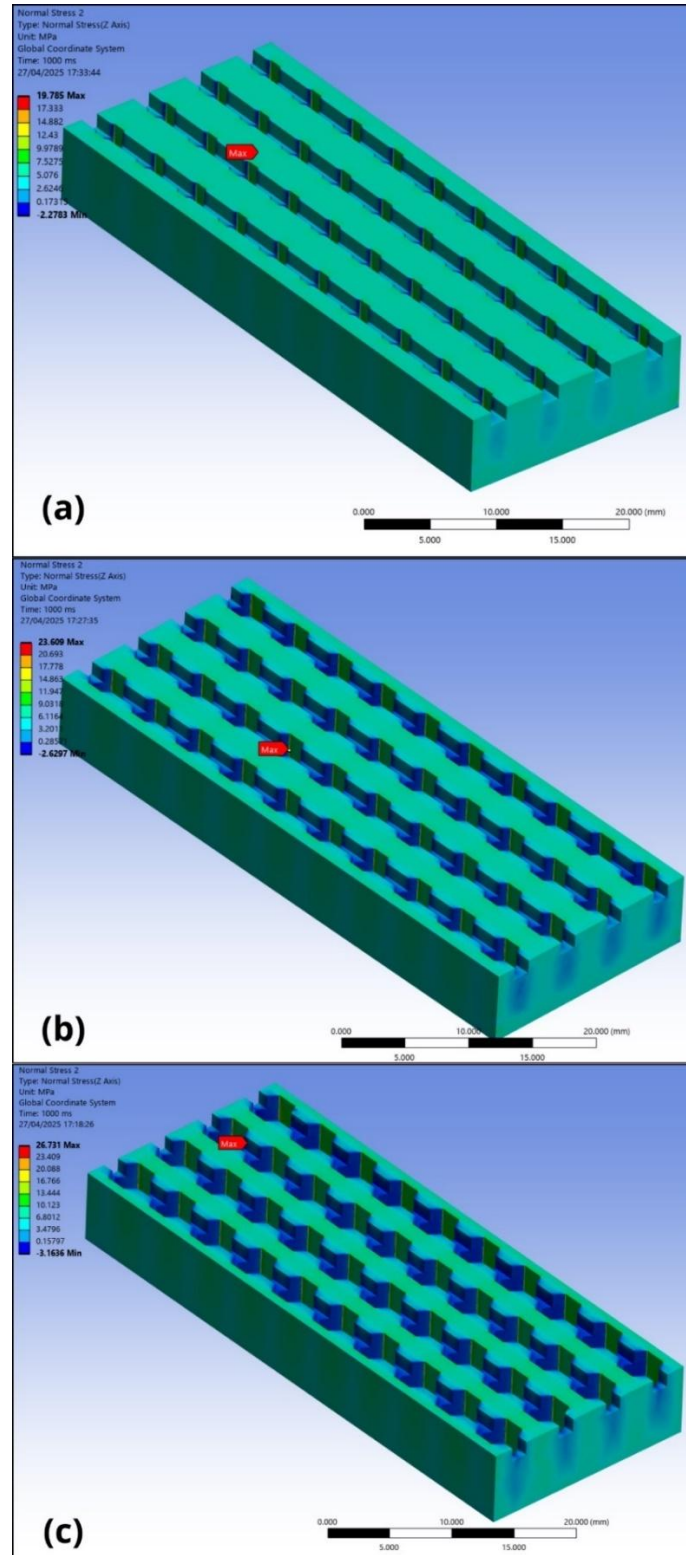


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 45 é possível visualizar os campos de tensão da configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de 15%, 23% e 32%. Percebe-se que a máxima de tensão se encontra em um ponto singular no interior da cavidade para todas as situações estudadas. O modelo de geometria circular não possui canto vivo e por isso a distribuição de tensão ao redor de furo é uniforme, diferente da geometria hexagonal que possui cantos agudos e por isso nesses pontos se localizam concentradores de tensões pontuais.

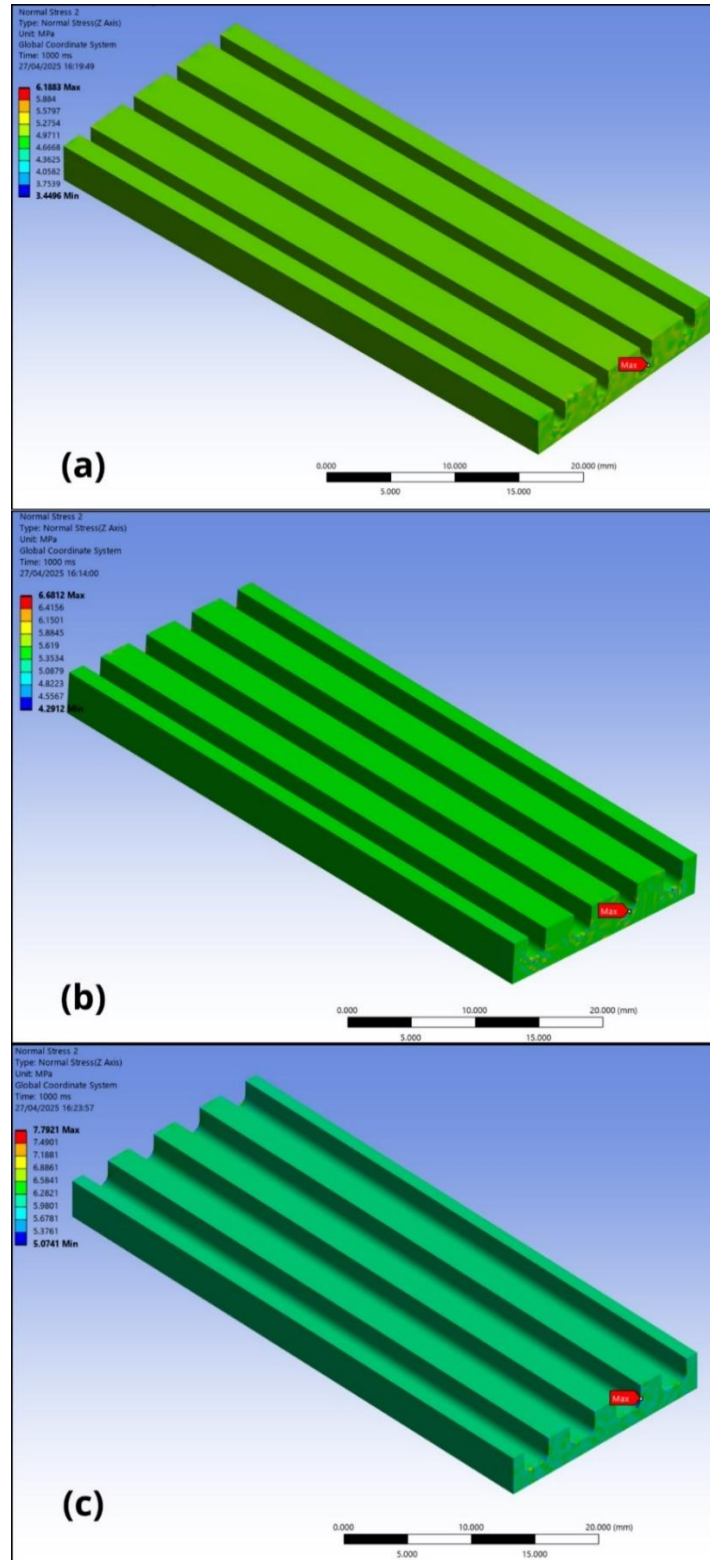
Na Figura 46 é possível visualizar os campos de tensão da configuração de dutos para as porcentagens de 15%, 23% e 32%. Percebe-se que a máxima de tensão se encontra em um ponto singular na extremidade da região estudada, próximo da região de fixação do corpo de prova. Esse comportamento é esperado, já que a configuração de dutos possui canais uniformes ao longo de toda a seção.

Figura 45 – Campos de tensão obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 46 – Campos de deformação obtidos por MEF na seção transversal dos corpos de prova submetidos a carregamentos axiais para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



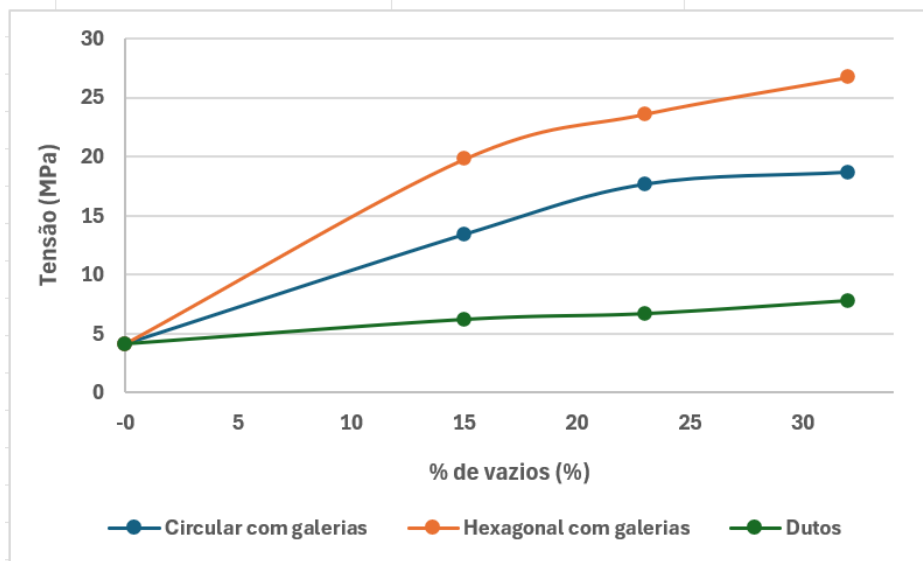
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 47 visualiza-se o gráfico que apresenta tensão x porcentagem de vazios em relação a cada configuração estudada. Os resultados obtidos através dos métodos dos elementos finitos foram validados com a análise experimental para a porcentagem de vazios de 32%, dessa forma, o gráfico foi produzido com os resultados provenientes da análise MEF para todas as porcentagens de vazios estudadas. Nota-se que para todas as situações à medida que aumenta a porcentagem de vazios aumenta a tensão máxima ao qual o corpo de prova está submetido. Esse comportamento é esperado já que os corpos de prova estão sendo avaliados sob a mesma aplicação de carga de 600 N, e à medida que aumenta a porcentagem de vazios ocorre uma diminuição de área de secção transversal gerando uma elevação da tensão para cada incremento de vazios.

Analisando a Figura 47, percebe-se também que para todos os casos a elevação da tensão é mais significativo entre 0% e 15% de vazios quando comparados com outros graus de incremento, como de 15 a 32%. Isso pode ser explicado pelo fato de que quando se compara 0 a 15% de vazios, está se comparando uma peça totalmente preenchido, solida e homogênea com uma peça que com 15% de vazios possui cavidades internas que geram concentradores de tensão que reduzem a capacidade de suportar esforços. Mas, quando se compara 15 a 32% de vazios, a comparação é entre duas peças que já possuem concentradores de tensão e portanto, a sua estrutura já está com a sua integridade prejudicada. Dessa forma, a tensão aumenta, mas a elevação é menos abrupta pois a peça já se comporta de maneira mais frágil e descontinua.

Quando se compara as diferentes configurações, percebe-se que a configuração hexagonal com galerias teve o pior desempenho sob aplicação de uma mesma carga de 600 N. Quando se analisa a estrutura com 32% de vazios na configuração hexagonal com galerias, percebe-se que a porcentagem de perda de área em relação ao totalmente preenchido é de 50,3%. Fazendo a mesma análise para o circular com galerias, percebe-se que a perda de área é de 54,8%. Considerando essa perspectiva, a configuração circular com galerias deveria ter o pior desempenho, mas o fato de a configuração hexagonal com galerias ter o pior desempenho pode ser explicado pelo fato de que nessa configuração há cantos agudos que geram concentradores de tensão. Das estruturas analisadas, a de dutos teve o melhor desempenho. Analisando a perda de área, essa configuração perdeu apenas 32% de área. Além disso, essa configuração não possui cantos agudos, o que reduz a presença de concentradores de tensão.

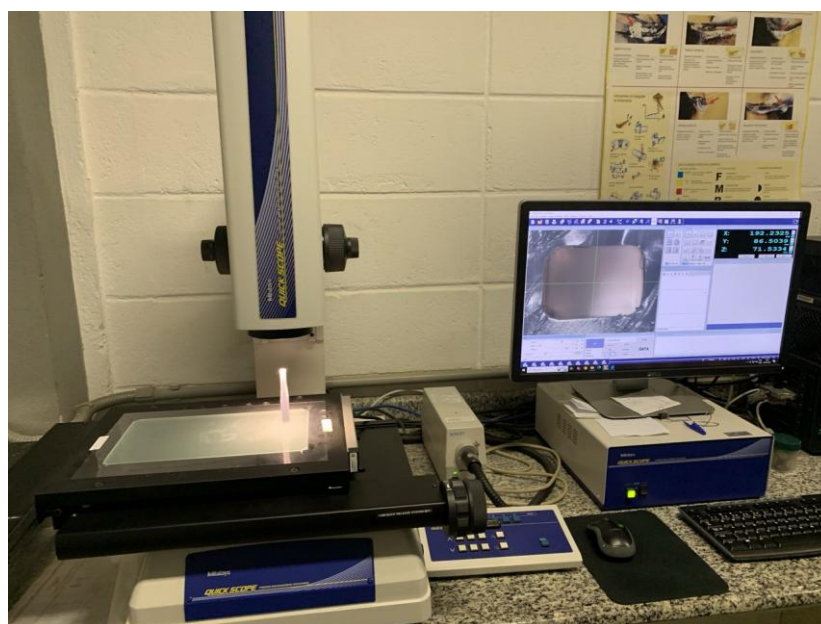
Figura 47 – Gráfico tensão x porcentagem de vazios em relação as configurações estudadas para corpos de prova submetidos à tração.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para verificar se os corpos de prova estavam eliminando toda a resina através das galerias no processo de impressão, as amostras foram submetidas a uma avaliação no microscópio Mitutoyo Quick Scope Q5 – LZB Serie 359. Para a obtenção das imagens foram utilizados 60% de luz paralela e 90% de luz difusa. Na Figura 48 é possível observar o microscópio e o ambiente de análise utilizado.

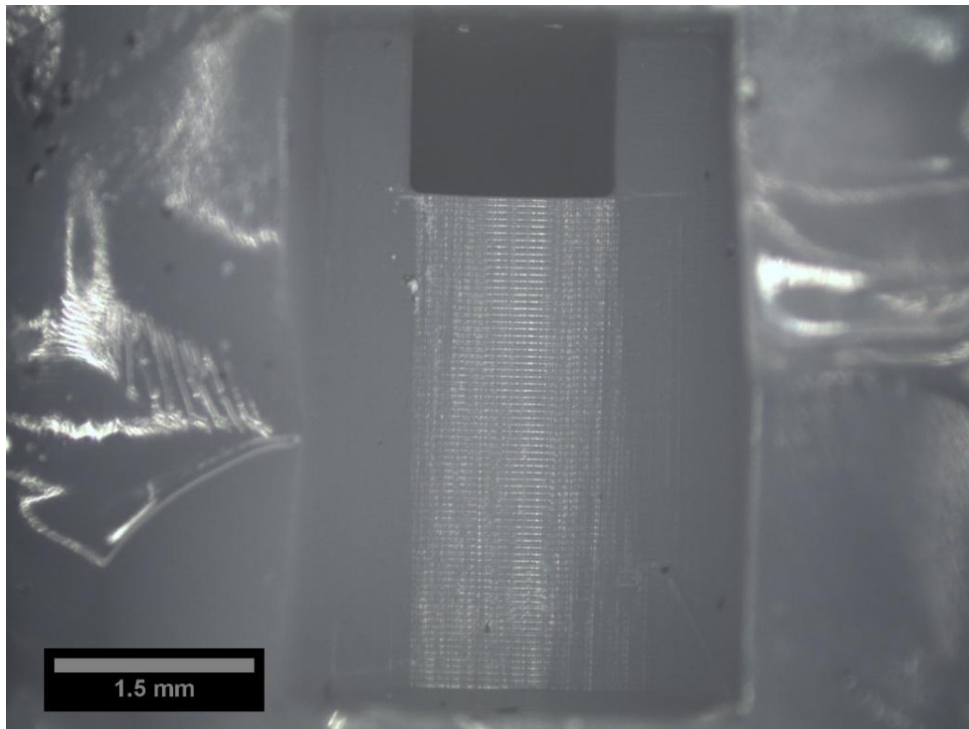
Figura 48 – Ambiente de análise dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 49 encontra-se a captura das galerias da configuração circular realizado pelo microscópio. Conforme é possível observar, as cavidades e as galerias estão sem nenhum resíduo de resina.

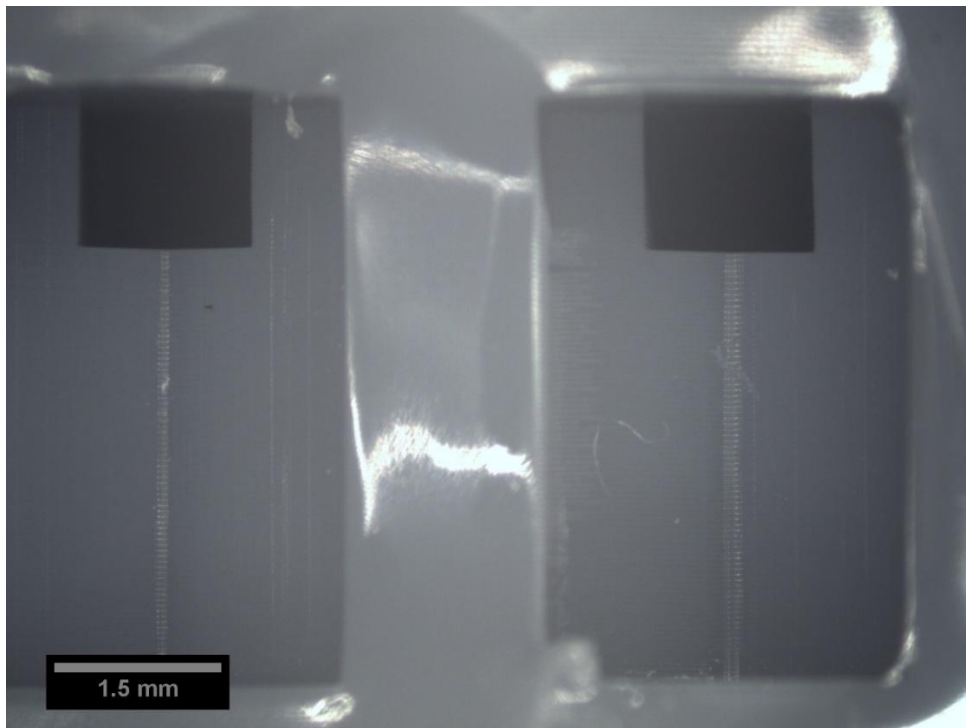
Figura 49 – Cavidade do corpo de prova da configuração circular com galerias livre de resina residual.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 50 encontra-se a captura das galerias da configuração hexagonal. Assim como anteriormente, as cavidades e as galerias estão sem nenhum resíduo de resina.

Figura 50 – Cavity do corpo de prova da configuração hexagonal com galerias livre de resina residual.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 51 encontra-se a captura da configuração de dutos. Assim como anteriormente, as cavidades e as galerias estão sem nenhum resíduo de resina.

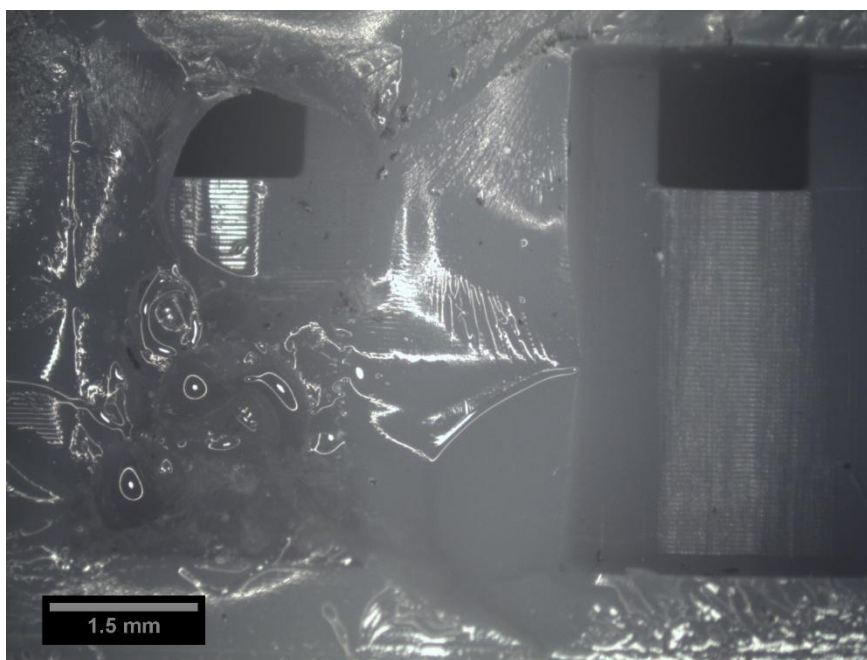
Figura 51 – Cavity do corpo de prova da configuração de dutos livre de resina residual.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em todas as amostras analisadas encontrou-se resina residual em apenas uma delas, na extremidade de um furo do corpo de prova da configuração circular com galerias, conforme é possível verificar na Figura 52.

Figura 52 – Cavidade do corpo de prova da configuração circular com galerias apresentando resina residual.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A presença de resina residual em apenas uma das amostras analisadas evidencia a robustez da configuração de galerias proposta.

4.2.2 Corpo de Prova Submetido a Ensaio de Flexão

Para os corpos de prova das diferentes configurações que foram submetidos ao ensaio de flexão analisou-se os dados de deslocamento e tensão obtidos nos experimentos. É possível observar os resultados para a aplicação de carga de 40 N para as geometrias circulares com galerias, hexagonais com galerias e corpos de prova com dutos para 32% de vazios na Tabela 20.

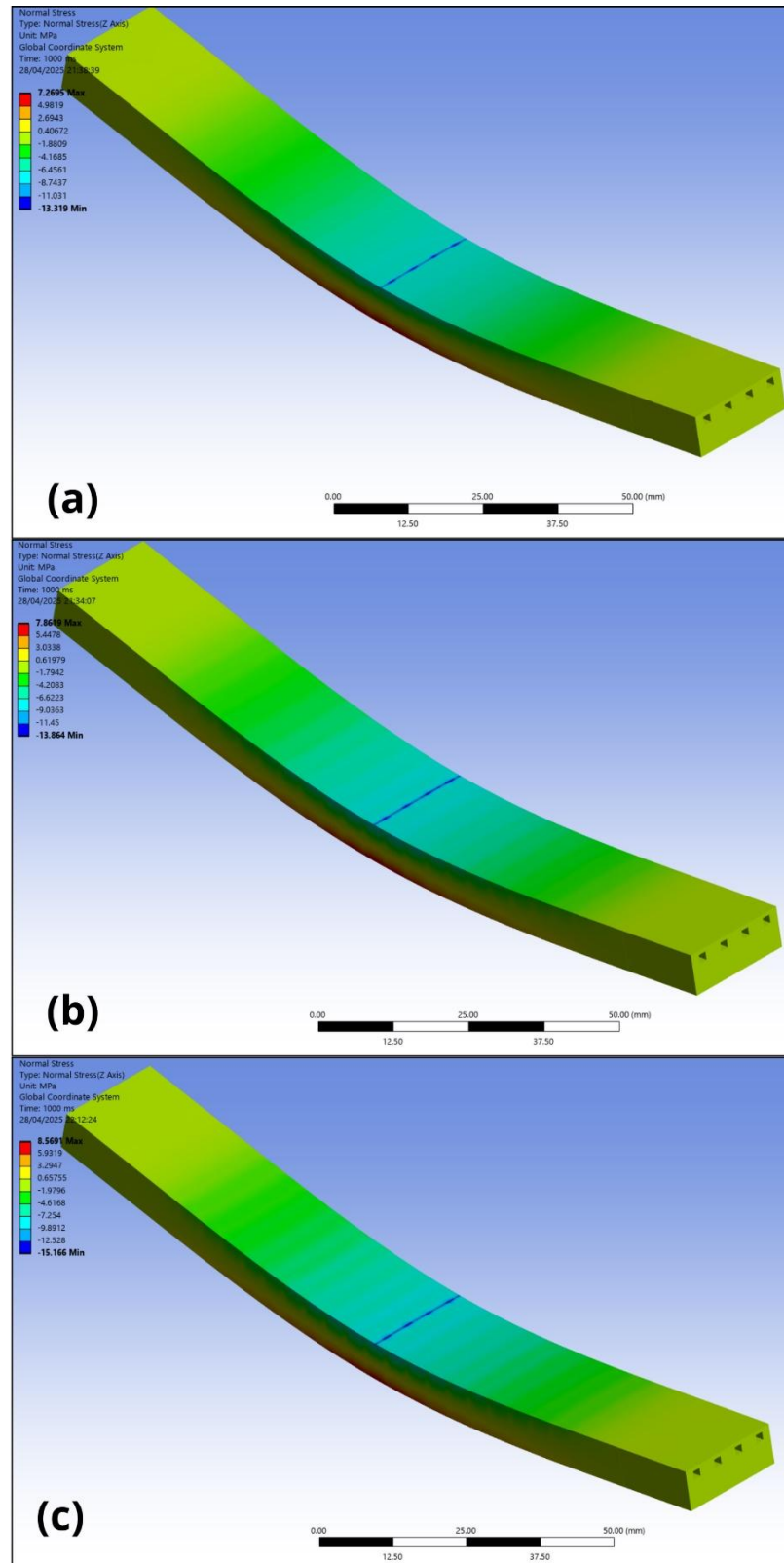
Tabela 20 – Resultados experimentais dos corpos de prova das configurações circular com galerias, hexagonais com galerias e de dutos para 32% de vazios.

Configuração	Corpo de prova	Deslocamento (mm)	Média	Desvio Padrão	Tensão (MPa)	Média	Desvio Padrão
Circular	CDP 01	1,400	1,435	0,053	8,861	8,860	0,003
	CDP 02	1,420			8,855		
	CDP 03	1,447			8,863		
	CDP 04	1,388			8,861		
	CDP 05	1,522			8,861		
Hexagonal	CDP 01	1,466	1,511	0,060	8,649	8,649	0,003
	CDP 02	1,513			8,647		
	CDP 03	1,448			8,647		
	CDP 04	1,527			8,654		
	CDP 05	1,601			8,647		
Dutos	CDP 01	1,132	1,162	0,047	6,896	6,897	0,002
	CDP 02	1,109			6,895		
	CDP 03	1,233			6,899		
	CDP 04	1,173			6,896		
	CDP 05	1,167			6,901		

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

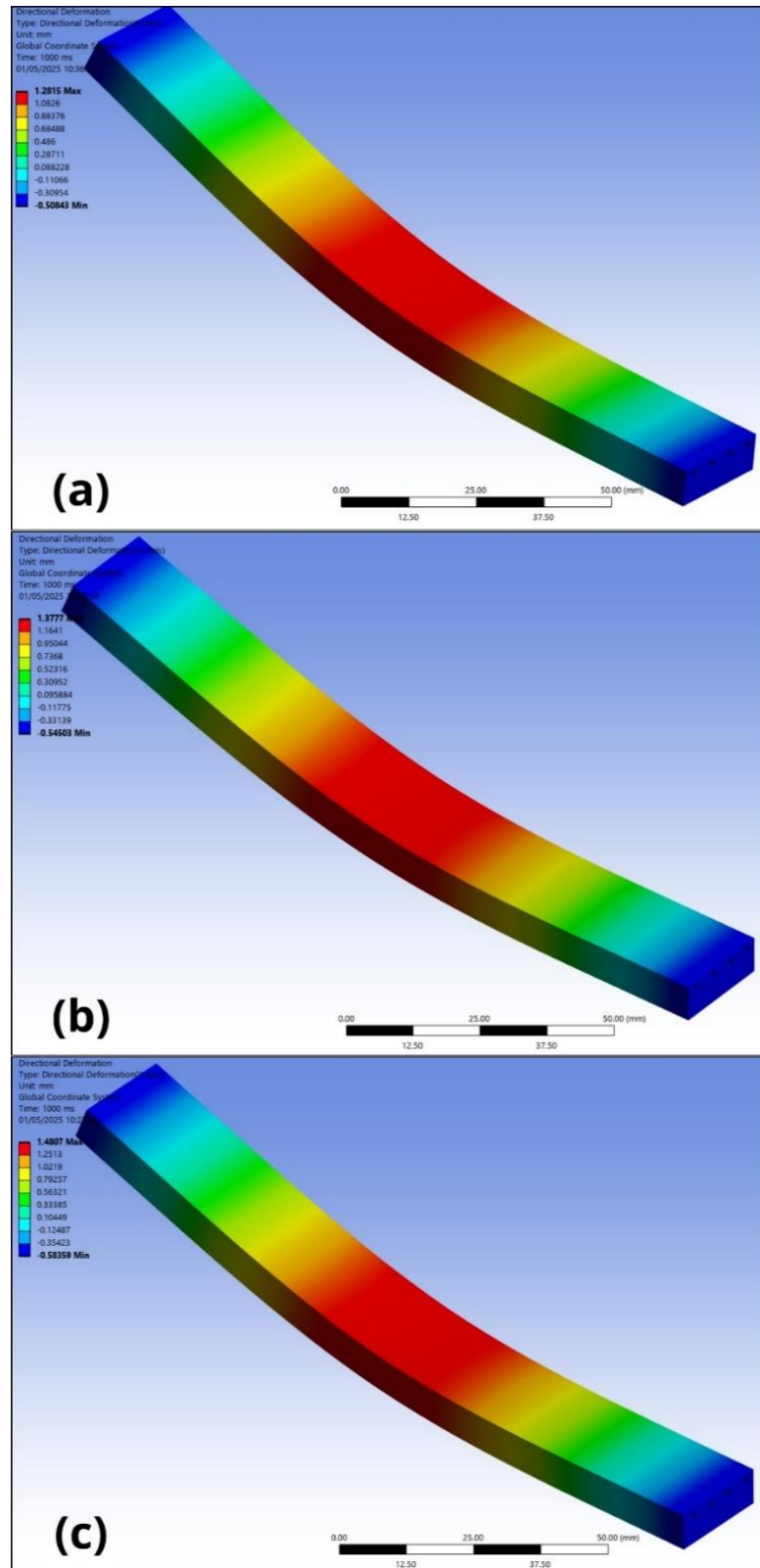
As configurações também foram analisadas por MEF. Na Figura 53 é possível visualizar os campos de tensão para a configuração circular com galerias para todas as porcentagens de vazios analisadas. O comportamento está conforme esperado já que é possível visualizar o corpo de prova fletindo no local de aplicação da carga e a visualização lateral da peça em formato de U. Percebe-se que na linha central, onde há aplicação da força ocorre uma compressão gerando uma tensão negativa. Na Figura 54 é possível visualizar o deslocamento do corpo de prova, conforme esperado, o deslocamento máximo vertical ocorre no local onde a carga é aplicada e induz uma curvatura no corpo de prova. Para as análises de tensão e deslocamento, o efeito do aumento gradual da porcentagem de vazios é perceptível, uma vez que quanto maior a porcentagem de vazios, maior a tensão e o deslocamento para uma mesma carga aplicada.

Figura 53 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 54 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração circular com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.

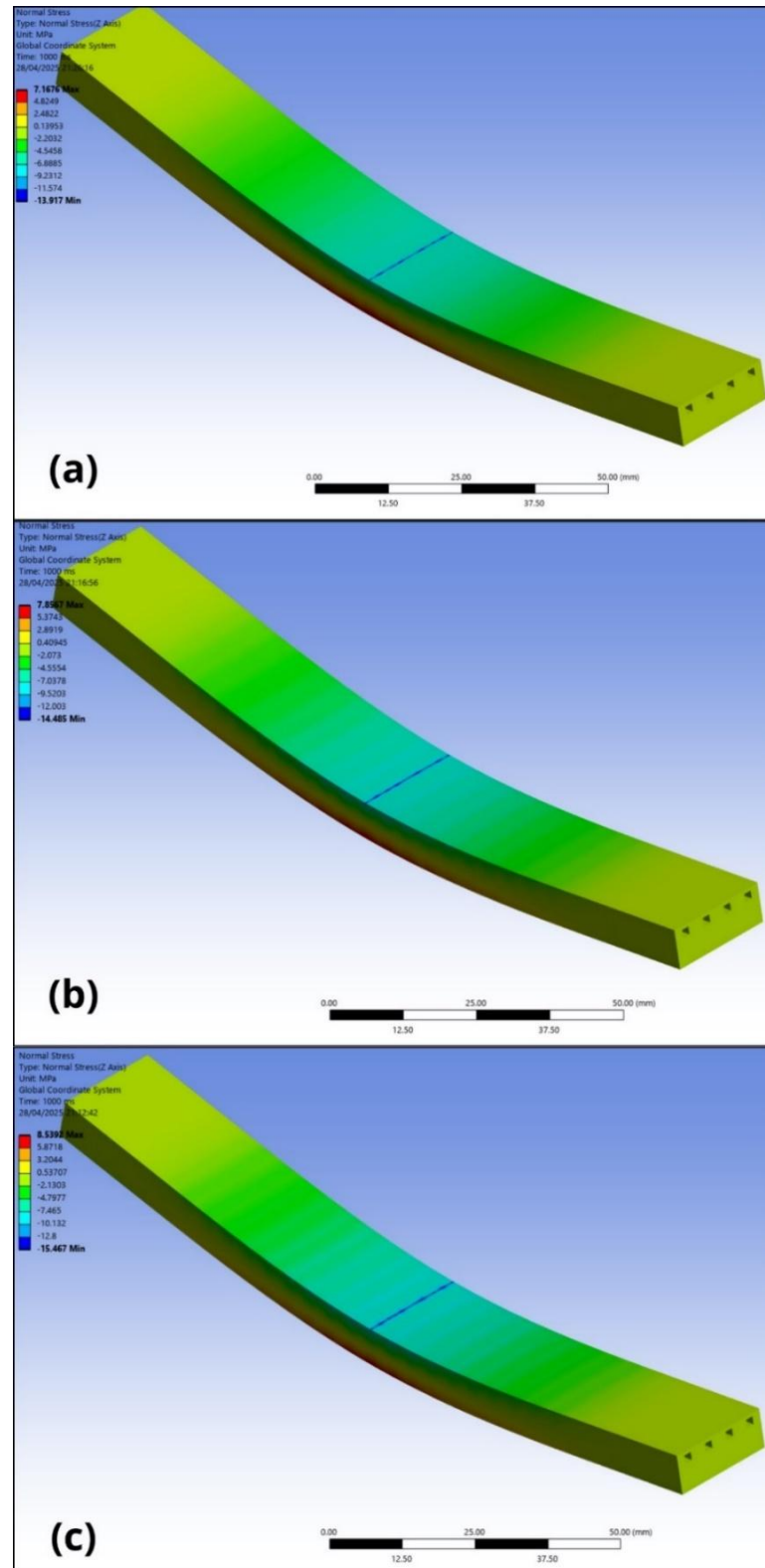


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 55 é possível visualizar os campos de tensão para a configuração hexagonal com galerias para todas as porcentagens de vazios analisadas e na Figura 56 os deslocamentos verticais. Da mesma forma que o corpo de prova anterior, é possível visualizar o corpo de prova fletindo no local de aplicação da carga e a tensão de compressão negativa no local de aplicação da força. Também é possível perceber o efeito do aumento gradual da porcentagem de vazios já que quanto maior a porcentagem de vazios, maior a tensão e o deslocamento para uma mesma carga aplicada.

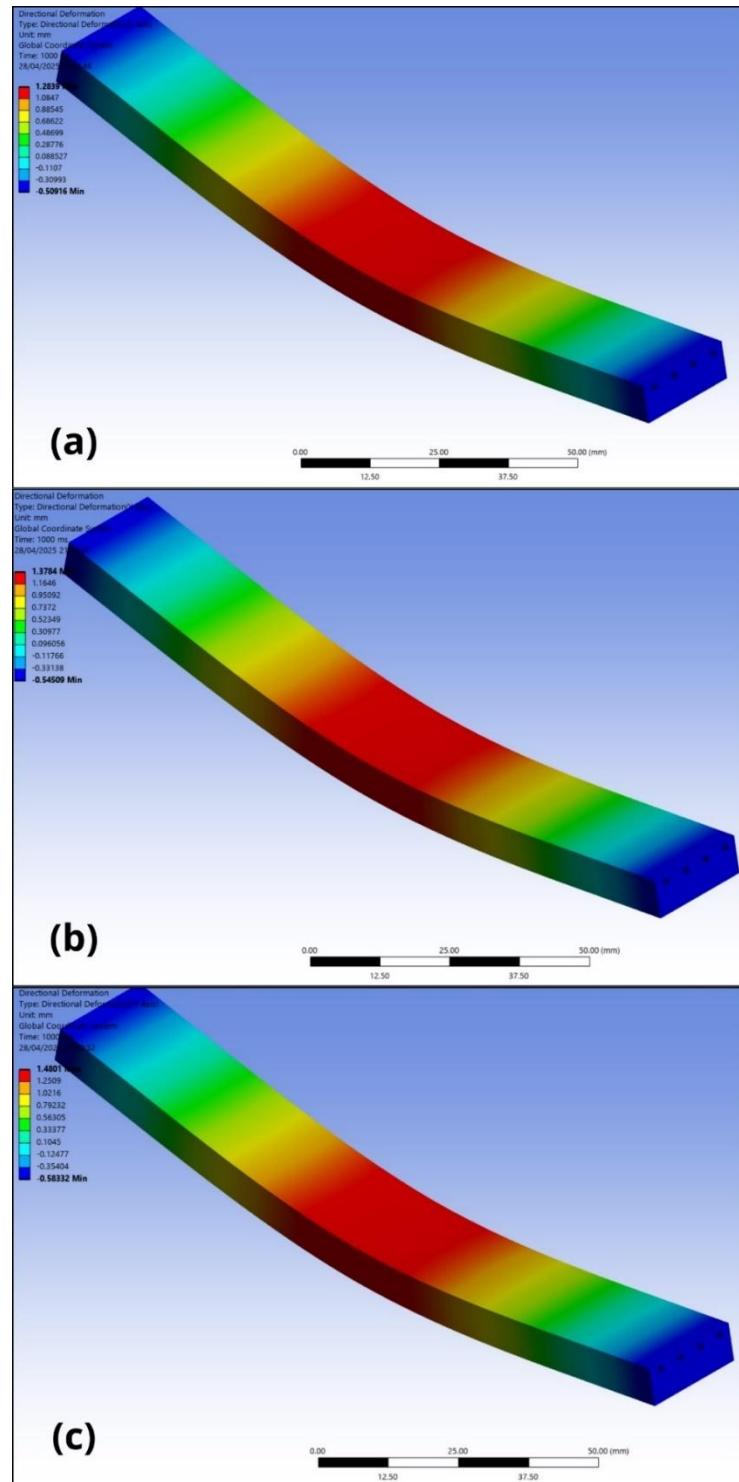
Na Figura 57 e na Figura 58 é possível visualizar os campos de tensão e o deslocamento vertical para a configuração de dutos para todas as porcentagens de vazios analisadas. Conforme esperado, o corpo de prova fletindo no local de aplicação da carga e a visualização lateral da peça em formato de U. Percebe-se que na linha central, onde há aplicação da força ocorre uma compressão gerando uma tensão negativa. O efeito do aumento gradual de incremento de vazios influenciou na elevação do valor de tensão e também do deslocamento. Entretanto, quando se compara a configuração de dutos com as demais configurações nota-se que para os diferentes incrementos de porcentagens de vazios houve uma elevação menos significativa dos parâmetros analisados.

Figura 55 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



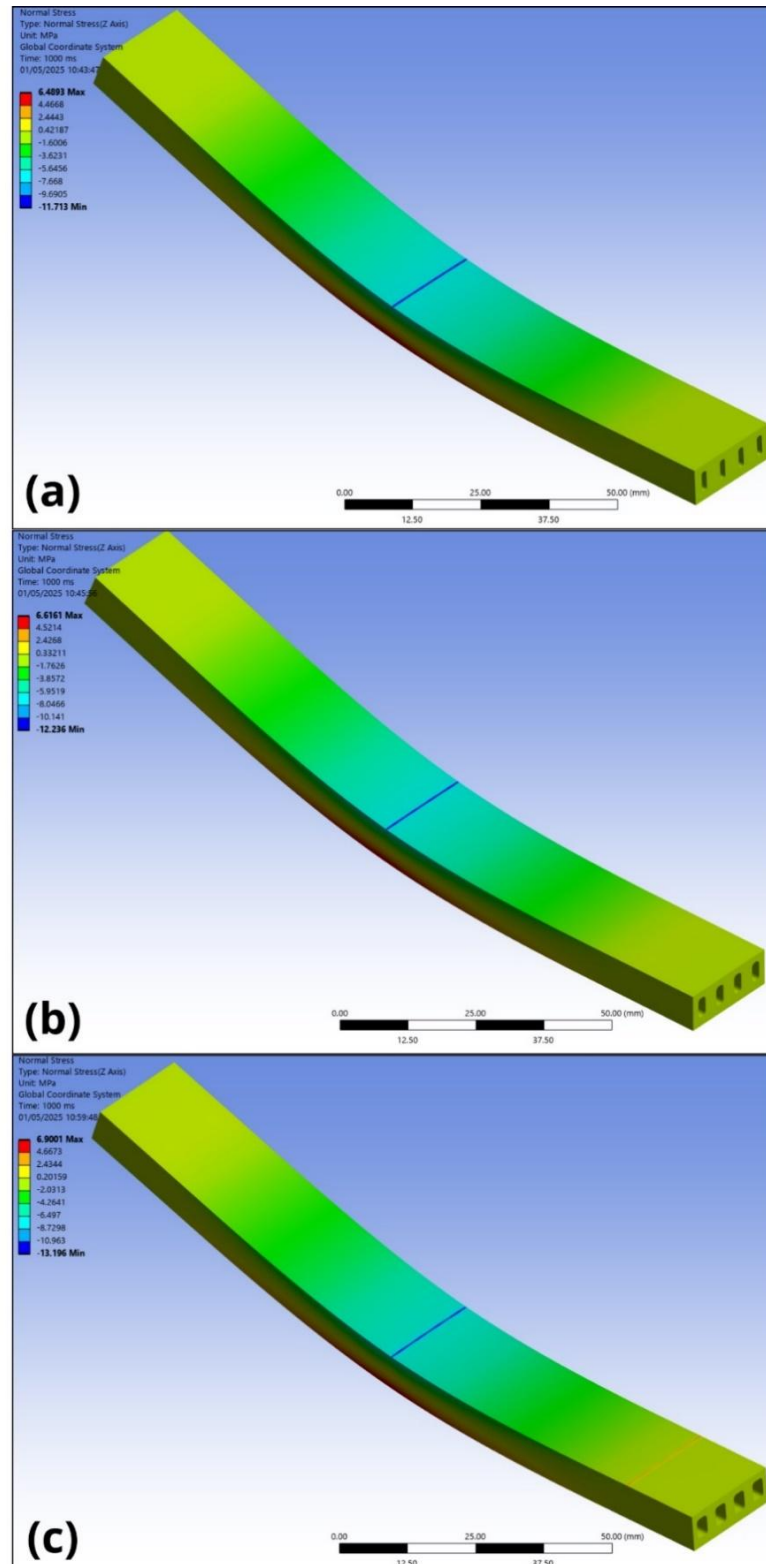
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 56 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração hexagonal com galerias para as porcentagens de vazios de a) 15% b)23% e c) 32%.



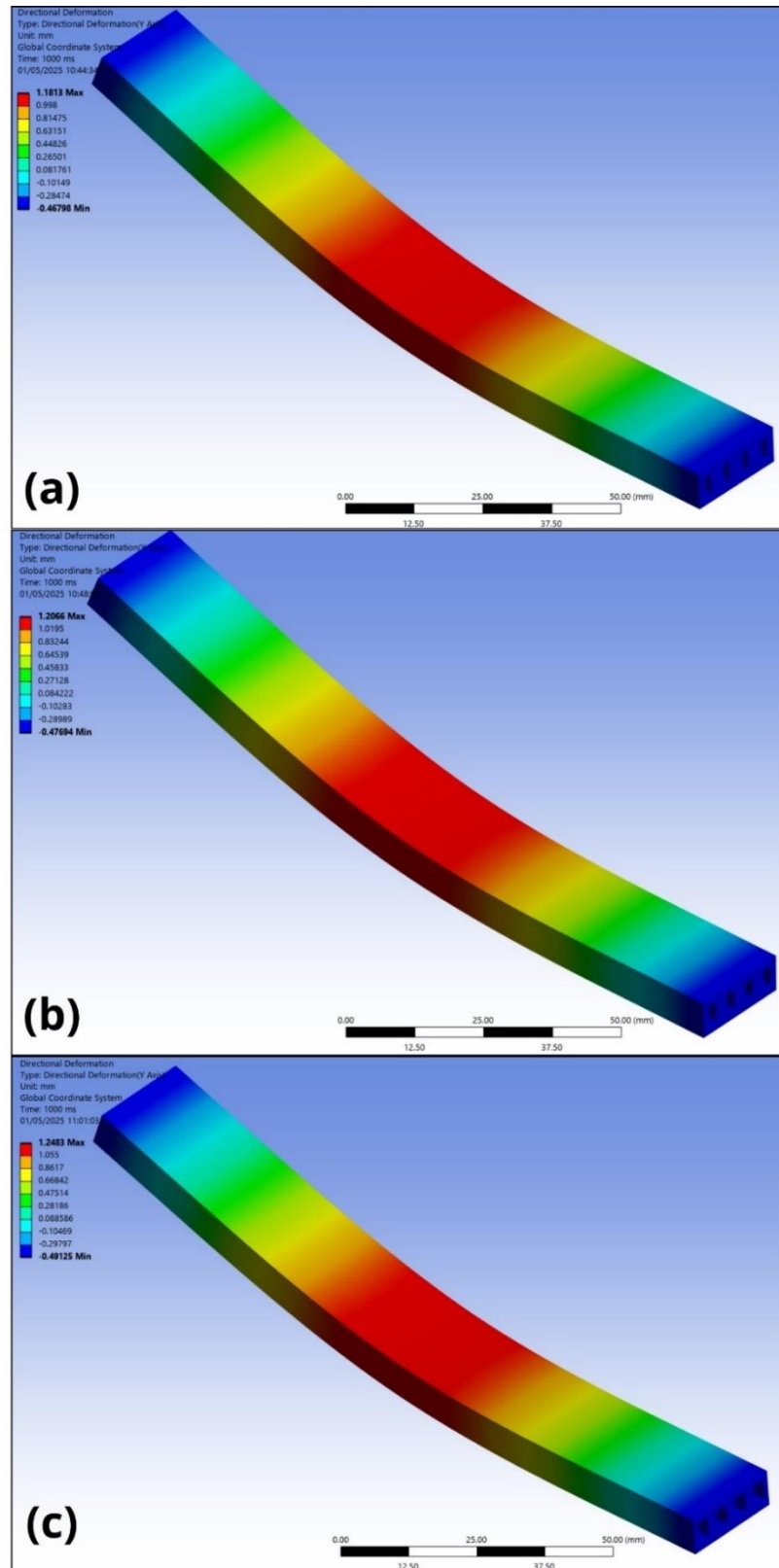
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 57 – Campos de tensão obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 58 – Deslocamentos obtidos por MEF dos corpos de prova submetidos à flexão em três pontos para a configuração de dutos para as porcentagens de vazios de a) 15% b) 23% e c) 32%.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Tabela 21 é possível visualizar a comparação entre os resultados de deslocamentos e tensões obtidos pelos ensaios e os deslocamentos e tensões obtidos pela análise de elementos finitos para as porcentagens de 32% de vazios e aplicação de carga de 40 N. Os valores de tensão e deslocamento provenientes dos ensaios foram encontrados realizando a média dos dados obtidos no experimento. Para a análise de elementos finitos, os valores apresentados são os valores máximos, que para a flexão se encontram na superfície onde o material foi alongado.

Analisando a tabela, percebe-se que o erro comparando os métodos é muito baixo, uma vez que o erro máximo encontrado é de 6,9%, mostrando que a simulação realizada em Ansys é representativa ao ensaio realizado.

Tabela 21 – Comparação de deslocamento e tensão entre os métodos experimentais e a análise de elementos finitos.

Configuração	Deslocamento (ensaio) (mm/mm)	Deslocamento MEF (mm/mm)	Erro (%)	Tensão (ensaio) (MPa)	Tensão MEF (MPa)	Erro (%)
Circular	1,435	1,4807	3,07	8,860	8,5691	3,29
Hexagonal	1,511	1,4801	2,09	8,649	8,5392	1,27
Dutos	1,162	1,2483	6,88	6,897	6,9001	0,04

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados da simulação de deslocamento, bem como o deslocamento para uma carga de 40 N, podem ser encontrados na Tabela 22. Os dados apresentados na Tabela 22 para cada configuração e porcentagem de vazios referem-se aos valores máximos encontrados.

Tabela 22 – Resultados de deformação, tensão e deslocamento provenientes de análise MEF.

Configuração	Porcentagem de vazios (%)	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)
Circular	32	1,4807	8,5691
	23	1,3777	7,8619
	15	1,2815	7,2695
Hexagonal	32	1,4801	8,5392
	23	1,3784	7,8567
	15	1,2839	7,1676
Dutos	32	1,2483	6,9001
	23	1,2066	6,6161
	15	1,1813	6,4893

Totalmente preenchido	0	1,1292	6,2397
--------------------------	---	--------	--------

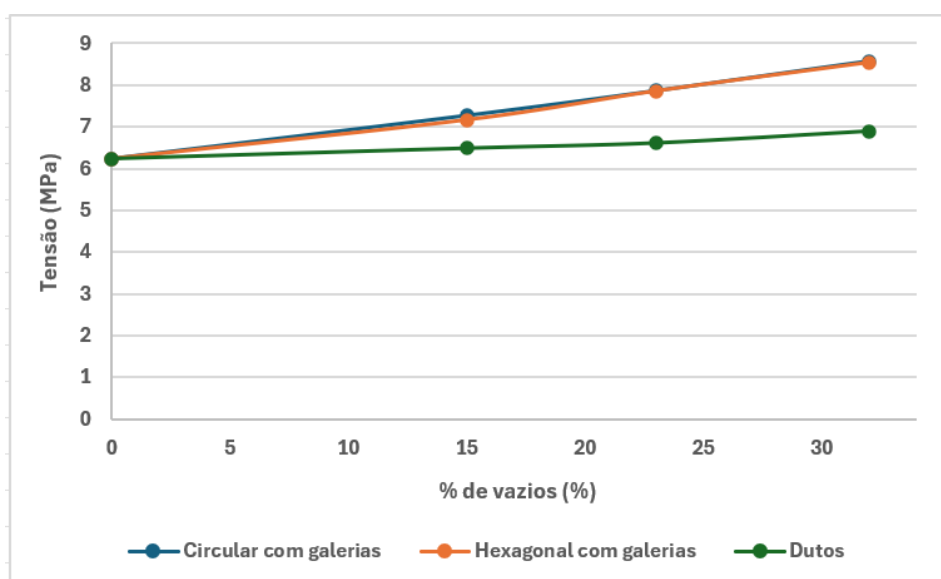
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 59 visualiza-se o gráfico que apresenta tensão x porcentagem de vazios em relação a cada configuração estudada para a flexão em três pontos. Conforme esperado, para todas as situações à medida que aumenta a porcentagem de vazios aumenta a tensão máxima ao qual o corpo de prova está submetido.

Analizando a flexão, percebe-se que a elevação de tensão é mais suave entre os incrementos estudados. Isso pode ser explicado pela natureza do ensaio de flexão em três pontos, já que na região de aplicação da força ocorre compressão, gerando assim uma menor influência da inserção de vazios na resistência da peça.

Quando se compara as diferentes configurações, percebe-se que a configuração hexagonal com galerias teve o desempenho similar a configuração circular com galerias sob aplicação de uma mesma carga de 40 N. Isso pode ser explicado pelo fato de os dois modelos terem valores similares de momento de inércia. Novamente, a configuração de dutos teve o melhor desempenho pois dentre as estruturas analisadas pois possui o maior momento de inércia.

Figura 59 – Gráfico tensão x porcentagem de vazios em relação as configurações estudadas para corpos de prova submetidos à flexão em três pontos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5 CONCLUSÃO

Dos resultados apresentados para o estudo de placa com furo central, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

1. Foi possível entender que, para condições de carga axial, o fator de concentração de tensões foi consistente, pois os resultados dos métodos DIC, MEF e Whitney–Nuismer apresentaram valores muito próximos, com erros variando de 0,42% a 5,25% (Tabela 13). Além disso, ao analisar os campos de deformações gerados pelo DIC (Figura 27, Figura 28 e Figura 29) e MEF (Figura 30), é possível perceber que eles são muito semelhantes, gerando campos de deformações simétricos.
2. Para a condição de carga excêntrica, comparando os valores gerados pela análise DIC (Figura 34, Figura 35 e Figura 36) e pela análise MEF (Figura 37), pode-se perceber que os campos de tensões são semelhantes, e a restrição imposta pelo grampo minimizou o efeito do momento fletor causado pela carga excêntrica, gerando pequenas diferenças ao analisar as deformações nos lados esquerdo e direito. O erro máximo de 6,9% para o lado esquerdo (Tabela 15) e 0,3% para o lado direito (Tabela 16) na comparação MEF e DIC demonstra que o modelo de simulação representa o que ocorreu no ensaio.
3. Os resultados reforçam a robustez dos métodos aplicados. Pelo fato do estudo de concentradores de tensão em corpos de prova no modelo placa plana com furo central fabricados por dispositivos mSLA ter apresentado resultados consistentes, ele foi utilizado como referência para o estudo de corpos de prova com cadeia de furos.

Para o estudo de cadeia de furos, as seguintes conclusões foram obtidas:

1. Concluiu-se que, para os corpos de prova submetidos à tração, o DIC e o modelo de simulação tiveram aspectos superfícies similares quando o corpo de prova estava com uma boa granulometria, como para as configurações circulares com galerias (Figura 40 e Figura 43) e de dutos (Figura 42 e Figura 43). Os resultados encontrados são similares analisando tanto a região de transição como a região com furos, tendo como erro máximo 8,2% (Tabela 18).
2. Para todas as configurações analisadas submetidas à tração à medida que aumenta a porcentagem de vazios, aumenta a tensão para uma mesma carga aplicada e a elevação de tensão é mais significativa entre 0 e 15% de vazios. Além disso, de todas as configurações estudadas, a de dutos se mostrou a mais promissora.

3. Os corpos de prova submetidos a esforços de flexão, os resultados experimentais e do modelo de simulação estão muito similares, com erro máximo de 6,9% (Tabela 21). E novamente, a configuração de dutos, se mostrou a mais promissora entre os modelos estudados.

4. De todos os métodos estudados, tanto para tração quanto para flexão o modelo de dutos apresentou os resultados mais promissores. Além disso, nas análises utilizando microscópio ele não apresentou nenhum resquício de resina no seu interior. Diante disso, conclui-se que é possível utilizar uma alternativa viável através do método mSLA que reduziu significativamente a quantidade de material da peça minimizando os custos ambientais e econômicos sem um grande prejuízo no comportamento mecânico.

Nesse estudo foi apresentado dados sobre as características mecânicas de resinas fotopoliméricas impressas em dispositivos mSLA, que são escassos na literatura. Analisou-se o impacto da introdução de espaços ocos em diferentes configurações e ficou evidenciado que, para esse tipo de material, faz-se necessário a introdução de vias para a retirada da resina durante o processo de fabricação. Essa metodologia é robusta e apresenta uma solução viável para a redução do uso de matéria prima para a fabricação de peças impressas em dispositivos mSLA.

Para trabalhos futuros, a análise de outras geometrias, como a quadrada, por exemplo, poderia ser adicionada. Ou ainda o estudo da introdução de espaços ocos em peças que apresentam uma geometria curva. Adicionalmente, um estudo complementar realizando uma varredura para outras porcentagens de vazios, reduzindo assim os intervalos de análise poderia contribuir para o melhor entendimento do comportamento mecânico do material. Além disso, um trabalho sobre o impacto do tamanho da célula unitária para uma mesma porcentagem de vazios no comportamento mecânico de amostras impressas por dispositivos mSLA poderia acrescentar dados relevantes. Por fim, estudos adicionais que se dediquem a estudar a relação do tempo de cura e lavagem nas propriedades mecânicas poderiam enriquecer o conhecimento sobre as características de resina fotocuráveis.

REFERÊNCIAS

- ABEYKOON, C.; SRI-AMPHORN, P.; FERNANDO, A. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, Beijing, v. 3, n. 3, p. 284-297, 2020.
- AIDI, B.; PHILEN, M. K.; CASE, S. W. Progressive damage assessment of centrally notched composite specimens in fatigue. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Oxford, 74, p. 47-59, 2015.
- ANSYS. **ANSYS mechanical APDL elemento reference**. Canonburg, 2009. Release 2009 R2. Disponível em: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/ansys_14_element_reference.pdf. Acesso: 25 jan 2025.
- ARABUL, E.; LUNT, A. J. G. A novel low-cost dic-based residual stress measurement device. **Applied Sciences**, Basel, 12, n. 14, p. 7233, 2022.
- BAGHERI, A.; JIN, J. Photopolymerization in 3D printing. **ACS Applied Polymer Materials**, Washington, v.1, n. 4, p. 593-611, 2019.
- BELEZA, S. C. A. **Medição de deformação através da técnica de correlação digital de imagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Liboa, Lisboa.
- BELLONI, V. *et al.* PY2DIC: A new free and open source software for displacement and strain measurements in the field of experimental mechanics. **Sensors**, Basel, 19, n. 18, p. 3832, 2019.
- BRASZKIEWICZ, M. Manufacturing of mechanical elements with properties of metamaterials using 3D printing technology. **MATEC Web of Conferences**, Bydgoszcz, v.338, p. 01002, 2021.
- CURE, D. **Quanto custa impressora 3D?** 3D Cure, Betim, 2025. Disponível em: <https://3dcure.com.br/quanto-custa-uma-impressora-3d/>. Acesso em: 01 maio 2025.
- DEV, S.; SRIVASTAVA, R. Effect of infill parameters on material sustainability and mechanical properties in fused deposition modelling process: a case study. **Progress in Additive Manufacturing**, Heidelberg, v.6, n. 4, p. 631-642, 2021.
- EXLEY, O.; PERERA, Y. S.; ABEYKOON, C. Investigation of the effect of the degree of hollowness and internal cavity structure on the mechanical properties of 3D-printed parts. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, Beijing, 7, n. 1, p. 45-61, 2024.
- FALTA, J.; YUNUS, E. Strain-rate dependent compressive properties of inverted honeycomb lattice and bulk cylindrical samples 3D printed by msla method. *In*: INTERNATIONAL

CONFERENCE, 27./28., p. 93-96, 2022, Milovy. **Proceedings** [...] Prague: ITAM CAS, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21495/51-2-93>. Acesso em: 19 jan. 2025.

FEROZ ALI, L. *et al.* Evaluation of the polyamide's mechanical properties for varying infill percentage in FDM process. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, 68, p. 2509-2514, 2022.

GALETA, T. *et al.* Influence of structure on mechanical properties of 3D printed objects. **Procedia Engineering**, Oxford, 149, p. 100-104, 2016.

GOODARZI HOSSEINABADI, H. *et al.* Plasticity in polymeric honeycombs made by photopolymerization and nozzle based 3D-printing. **Polymer Testing**, Essex, 63, p. 163-167, 2017.

HEARN, E. J. Simple stress and strain. In: HEARN, E. J. (ed.). **Mechanics of materials**. 3 th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. p. 1-26. v.1

JAYAWARDANE, H. *et al.* Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing. **Sustainable Manufacturing and Service Economics**, Amsterdam, v. 2, p. 100015, 2023.

JUNK, S.; BÄR, F. Design guidelines for additive manufacturing using masked stereolithography mSLA. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 119, p. 1122-1127, 2023.

BRESSIANI JÚNIOR, I. *et al.* Fibras naturais e compósitos nas indústrias de mobilidade. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v.6, n.4, p. 129-138, 2020.

KANISHKA, K.; ACHERJEE, B. Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. **Journal of Manufacturing Processes**, London, v.107, p. 574-619, 2023.

KAO, Y.-T.; DRESSEN, T.; KIM, D. S. Experimental investigation of mechanical properties of 3D-printing built composite material. In: INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM, p. 904-913, 2015, Austin. **Proceedings** [...] Austin: University of Texas, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2152/89388>. Acesso em: 25 jan 2025.

KOKARE, S.; OLIVEIRA, J. P.; GODINA, R. A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches. **Journal of Manufacturing Processes**, London, 101, p. 67-85, 2023.

KOUKOUSAKI, I. **Evaluation of accuracy and dimensional stability over time of 3D printed custom trays, using two different types of printing resins**. 2023. 44 f. Dissertation degree (Master of Science) - College Station: Texas A&M University, 2023.

KUMAR, S. *et al.* Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS). **Journal of Micromanufacturing**, New Delhi, 2, n. 2, p. 175-197, 2019.

LE, L. *et al.* Reducing print time while minimizing loss in mechanical properties in consumer FDM parts. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, Beijing, 5, n. 2, p. 197-212, 2022.

LI, J. *et al.* Additive manufacturing for ultra-high vacuum components: Leveraging photopolymer resin technologies. **Vacuum**, Oxford, 220, p. 112769, 2024.

LUO, J. *et al.* On strain rate and temperature dependent mechanical properties and constitutive models for additively manufactured polylactic acid (PLA) materials. **Thin-Walled Structures**, Oxford, 179, p. 109624, 2022.

MANOJ PRABHAKAR, M. *et al.* A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, 45, p. 6108-6114, 2021.

MININ, A. *et al.* Development of a cell co-cultivation system based on protein magnetic membranes, using a MSLA 3D printer. **Bioprinting**, Amsterdam, 23, p. e00150, 2021.

MOHAMED MAKKI, M.; CHOKRI, B. Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials. **Journal of Composite Materials**, London, 51, n. 11, p. 1583-1594, 2017.

MORAIS, A. B. Open-hole tensile strength of quasi-isotropic laminates. **Composites Science and Technology**, Oxford, 60, n. 10, p. 1997-2004, 2000.

NOWACKI, B. *et al.* Effect of post-process curing and washing time on mechanical properties of mSLA printouts. **Materials**, Basel, v.14, n. 17, 2021.

OLIVEIRA, G. C. R. D. *et al.* Modeling the stress field in ms-la-fabricated photosensitive resin components: a combined experimental and numerical approach. **Modelling**, 6, n. 1, p. 3, 2025.

PATEL, A.; DESAI, C. K. Stress concentration around an elliptical hole in a large rectangular plate subjected to linearly varying in-plane loading on two opposite edges. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Amsterdam, 106, p. 102432, 2020.

PRIYADARSHINI, J. *et al.* Supply chain resilience and improving sustainability through additive manufacturing implementation: a systematic literature review and framework. **Production Planning & Control**, Oxfordshire, 36, n. 3, p. 309-332, 2025.

PYL, L.; KALTEREMIDOU, K.-A.; VAN HEMELRIJCK, D. Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests. **Composites Science and Technology**, Oxford, 171, p. 135-151, 2019.

SALEH, M. N. *et al.* Investigating the potential of using off-axis 3D woven composites in composite joints' applications. **Applied Composite Materials**, Dordrecht, 24, n. 2, p. 377-396, 2017.

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

TANG, C. *et al.* Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. **Composites Part C: Open Access**, Oxford, 3, p. 100076, 2020.

TEIXEIRA PINTO, J. M. *et al.* DIC strain measurements at the micro-scale in a semi-crystalline polymer. **Experimental Mechanics**, New York, 53, n. 8, p. 1311-1321, 2013.

TSAL, K. H. *et al.* Finite element based point stress criterion for predicting the notched strengths of composite plates. **Journal of Mechanics**, Oxford, 28, n. 3, p. 401-406, 2012.

UZCATEGUI, A. C. *et al.* Understanding and improving mechanical properties in 3D printed parts using a dual-cure acrylate-based resin for stereolithography. **Advanced Engineering Materials**, Weinheim, 20, n. 12, p. 1800876, 2018.

VALIZADEH, I.; WEEGER, O. Parametric visco-hyperelastic constitutive modeling of functionally graded 3D printed polymers. **International Journal of Mechanical Sciences**, Oxford, 226, p. 107335, 2022.

VOLGIN, O.; SHISHKOVSKY, I. V. Material modelling of FDM printed PLA part. **Engineering Solid Mechanics**, North Vancouver, p. 153-160, 2021.

WANG, E. *et al.* Investigation and optimization of the impact of printing orientation on mechanical properties of resin sample in the low-force stereolithography additive manufacturing. **Materials**, Basel, v.15, n. 19, 2022.

WHITNEY, J. M.; NUISMER, R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. **Journal of Composite Materials**, London, 8, n. 3, p. 253-265, 1974.

WU, C.-M. *et al.* Strain and stress concentration of ductile composites in full-range deformation by digital image correlation. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, New York, 30, n. 18, p. 3817-3825, 2023.

YOUSAF, A. *et al.* Potential and challenges of recycled polymer plastics and natural waste materials for additive manufacturing. **Sustainable Materials and Technologies**, Amsterdam, 41, p. e01103, 2024.

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

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	CARLA CARVALHO PINTO 15/04/1998
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	CARVALHO PINTO, CARLA PINTO, C.C. CARLA CARVALHO PINTO
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/0963406490993165
ORCID	-
outro identificador	-
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2017/2022	Graduação em Engenharia Mecânica Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
Artigo completo publicado em periódico CARVALHO PINTO, CARLA; SILVA, FERNANDO DE AZEVEDO; SIQUEIRA GUIDI, ERICK. Título: Analytical, Experimental, and Finite Element Study of Stress Concentration for Samples Printed on Masked Stereolithography Devices. Applied Mechanics. Fator de Impacto(2025 JCR): 1,5000, v.6, p.1. 2025. Trabalho publicado em anais de evento (completo) PINTO, C. C.; SILVA, F. A.; GUIDI, E. S. Revisão sobre Métodos DIC 2D em Plataformas de Código Aberto para Materiais Poliméricos. In: VIII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia, 2024, Guaratinguetá/SP. VIII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia. 2024. Curso oferecido CARVALHO PINTO, CARLA. Modelagem para Impressão 3D com Inventor. Volta Redonda, 2024. (Curso ministrado).	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	

GUIDI, E. S.; PINTO, C. C. Participação em banca de Guilherme Araújo de Andrade Rafael. **Projeto de Pedaleira Ajustável para Veículo de Competição FSAE**. 2024. (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2024.

JÚNIOR, J. E. M.; REIS, J. S. M.; SILVA, D. E. W.; PINTO, C. C. Participação em banca de Igor Souza Correa, Matheus Lima da Silva, Weslle Luis Manoel da Silva. **Estudo Comparativo da Eficiência e Consumo de Combustível entre Veículo Diesel e Veículos Híbridos**. 2024. (Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, 2024.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

Apresentação oral no VIII Workshop da Pós-graduação em Engenharia, 2024, (Guaratinguetá). Revisão sobre Métodos DIC 2D em Plataforma de Código Aberto para Materiais Poliméricos. 2024. (Congresso).

Avaliador no IX Workshop de Engenharia De Materiais, 2024 (Congresso).